

УДК: 551.510.535

DOI: 10.26907/rwp29.2025.205-208

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИСЗФ СО РАН

М.В. Толстикова, К.Г. Ратовский, А.В. Медведев

Институт Солнечно-Земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

E-mail: maxim@iszf.irk.ru

Аннотация. В 2022 году с 31 января по 6 февраля измерения на радаре некогерентного рассеяния и ионозонде проводились с 5 минