УДК 551.510
DOI: 10.12737/szf-84202208

Поступила в редакцию 29.07.2022
Принята к публикации 03.11.2022

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ВЕТРОМ И ВОЗМУЩЕНИЯМИ В СТРАТОСФЕРЕ

STATISTICAL RELATION OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES WITH NEUTRAL WIND AND DISTURBANCES IN THE STRATOSPHERE

М.В. Толстиков
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, maxim@iszf.irk.ru

А.В. Ойнац
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, oinats@iszf.irk.ru

М.Ф. Артамонов
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, artamonov.maksim@iszf.irk.ru

И.В. Медведева
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru

К.Г. Ратовский
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru

M.V. Tolstikov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, maxim@iszf.irk.ru

A.V. Oinats
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, oinats@iszf.irk.ru

M.F. Artamonov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, artamonov.maksim@iszf.irk.ru

I.V. Medvedeva
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ivmed@iszf.irk.ru

K.G. Ratovsky
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru

Аннотация. На основе представительной статистики параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), полученной Екатеринбургским и Магаданским радарами, показано, что распределения количества ПИВ и средних скоростей ПИВ по азимутам и локальному времени находятся в хорошем соответствии с гипотезой фильтрации внутренних гравитационных волн (ВГВ) нейтральным ветром. Проведена проверка влияния значительных зимних внезапных стратосферных потеплений на ВГВ в ионосфере. Предложен метод оценки зональной и меридиональной скоростей нейтрального ветра по распределениям параметров среднемасштабных ПИВ (СМПИВ). Метод универсален и позволяет по статистике наблюдений двумерного вектора фазовой скорости СМПИВ, полученных любым инструментом, оценивать зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра. Существует большое количество данных, из которых можно получить двумерный вектор фазовой скорости СМПИВ (в отличие от трехмерного), в том числе карты возмущений полного электронного содержания и снимки камер всего неба. Следовательно, данный метод может быть полезен при разработке и совершенствовании моделей нейтрального ветра.

Ключевые слова: ПИВ, среднемасштабные ПИВ, ВГВ, гипотеза ветровой фильтрации ВГВ, нейтральный ветер, внезапные стратосферные потепления.

Abstract. Using the representative statistics on traveling ionospheric disturbances (TIDs) obtained by Yekaterinburg and Magadan radars, we have shown that distributions of TIDs and average TID velocities by azimuths and local time agree well with the hypothesis on internal gravity wave (IGW) filtering by the neutral wind. We have examined the influence of significant winter sudden stratospheric warmings on IGW in the ionosphere. A method has been proposed for estimating zonal and meridional neutral wind velocities from MSTID parameters. The method is universal and allows us to estimate the zonal and meridional neutral wind velocities from the statistics on MSTID 2D phase velocity vector obtained by any tool. There is a large amount of data from which MSTID 2D phase velocity vector (as opposed to the 3D phase velocity vector) can be derived, including maps of TEC disturbances and all-sky camera images. This method may therefore be useful in developing and improving neutral wind models.

Keywords: TIDs, MSTIDs, IGWs, hypothesis on IGW filtering by the neutral wind, neutral wind, sudden stratospheric warmings.

ВВЕДЕНИЕ

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) вносят значительный вклад в общую циркуляцию атмосферы, формирование ее глобальной структуры и динамики [Fritts, Alexander, 2003; Alexander et al., 2008]. Ионосферными проявлениями ВГВ являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Именно эти возмущения используются для экспериментального исследования ВГВ на высотах термосферы. Однако различные неустойчивости ионосферной плазмы [Otsuka, 2021; Shiokawa et al., 2003, 2009;

Ivanov, Tolsytikov, 2003] также могут являться источником ПИВ, что усложняет анализ ВГВ по ионосферным данным. Одним из способов разделения наблюдаемых ПИВ на те, которые вызваны ВГВ, и на ПИВ другой физической природы является проверка измеренных параметров на соответствие дисперсионному соотношению, которое связывает волновой вектор и частоту ВГВ с известными параметрами среды распространения [Pedlosky, 2003, Hines, 1960]. Такой способ работает, когда проводятся измерения полного трехмерного вектора фазовой скорости ПИВ, что, в свою очередь, требует измерения высотных профилей электронной концентрации минимум в трех пространственно-разнесенных точках. Такие измерения проводились на многолучевых радарах некогерентного рассеяния и комплексах из нескольких радиофизических инструментов [Ma et al., 1998; Nicolls, Heinselman, 2007; Vadas, Nicolls, 2008; Nicolls et al., 2014; Van de Kamp et al., 2014; Vlasov et al., 2011]. В работе [Williams et al., 1982] для единичного измерения впервые была проведена проверка дисперсионного соотношения Хайнса. Исследование показало удовлетворительное соответствие уравнения Хайнса для ПИВ с периодом ~40 мин, но при этом поставило проблему, связанную с учетом нейтрального ветра. В работе [Vadas, Nicolls, 2008] предложен метод определения проекции скорости нейтрального ветра на направление распространения ПИВ в предположении выполнения дисперсионного соотношения. В работах [Medvedev et al., 2015, 2017, 2019] проведена проверка дисперсионного соотношения Хайнса на представительной статистике измерений полного вектора скорости ПИВ. В данных работах показано, что большинство экспериментальных данных хорошо согласуется с теоретическими представлениями о распространении ВГВ в верхней атмосфере, а также предложен метод получения меридионального и зонального нейтрального ветра из статистики измерений полного вектора скорости ПИВ. Параметры нейтрального ветра удовлетворительно согласуются как с данными модели HWM07-14 [Drob et al., 2008, 2015], так и с независимыми автокорреляционными измерениями Иркутского радара некогерентного рассеяния [Shcherbakov et al., 2015].

Ключевым понятием, используемым в данной работе, является так называемая гипотеза фильтрации ВГВ нейтральным ветром. Как эмпирический факт ветровая фильтрация заключается в том, что большая часть ПИВ наблюдается в случаях, когда направление распространения ПИВ близко к направлению, противоположному скорости фонового ветра [Kalikhman, 1980; Waldock, Jones 1984, 1986; Crowley et al., 1987]. С теоретической точки зрения гипотеза ветровой фильтрации состоит в том, что распространение ВГВ по ветру существенно уменьшает амплитуду волны из-за диссипации, тогда как распространение ВГВ против ветра увеличивает амплитуду волны. Данная гипотеза была подтверждена исследованиями с использованием численного моделирования [Pogoreltsev, Pertsev, 1996]. Важным уточнением гипотезы ветровой фильтрации является механизм ветровой фильтрации на критическом уровне [Negale et al., 2018]: ВГВ, распространяющиеся против ветра, имеют большую вертикальную длину волны и гораздо меньше подвержены влиянию молекулярной вязкости, чем ВГВ, распространяющиеся по ветру и имеющие меньшую вертикальную длину волны. В наших предыдущих исследованиях гипотеза ветровой фильтрации тестировалась с использованием данных различных инструментов [Medvedev et al., 2017; Tolstikov et al., 2019, 2020] и эмпирических моделей нейтрального ветра HWM07 и HWM14 [Drob et al., 2008, 2015]. Тестирование показало, что поведение большинства ПИВ соответствует гипотезе ветровой фильтрации, а исключения можно объяснить ошибками моделей нейтрального ветра либо случаями, когда наблюдаемые возмущения не были связаны с ВГВ. Не всегда имеется возможность измерять полный вектор фазовой скорости ПИВ. Опубликовано множество работ, в которых по данным различных инструментов оценивается только двумерный вектор фазовой скорости ПИВ [Afraimovich et al., 2000; Shiokawa et al., 2003, 2009; Huang et al., 2016; Yang et al., 2017; Lay et al., 2018; Syrenova et al., 2022]. В частности, в работах [Oinats et al., 2015, 2016a, b] по данным когерентных КВ-радаров, аналогичных входящим в сеть SuperDARN, представлено статистическое исследование среднемасштабных ПИВ (СМПИВ), основанное на измерениях горизонтального вектора скорости. При таких измерениях прямая проверка дисперсионного соотношения становится невозможной. Однако для косвенного разделения СМПИВ разной природы можно использовать эффект ветровой фильтрации, который должен проявляться только в случае распространения ВГВ.

Данная работа посвящена статистическому анализу данных, полученных Екатеринбургским радаром за 2012–2021 гг. и Магаданским радаром за 2021 г. В работе проведена проверка влияния значительных (major) стратосферных потеплений на СМПИВ в ионосфере и предложен метод оценки зональной и меридиональной скоростей нейтрального ветра по распределениям двумерных параметров СМПИВ. Метод универсален и позволяет по статистике наблюдений двумерного вектора фазовой скорости СМПИВ, полученных любым инструментом, оценивать зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра. Существует большое количество данных, из которых можно получить двумерный вектор фазовой скорости ВГВ (в отличие от трехмерного), в том числе карты возмущений полного электронного содержания [Huang et al., 2016;Yang et al., 2017; Lay et al., 2018] и снимки камер всего неба [Shiokawa et al., 2003, 2009; Syrenova et al., 2022]. Следовательно, данный метод может быть полезен при разработке и совершенствовании моделей нейтрального ветра в верхней термосфере.

СВЯЗЬ СТАТИСТИКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ВЕТРОМ

Работа основана на представительной статистике двумерных векторов фазовой скорости СМПИВ, полу-

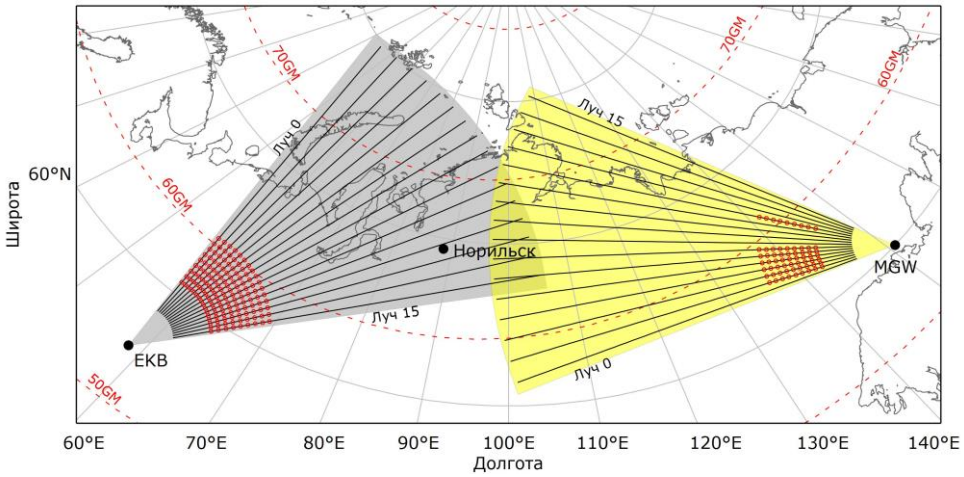

Рис. 1. Схема расположения КВ-радаров EKB и MGW и их секторов обзора

ченной по данным когерентных радаров в Екатеринбурге (EKB: 56.4° N, 58.5° E) и Магадане (MGW: 60.0° N, 150.7° E). Метод измерения двумерного вектора фазовой скорости СМПИВ основан на анализе КВ-сигнала, рассеянного шероховатостями земной поверхности в обратном направлении, и подробно описан в работах [Oinats et al., 2015, 2016a, b]. На рис. 1 приведена схема расположения КВ-радаров.

Черными линиями показаны направления зондирования (лучи радара), серым и желтым цветом — секторы обзора радаров EKB и MGW соответственно. Радар MGW в 2021 г. работал только на лучах 1–6 и 12, что также отмечено на рисунке. Область регистрации ПИВ находится примерно в окрестности уровня отражения односкачковой траектории КВ-радиоволны, т. е. расположена примерно в промежутке от 500 до 800 км от места расположения радара. Данная область на рис. 1 отмечена красными кружками. Для EKB центр области регистрации ПИВ ~61° N, 63° E, для MGW — ~62° N, 146° E. Временное разрешение радиолокационных систем составляет ~1 мин. Следует отметить, что в 2012 г. EKB-радар начал работать только в середине декабря, а в 2020 г. по техническим причинам не работал большую часть года.

Если основными источниками СМПИВ являются ВГВ, временная динамика азимутов СМПИВ в течение суток должна определяться нейтральным ветром. При распространении ВГВ по ветру сильно уменьшается их амплитуда за счет диссипации, в то время как при распространении против ветра амплитуда увеличивается [Pogoreltsev, Pertsev, 1996; Waldock, Jones 1984, 1986]. Следовательно, вероятность наблюдения увеличивается для СМПИВ, распространяющихся в направлении, противоположном нейтральному ветру на высоте наблюдения. Напротив, в направлении, совпадающем с сильным нейтральным ветром, вероятность наблюдения СМПИВ значительно уменьшается. Таким образом, максимумы в распределении азимутов СМПИВ по времени должны совпадать с направлениями, противоположными азимутам наиболее сильных и часто встречающихся в этот сезон и это время суток ветров.

На рис. 2 показаны распределения СМПИВ по азимутам, отсчитанным от географического севера по часовой стрелке, и местному времени с использованием данных радара EKB для различных сезонов 2012–2021 гг. На распределения наложены изолинии проекции скорости нейтрального ветра на данное азимутальное направление в данный момент времени. Скорости ветра рассчитаны по модели HWM14 для точки с координатами 61° N, 63° E (центр области регистрации ПИВ).

Относительная частота — отношение количества СМПИВ, наблюдавшихся в данных временном и азимутальном окнах, к общему количеству СМПИВ, наблюдавшихся в данном временном окне. При расчете распределений использовались окна ±5° по азимуту и ±1 ч по времени, шаг по азимуту — 1°, по времени — 15 мин. Скорость нейтрального ветра определялась из модели HWM14 как средневзвешенное значение по распределениям СМПИВ (скорости усреднялись с весом, соответствующим относительной частоте наблюдения СМПИВ на данной высоте в данное время). Для каждого события СМПИВ оценивалась высота, на которой проводилось измерение с использованием модели траекторных характеристик КВ-сигнала, рассеянного земной поверхностью, для радара EKB [Oinats et al., 2016b]. На высоте наблюдения СМПИВ рассчитывались меридиональная и зональная компоненты скорости нейтрального ветра по модели HWM14. Далее полученный массив компонент ветра разделялся по сезонам года, и для каждого сезона рассчитывалось среднее значение компонент для каждого локального времени в соответствии с формулой

$$\bar{U}(LT) = \frac{\sum U_i}{N}, \quad \bar{V}(LT) = \frac{\sum V_i}{N}, \tag{1}$$

где N — общее количество зарегистрированных СМПИВ за данный период локального времени; U_i, V_i — зональная и меридиональные компоненты скорости ветра соответственно. Суммирование проводится по всем значениям, попавшим в данный сезон и данный период локального времени. Полученные значения использовались для расчета проекции нейтрального ветра на каждое азимутальное направление. Из рис. 2 видно, что бóльшая часть возмущений (~64 %) лежит в области отрицательных проек-

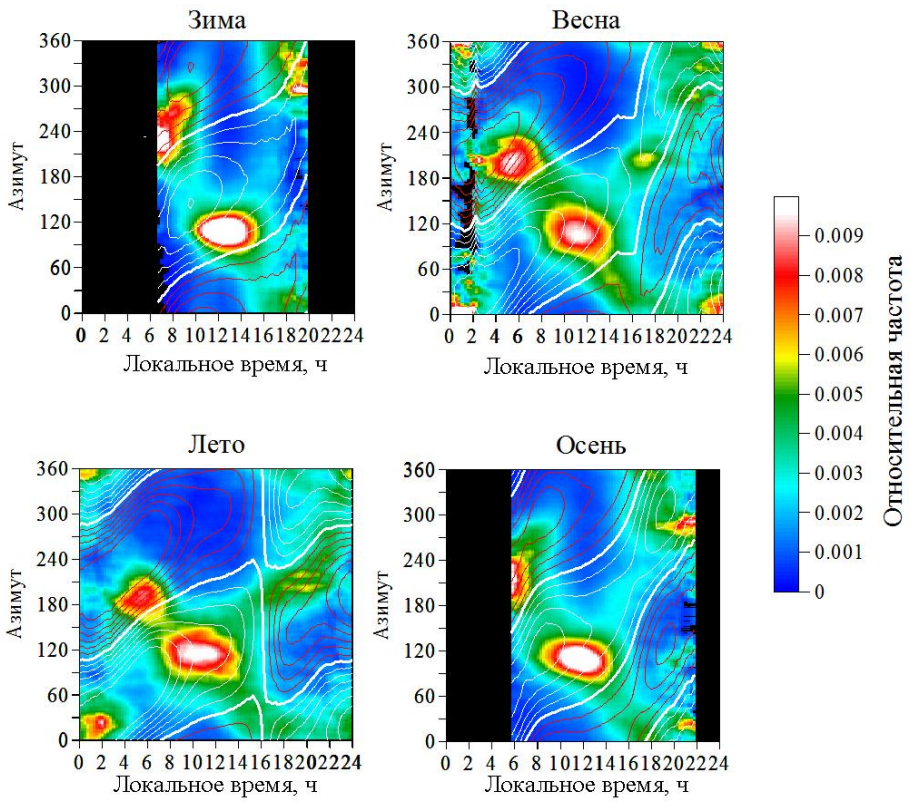

Рис. 2. Распределения СМПИВ по азимутам и локальному времени с использованием данных радара EKB для различных сезонов 2012–2021 гг. согласно цветовой шкале. Белые изолинии показывают отрицательные проекции скорости нейтрального ветра на данное азимутальное направление в данный момент времени, жирная белая линия — нулевая проекция, красные изолинии соответствуют положительным проекциям, шаг изолиний 20 м/с. Скорости ветра рассчитаны по модели HWM14

ций нейтрального ветра, как и ожидалось. Однако во все сезоны в ~2–8 ч (с азимутами ~240° в зимний сезон, ~210° в весенний сезон, ~180° в летний сезон и ~210° в осенний сезон) имеется локальный максимум относительной частоты в области положительной проекции скорости нейтрального ветра. Кроме того, имеются локальные максимумы в области положительной проекции скорости нейтрального ветра: ~16–20 ч с азимутами ~0° в зимний сезон, ~16–20 ч с азимутами ~210° в летний сезон и ~18–22 ч с азимутами ~120° в осенний сезон. Причиной этого могут быть как СМПИВ, не соответствующие ВГВ (например, различные неустойчивости [Перевалова, Ойнац, 2020; Ivanov, Tolstikov, 2003]), так и особенности поведения ветра в данной области, не описываемые моделью. Попробуем определить, с чем мы имеем дело в данном случае. Рассчитаем для каждого времени и азимута среднюю горизонтальную фазовую скорость СМПИВ. Скорость возмущений любой физической природы будет увеличиваться при распространении по ветру и уменьшаться при распространении против ветра. Следовательно, максимумы средней горизонтальной скорости СМПИВ соответствуют распространению СМПИВ по ветру, а минимумы — против ветра. Таким образом, если спорные локальные максимумы будут соответствовать максимумам средней горизонтальной скорости СМПИВ, можно будет утверждать, что данные СМПИВ распространяются по ветру и, следовательно, в данном случае мы имеем дело с СМПИВ, не являющимися проявлениями ВГВ. Если спорные локальные максимумы будут соответствовать минимумам средней горизонтальной скорости СМПИВ, можно будет утверждать, что данные СМПИВ распространяются против ветра и, следовательно, в данном случае мы имеем дело с особенностью поведения ветра, не описываемой моделью HWM14. Кроме того, если основными источниками СМПИВ являются ВГВ, все локальные должны соответствовать минимумам в средней горизонтальной скорости СМПИВ.

На рис. 3 показаны распределения средней горизонтальной скорости СМПИВ по азимутам и местному времени с использованием данных радара EKB. Для каждого азимута и локального времени усреднение проведено по всем дням сезона и по всем годам наблюдений. На распределения наложены изолинии, соответствующие относительной частоте наблюдения СМПИВ (цветная часть рис. 2).

Во-первых, видно, что локальные максимумы хорошо соответствуют минимумам средней горизонтальной скорости СМПИВ и, следовательно, можно утверждать, что основными источниками СМПИВ являются ВГВ. Во-вторых, спорные локальные максимумы (~2–8 ч с азимутами ~240° и ~16–20 ч с азимутами ~0° в зимний сезон, ~2–8 ч с азимутами ~210° в весенний сезон, ~2–8 ч с азимутами ~180° и ~16–20 ч с азимутами ~210° в летний сезон и ~2–8 ч

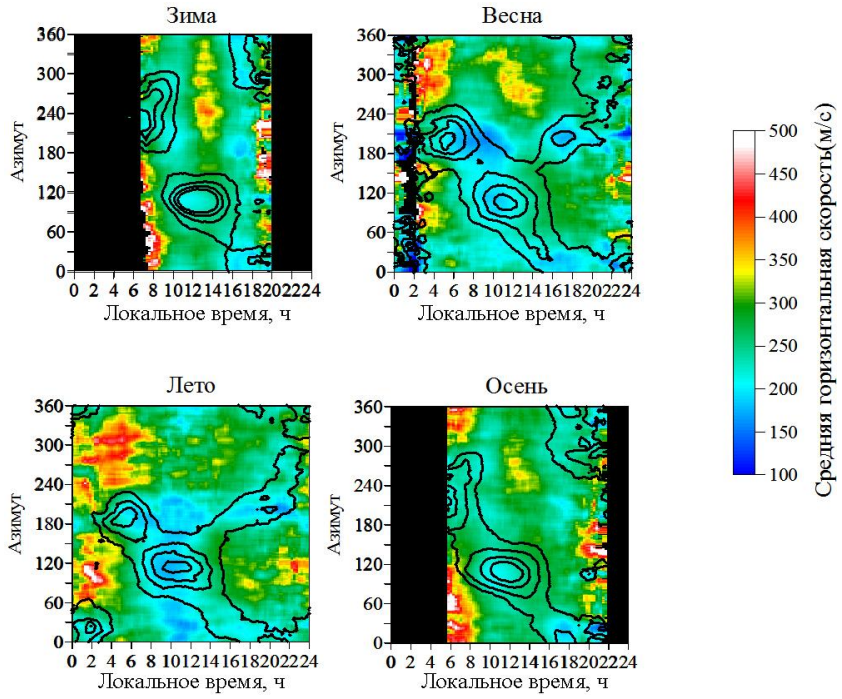

Рис. 3. Распределения средней горизонтальной скорости СМПИВ по азимутам и локальному времени с использованием данных радара EKB. На распределения наложены изолинии, соответствующие относительной частоте наблюдения СМПИВ. Изолинии проведены на уровнях 0.003, 0.005, 0.007 и 0.009 относительной частоты наблюдения СМПИВ

с азимутами ~210° и ~18–22 ч с азимутами ~120° в осенний сезон), лежащие, согласно HWM14, в области положительной проекции нейтрального ветра, также соответствуют минимумам средней горизонтальной скорости СМПИВ. Следовательно, можно утверждать, что данные СМПИВ распространяются против ветра, и в данном случае мы, вполне вероятно, имеем дело с особенностью поведения ветра, не описываемой моделью HWM14.

Данные радара MGW были обработаны по той же методике, что и данные радара EKB. Скорости ветра рассчитывались по модели HWM14 для точки с координатами 62° N, 146° E (центр области регистрации СМПИВ). Результаты обработки показаны на рис. 4, 5.

Видно, что большинство возмущений лежит в области отрицательных проекций нейтрального ветра, однако имеются сезонные особенности. В зимний сезон в области отрицательных проекций нейтрального ветра лежит более 82 % возмущений, в весенний сезон — ~56 %, в летний сезон — ~55 %, в осенний сезон — ~71 %. В области положительной проекции нейтрального ветра согласно HWM14 имеются следующие спорные локальные максимумы: ~0–4 ч с азимутами ~270° и ~16–20 ч с азимутами ~120° в весенний сезон, ~4–8 ч с азимутами ~210° и ~16–21 ч с азимутами ~120° в летний сезон, ~6–8 ч с азимутами ~210° и ~22–24 ч с азимутами ~180° в осенний сезон. Воспользуемся информацией о горизонтальной скорости СМПИВ, чтобы понять, имеем мы в данном случае дело с СМПИВ, не соответствующими ВГВ, или с особенностями поведения ветра, не описываемыми HWM14.

Видно, что локальные максимумы, в том числе и спорные (~0–4 ч с азимутами ~270° и ~16–20 ч с азимутами ~120° в весенний сезон, ~4–8 ч с азимутами ~210° и ~16–21 ч с азимутами ~120° в летний сезон, ~6–8 ч с азимутами ~210° и ~22–24 ч с азимутами ~180° в осенний сезон), хорошо соответствуют минимумам средней горизонтальной скорости СМПИВ. Следовательно, можно утверждать, что, во-первых, основными источниками СМПИВ являются ВГВ, во-вторых, спорные максимумы, вероятно, объясняются особенностью поведения ветра, не описываемой моделью HWM14.

Таким образом, можно заключить, что в распределениях параметров СМПИВ содержится информация о нейтральном ветре. Проверим это еще на одном примере. Во время значительных (major) внезапных стратосферных потеплений (ВСП) можно ожидать существенных изменений нейтрального ветра. Поскольку в модели HWM14 влияние ВСП не учитывается, можно предположить, что во время ВСП будет наблюдаться наибольшее отличие модели от реальности, т. е. наибольшее количество СМПИВ, лежащих в области положительной проекции ветра определенного по HWM14.

СВЯЗЬ СТАТИСТИКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ВНЕЗАПНЫМИ СТРАТОСФЕРНЫМИ ПОТЕПЛЕНИЯМИ

Согласно определению Всемирной метеорологической организации, ВСП можно классифицировать как значительное (major), когда в зимний период средний зональный ветер на широте 60° N и высотном уровне 10 гПа(~32 км) изменяет свое направление

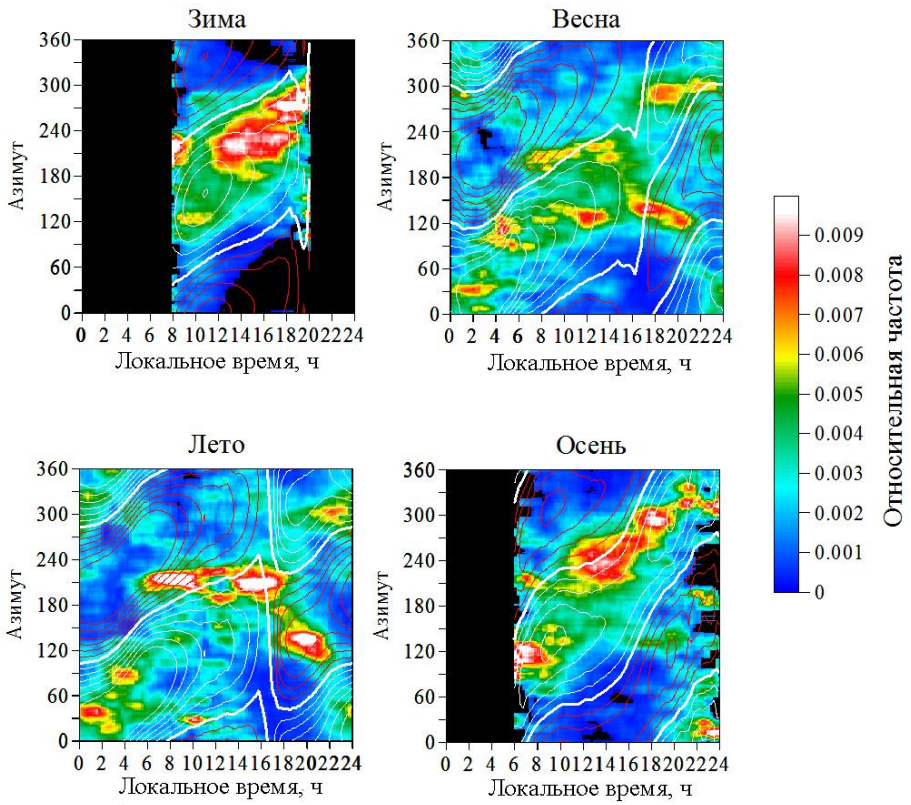

Рис. 4. Распределения СМПИВ по азимутам и локальному времени с использованием данных радара MGW для различных сезонов 2021 г. согласно цветовой шкале. Белые изолинии показывают отрицательные проекции скорости нейтрального ветра на данное азимутальное направление в данный момент времени, жирная белая линия — нулевая проекция, красные изолинии соответствуют положительным проекциям, шаг изолиний 20 м/с. Скорости ветра рассчитаны по модели HWM14

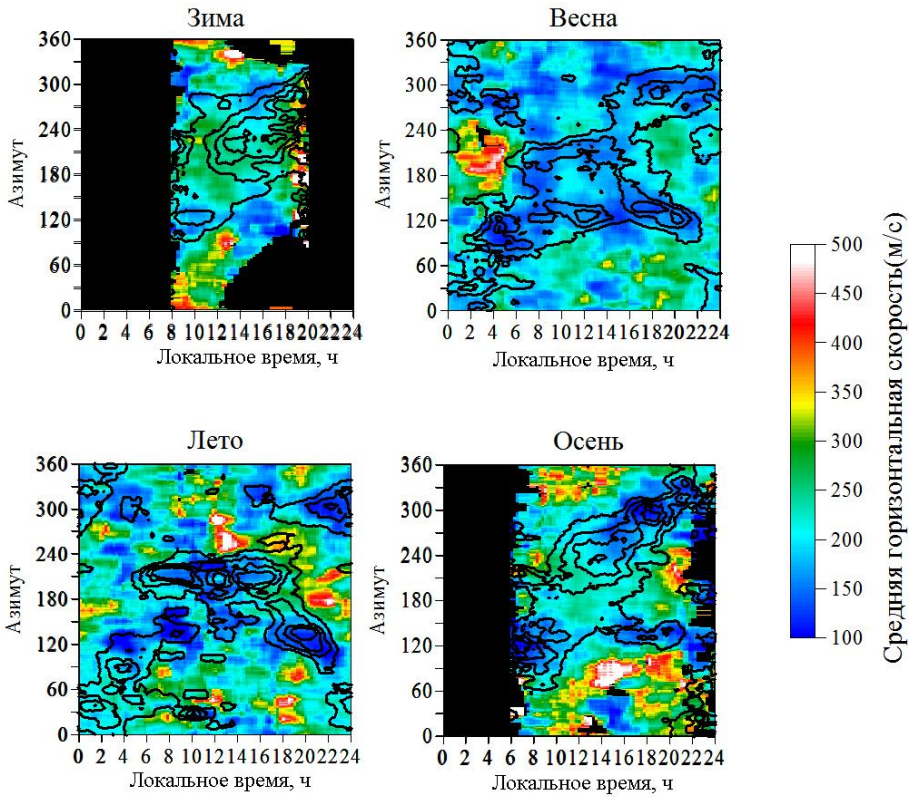

Рис. 5. Распределения средней горизонтальной скорости СМПИВ по азимутам и локальному времени с использованием данных радара MGW. На распределения наложены изолинии, соответствующие относительной частоте наблюдения СМПИВ. Изолинии проведены на уровнях 0.003, 0.005, 0.007 и 0.009 относительной частоты наблюдения СМПИВ

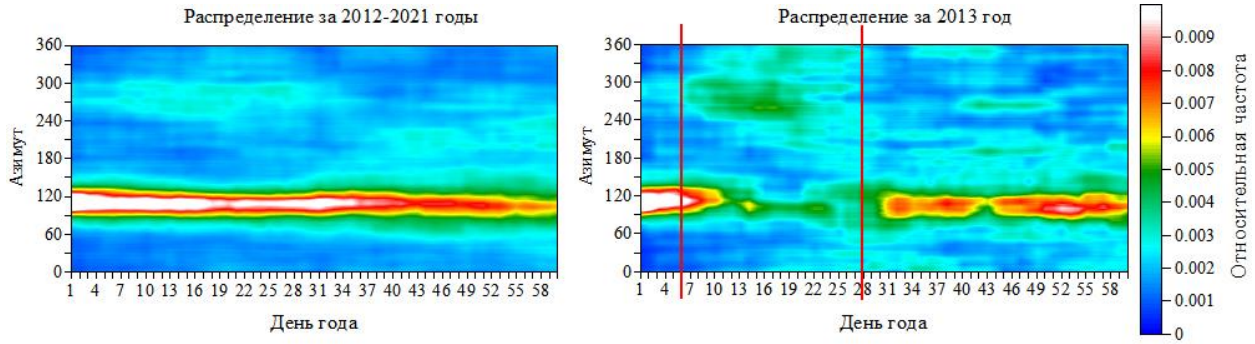

Рис. 6. Распределения относительной частоты наблюдения СМПИВ на КВ-радаре ЕКВ по дням года и азимутам: усредненное за 2012–2021 гг. (слева) и для 2013 г. (справа). Вертикальные красные линии отмечают даты смены направления зональной стратосферной циркуляции на 60° N на высотном уровне 10 гПа

с западного на восточное и зональный градиент температуры стратосферы на уровне 10 гПа между 60° N и 90° N становится положительным [Labitzke, Naujokat, 2000]. В работе [Tolstikov et al., 2019] изучалось влияние значительных ВСП на СМПИВ в ионосфере по данным радара Хоккайдо. Было показано, что во время таких событий наблюдаются существенные изменения анизотропии частоты наблюдения СМПИВ в зависимости от направления распространения. До потепления наблюдается характерное распределение азимутов СМПИВ с ярко выраженным максимумом на ~120° (следует отметить, что это типичное распределение для зимнего сезона в Хоккайдо), во время потеплений появляются дополнительные максимумы и после потеплений распределение возвращается к первоначальной форме.

Рассмотрим влияние значительных ВСП на возмущение в ионосфере по данным радара ЕКВ. На рис. 6 показаны распределения СМПИВ по дням года и азимутам: усредненное за 2012–2021 гг. и для 2013 г., когда в январе имело место значительное ВСП.

Относительная частота рассчитывалась так же, как и в предыдущих случаях, но использовалось окно ±5° по азимуту и ±5 дней по дням года; шаг по азимуту равен 1°, по дням года — один день. Анализ вариаций скорости среднезонального нейтрального ветра над Северным полушарием был проведен по данным реанализа MERRA (Modern ERA-Ret-rospective Analysis for Research and Applications) [Gelaro et al., 2017]. Вертикальные красные линии соответствуют изменению направления зональной циркуляции атмосферы на 60° N, 10 гПа. Видно, что в зимнее время доминирующее направление распространения СМПИВ имеет азимут ~110°. Следует отметить, что радар работает на постоянной частоте ~11 МГц. В ночное время зимой электронная плотность F2-области ионосферы на средних широтах становится настолько мала, что КВ-сигнал такой частоты не отражается от ионосферы. По этой причине в ночное время зимой измерения параметров СМПИВ на КВ-радаре невозможны [Oinats et al., 2015, 2016a], а азимут ~110°, видимый на рисунке, соответствует доминирующему направлению распространения возмущений в дневное время суток. Сравнивая левую и правую панели, можно видеть, что во время потепления распределение азимутов «разваливается», появляются дополнительные локальные максимумы, а после потепления распределение возвращается к первоначальной форме. Подобный эффект наблюдался также и по данным КВ-радара Хоккайдо [Tolstikov et al., 2019].

Следуя [Tolstikov et al., 2019], оценим возмущение распределения азимутов СМПИВ и возмущение скорости зональной циркуляции. Определим средние годовые вариации зональной циркуляции за большой промежуток времени и будем считать возмущениями годовых вариаций абсолютное значение разности между вариациями за конкретный год и средними вариациями. На рис. 7 показана среднезональная скорость нейтрального ветра на широте 60° N и высотном уровне 10 гПа по данным реанализа MERRA. Красная толстая линия — средняя скорость, рассчитанная для периода с 2003 по 2021 г., цветные линии — скорости для отдельных лет. Хорошо видно, что вариации среднезональной скорости могут существенно отличаться год от года особенно в осенний, зимний и весенний сезоны.

Аналогичным образом рассчитаем вариации в распределениях азимута СМПИВ. Определим средние годовые распределения азимута СМПИВ *AvDist* для каждого дня и будем рассчитывать возмущение распределения азимута СМПИВ для *i*-го дня *j*-го года по формуле

$$AzmVar = \sqrt{\frac{1}{360}\sum_{\phi}^{359}\left(Dist(i,\ j,\ \phi) - AvDist(i,\ \phi)\right)^2}. \quad (2)$$

Здесь $Dist(i, j, \phi)$ — относительная частота СМПИВ с азимутом для *i*-го дня *j*-го года; $AvDist(i, \phi)$ — средняя относительная частота для азимута ϕ для *i*-го дня. На рис. 8 для сравнения показаны возмущения среднезонального ветра для периода ВСП 2013 г. и возмущение в распределениях азимута СМПИВ, рассчитанное по формуле (2).

Видно, что возмущения среднезонального ветра хорошо коррелируют с возмущением распределения азимутов СМПИВ (коэффициент корреляции ~0.825), что позволяет утверждать об имеющемся влиянии возмущений в нижней атмосфере на ионосферные возмущения. В работе [Tolstikov et al., 2019] предложен следующий механизм этого влияния: планетарные волны (необязательно те, которые связаны с реверсом полярного вихря) приводят

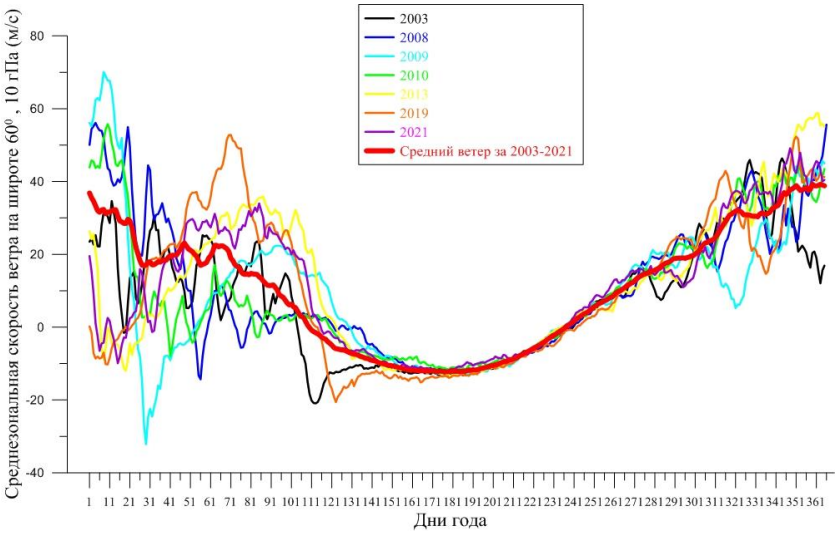

Рис. 7. Вариации среднезональной скорости ветра на широте 60° N и высотном уровне 10 гПа

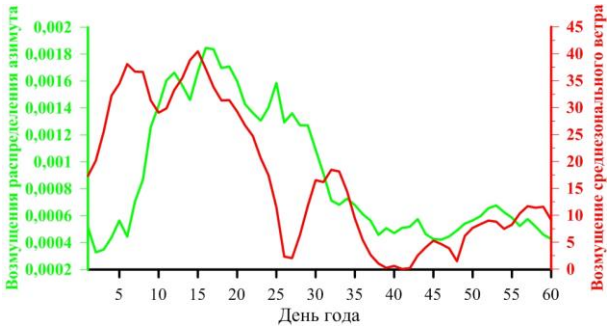

Рис. 8. Сравнение возмущений ветра (красная линия) с возмущениями азимута СМПИВ (зеленая линия)

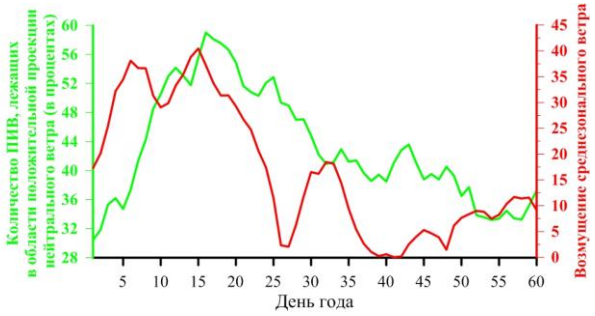

Рис. 9. Сравнение возмущений среднезонального ветра (красная линия) с количеством ПИВ (в процентах), лежащих в области положительной проекции нейтрального ветра по модели HWM14 (зеленая линия)

к изменениям нейтрального ветра в области мезопаузы, что приводит к изменению запрещаемых нейтральным ветром направлений распространения ВГВ. Поскольку в модели HWM14 ВСП не учитываются, наибольших отличий модели от наблюдений можно ожидать во время ВСП. На рис. 9 показаны возмущения среднезонального ветра (красная линия) и количество в процентах СМПИВ, распространяющихся по нейтральному ветру, из модели HWM14 (зеленая линия).

Видно, что в период ВСП 2013 г. действительно наблюдается наибольшее количество «неправильных» СМПИВ, т. е. лежащих в области положительных проекций нейтрального ветра. Коэффициент корреляции кривых составляет ~0.85.

МЕТОД ОЦЕНКИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ СМПИВ

Выше мы показали, что в распределениях параметров СМПИВ содержится информация о нейтральном ветре. В работе [Tolstikov et al., 2020] предложен метод оценки азимута нейтрального ветра по распределению относительной частоты наблюдения азимутов СМПИВ. Идея метода состоит в нахождении максимума оптимизируемой функции, зависящей от азимута горизонтального нейтрального ветра. Для каждого момента времени перебираются всевозможные направления (0°–359°) и подсчитывается, какое количество СМПИВ лежит в области отрицательной проекции нейтрального ветра, и какое — в области положительной. Оптимизируемая функция будет выглядеть следующим образом:

$$I(\alpha) = -\sum_{\phi=0}^{\phi=359} N(t,\phi)\cos(\widehat{\alpha\phi}) \to \max, \qquad (3)$$

где $N(t, \phi)$ — относительная частота наблюдения СМПИВ, распространяющихся в момент времени t с азимутом ϕ, а $\widehat{\alpha\phi}$ — угол между направлением распространения СМПИВ и скоростью ветра. Угол α, обеспечивающий максимум функции I, будем считать азимутом нейтрального ветра. Возникает вопрос, можно ли по измерениям двумерного вектора фазовой скорости СМПИВ в предположении, что они являются проявлением ВГВ, определить зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра? В случае измерений полного вектора скорости ВГВ с помощью дисперсионного соотношения для ВГВ можно определить внутреннюю частоту,

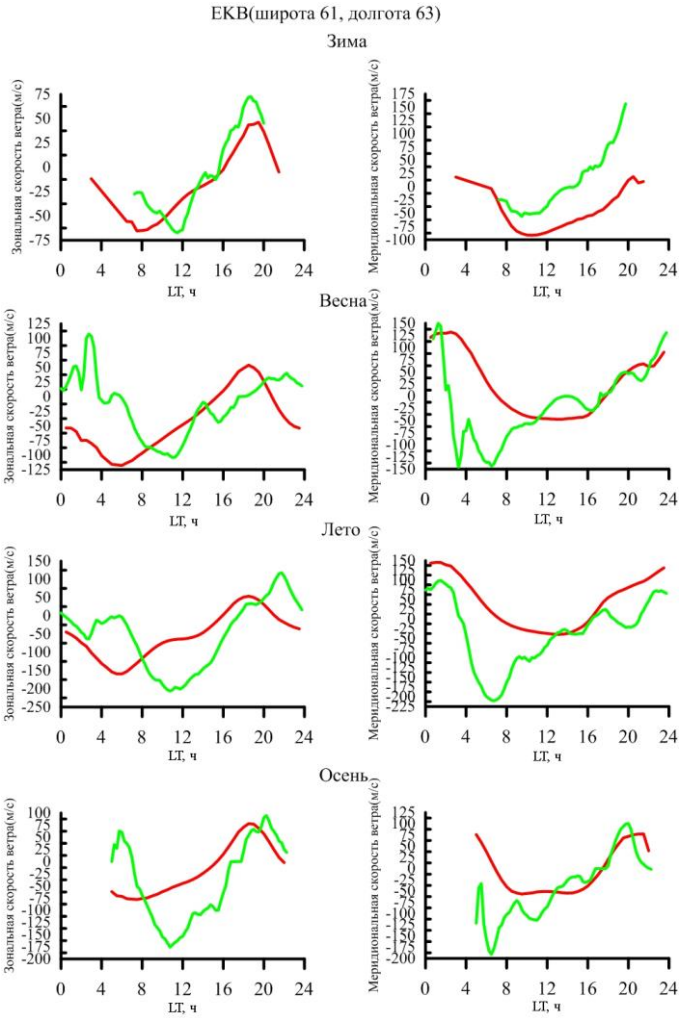

Рис. 10. Расчеты зональной (слева) и меридиональной (справа) компонент скорости нейтрального ветра для радара EKB: красная линия —HWM14, зеленая — расчеты

а затем — проекцию скорости ветра на направление распространения ВГВ:

$$U_{\text{р}} = (f - f')L_{\text{Н}}. \quad (4)$$

Здесь $L_{\text{Н}}$ — горизонтальная длина волны ВГВ. При наличии представительной статистики наблюдений можно определять зональную U_x и меридиональную U_y скорости ветра из функционала

$$\sum (U_x \sin\phi + U_y \cos\phi - U_p)^2 \to \min. \quad (5)$$

Подробно эта методика описана в работах [Medvedev et al., 2015, 2017]. Если же азимут нейтрального ветра известен (например, из (3)), то с использованием дисперсионного соотношения Буссинеска [Pedlosky, 2003] можно получить выражение

$$\sum \left(L_{\text{Н}_i} - \frac{U\cos(\alpha_i) + L_i f_{\text{В}}}{f_i} \right)^2 \to \min. \quad (6)$$

Здесь L — полная длина волны ВГВ; U — модуль скорости ветра; f — частота ВГВ; $f_{\text{В}}$ — частота Брента; α — угол между направлениями нейтрального ветром и направлением распространения ВГВ. В случае измерений двумерного вектора фазовой скорости ВГВ нам известны все параметры, входящие в (6), кроме полной длины волны ВГВ.

Автоматические методы обработки данных одновременных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния и Иркутском ионозонде DPS-4 позволили получить представительную статистику трехмерных параметров распространения ПИВ в ионосфере [Medvedev et al., 2013, 2015]. Если предположить, что статистика параметров ПИВ на средних широтах не сильно зависит от долготы, можно воспользоваться медианной длиной волны из иркутских данных. Для зимы, весны и осени медианная длина волны составляет ~260 км, для лета ~300 км. Определив азимут нейтрального ветра из (3) и модуль скорости из (6), можно получить зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра. Поскольку использовались очень существенные допущения, данную методику можно назвать только оценкой нейтрального ветра, а не измерением. Тем не менее, она может быть весьма полезной, так как существует мало способов круглосуточного измерения нейтрального ветра на высотах термосферы. На рис. 10 показаны результаты оценки зональной (слева) и меридиональной (справа) скорости нейтрального ветра в зависимости от локального времени для четырех

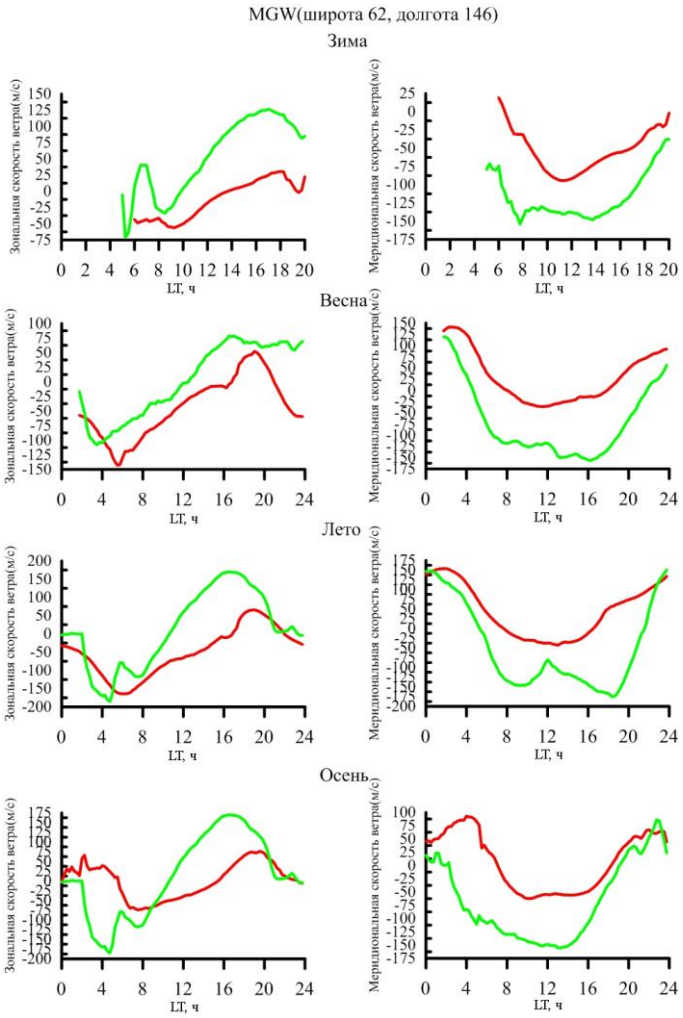

Рис. 11. То же, что на рис. 10, для радара MGW

сезонов года по наблюдениям СМПИВ на радаре ЕКВ (зеленая линия). Для сравнения приведены соответствующие расчеты, выполненные по модели HWM14 (красная линия) для высоты наблюдения соответствующих СМПИВ.

На рис. 11 приведены аналогичные результаты по данным радара MGW.

Из рис. 10, 11 видно, что параметры нейтрального ветра удовлетворительно согласуются с данными моделей HWM14. Разница с моделями может объясняться перемещающимися ионосферными возмущениями, не связанными с ВГВ, или особенностями ветра, не описываемыми HWM. Предложенный метод универсален и позволяет по статистике наблюдений двумерного вектора фазовой скорости ВГВ, полученных любым инструментом, оценивать зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра.

ВЫВОДЫ

Анализ связи статистики перемещающихся ионосферных возмущений с нейтральным ветром и возмущениями в стратосфере позволил получить следующие результаты.

Сопоставление распределений относительной частоты наблюдения СМПИВ и средних скоростей СМПИВ по азимутам и локальному времени с распределениями скоростей ветра на высотах наблюдения СМПИВ, рассчитанных по модели HWM14, показало, что большинство СМПИВ соответствует гипотезе фильтрации ВГВ нейтральным ветром. Таким образом, можно утверждать, что основными источниками СМПИВ являются ВГВ из нижележащей атмосферы с возможным вкладом ВГВ, рожденных в средней атмосфере, не испытавших фильтрацию нижележащих слоев атмосферы.

Во время значительных стратосферных возмущений существенно изменяется азимутальное распределение СМПИВ. Отклонение от среднего распределения хорошо коррелирует с возмущениями среднезональной скорости ветра на широте 60° и высотном уровне 10 гПа. Отклонение от среднего распределения, по-видимому, связаны с изменением нейтрального ветра на высотах верхней термосферы.

Впервые предложен метод оценки нейтрального ветра по статистике наблюдений двумерных векторов фазовой скорости СМПИВ. Метод основан на предположении, что основными источниками СМПИВ являются ВГВ из нижележащей атмосферы. Проведено тестирование метода на данных российских КВ-радаров ЕКВ и MGW. Оцениваемые параметры

нейтрального ветра удовлетворительно согласуются с данными модели HWM14, а имеющиеся различия могут объясняться присутствием СМПИВ, не связанными с ВГВ, или особенностями ветра, не описываемыми моделью. Следует отметить, что поскольку использовались очень существенные допущения (возможность воспользоваться медианной длиной волны и тем, что статистика параметров ПИВ на средних широтах не сильно зависит от долготы), данный метод можно назвать только оценкой нейтрального ветра, а не измерением. Тем не менее, данный метод может быть весьма полезным, так как позволяет оценивать зональную и меридиональную скорости нейтрального ветра по измерениям горизонтального вектора фазовой скорости ВГВ, которые более распространены, чем измерения полного вектора. В частности, существуют методы оценки горизонтальных параметров СМПИВ по данным камер всего неба и картам возмущений полного электронного содержания. Таким образом, предложенный метод может быть полезен при разработке и совершенствовании моделей нейтрального ветра.

Комплексное исследование проявления волновой активности с периодами ВГВ в различных областях атмосферы позволило оценить влияние волновой активности в стратосфере и планетарных волн на волновую активность на ионосферных высотах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212 и при финансовой поддержке Минобрнауки России в части проведения наблюдений и обработки данных. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [http://ckp-rf.ru/ckp/3056] и Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [http://ckp-rf.ru/usu/77733].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Перевалова Н.П., Ойнац А.В. *Морфология ночных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений в среднеширотной области F (обзор современных представлений)*. Иркутск, изд-во ИГУ, 2020. 83 с.

Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., et al. Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2000. Vol. 62, iss. 7. P. 553–565. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00011-0.

Alexander M.J., Gille J., Cavanaugh C., et al. Global estimates of gravity wave momentum flux from High Resolution Dynamics Limb Sounder observations. *J. Geophys. Res*. 2008. Vol. 113, no. D15. P. 1–11. DOI: 10.1029/2007jd008807.

Crowley G., Jones T.B., Dudeney J.R. Comparison of short period TID morphologies in Antarctica during geomagnetically quiet and active intervals. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1987, Vol. 49. P. 1155–1162.

Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G., et al. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07. *J. Geophys. Res*. 2008. Vol. 113, iss. A12, CiteID A12304. DOI: 10.1029/2008JA013668.

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. *Earth and Space Sci*. 2015. Vol. 2. P. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys*. 2003. Vol. 41. P. 1003–1066, DOI: 10.1029/2001RG000106.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*. 2017. Vol. 30, no. 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Hines C.O. Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys*. 1960. Vol. 38. P. 1441–1481.

Huang F., Dou X., Lei J., et al. Statistical analysis of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using airglow images and GPS observations over central China. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2016. Vol. 121, no. 9. P. 8887–8899. DOI: 10.1002/2016JA022760.

Ivanov V.B., Tolstikov M.V. Instability of the state of the night-time topside ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2003. Vol. 65, iss. 6. P. 673–676. DOI: 10.1016/S1364-6826(03)00080-4.

Kalikhman A.D. Medium-scale traveling ionospheric disturbances and thermospheric winds in the F-region. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 1980. Vol. 42. P. 697–703.

Labitzke K., Naujokat B. The lower Arctic stratosphere in winter since 1952. *SPARC Newslett*. 2000. Vol. 15. P. 11–14.

Lay E.H., Parker P.A., Light M., et al. Midlatitude ionospheric irregularity spectral density as determined by ground-based GPS receiver networks. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2018. Vol. 123, no. 6. P. 5055–5067, DOI: 10.1029/2018JA025364.

Ma S.Y., Schlegel K., Xu J.S. Case studies of the propagation characteristics of auroral TIDs with EISCATCP2 data using maximum entropy cross-spectral analysis. *Ann. Geophys*. 1998. Vol. 16, iss. 2. P. 161–167. DOI: 10.1007/S00585-998-0161-3.

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. 105-106. P. 350–357. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.09.001.

Medvedev A.V. Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2015. Vol. 132. P. 13–21. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.06.012.

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2017. Vol. 122. P. 7567–7580. DOI: 10.1002/2017JA024103.

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Method for determining neutral wind velocity vectors using measurements of internal gravity wave group and phase velocities. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, no. 9. P. 546. DOI: 10.3390/atmos10090546.

Negale M.R., Taylor M.J., Nicolls M.J., et al. Seasonal propagation characteristics of MSTIDs observed at high latitudes over Central Alaska using the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2018. Vol. 123. P. 5717–5737. DOI: 10.1029/2017JA024876.

Nicolls M.J., Heinselman C.J. Three-dimensional measurements of traveling ionospheric disturbances with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *Geophys. Res. Lett*. 2007. Vol. 34. P. L21104. DOI: 10.1029/2007GL031506.

Nicolls M.J., Vadas S.L., Aponte N., Sulzer M.P. Horizontal parameters of daytime thermospheric gravity waves and E region neutral winds over Puerto Rico. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2014, vol. 119, pp. 575–600, DOI: 10.1002/2013JA018988.

Oinats A.V., Kurkin V.I., Nishitani N. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances using SuperDARN Hokkaido ground backscatter data for 2011. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67. Article id. 22. 9 p. DOI: 10.1186/s40623-015-0192-4.

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., et al. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. *Earth, Planets and Space*. 2016a. Vol. 68. Article id. 8. 13 p. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8.

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behavior of the Hokkaido East ground backscatter: simulation and observation. *Earth, Planets and Space*. 2016b. Vol. 68. Article id. 18. 12 p. DOI: 10.1186/s40623-015-0378-9.

Otsuka Y. Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances. *Geophys. Monograph Ser. Ionosphere Dynamics and Applications.* 2021. P. 421–437. DOI: 10.1002/9781119815617.ch18.

Pedlosky J. *Waves in the Ocean and Atmosphere: Introduction to Wave Dynamics*. Springer, USA, 2003. 260 p.

Pogoreltsev A.I., Pertsev N.N. The influence of background wind on the formation of the acoustic-gravity wave structure in the thermosphere. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Phys*. 1996. Vol. 132, no. 6. P. 723–728.

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2015. Vol. 120. P. 10851–10863. DOI: 10.1002/2015JA021678.

Shiokawa K., Ihara C., Otsuka Y., Ogawa T. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. *J. Geophys. Res*. 2003. Vol. 108, iss. A1. CiteID 1052. DOI: 10.1029/2002JA009491.

Shiokawa K., Otsuka Y., Ogawa T. Propagation characteristics of nighttime mesospheric and thermospheric waves observed by optical mesosphere thermosphere imagers at middle and low latitudes. *Earth, Planets and Space*. 2009. Vol. 61. P. 479–491. DOI: 10.1186/BF03353165.

Syrenova T.E, Beletsky A.B, Ratovsky K.G., et al. Morphology of traveling wave disturbances recorded in Eastern Siberia in 630 nm atomic oxygen emission. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, iss. 2. P. 198. DOI: 10.3390/atmos13020198.

Tolstikov M.V., Oinats A.V., Medvedeva I.V., et al. Relation of traveling ionospheric disturbances characteristics with planetary waves in the middle atmosphere. *Proc. PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium 2019.* Spring (PIERS-Spring), Rome, Italy, 2019. P. 2176–2182. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017884.

Tolstikov M.V., Oinats A.V., Medvedeva I.V., Nishitani N. Method for estimating neutral wind azimuth using 2D TID propagation parameters. *Proc. 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*.Rome, Italy, 2020. P. 1–4. DOI: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232189.

Vadas S.L., Nicolls M.J. Using PFISR measurements and gravity wave dissipative theory to determine the neutral, background thermospheric winds. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35, iss. 2. CiteID L02105. DOI: 10.1029/2007GL031522.

Van de Kamp M., Pokhotelov D., Kauristie K. TID characterized using joint effort of incoherent scatter radar and GPS. *Ann. Geophys*. 2014. Vol. 32. P. 1511–1532. DOI: 10.5194/angeo-32-1511-2014.

Vlasov A., Kauristie K., Van de Kamp M., et al. A study of traveling ionospheric disturbances and atmospheric gravity waves using EISCAT Svalbard Radar IPY-data. *Ann. Geophys*. 2011. Vol. 29. P. 2101–2116. DOI: 10.5194/angeo-29-2101-2011.

Waldock J.A., Jones T.B. The effects of neutral winds on the propagation of medium-scale atmospheric gravity waves at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1984. Vol. 46. P. 217–231. DOI: 10.1016/0021-9169(84)90149-1.

Waldock J.A., Jones T.B. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1986. Vol. 48. P. 245–260. DOI: 10.1016/0021-9169(86)90099-1.

Williams P.J.S., Van Eyken A.P., Bertin F. A test of the Hines dispersion equation for atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 1982. Vol. 44, iss. 7. P. 573–576. DOI: 10.1016/0021-9169(82)90067-8.

Yang H., Monte-Moreno E., Hernández-Pajares M. Multi-TID detection and characterization in a dense global navi tion satellite system receiver network. *J. Geophys. Res.: Sp Phys*. 2017. Vol. 122, no. 9. P. 9554–9575. DOI: 10.1002/2017JA023988.

URL: http://ckp-rf.ru/ckp/3056 (дата обращения 28 июля 2022 г.).

URL: http://ckp-rf.ru/usu/77733 (дата обращения 28 июля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Толстиков М.В., Ойнац А.В., Артамонов М.Ф., Медведева И.В., Ратовский К.Г. Статистическая связь перемещающихся ионосферных возмущений с нейтральным ветром и возмущениями в стратосфере. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 83–94. DOI: 10.12737/szf-84202208.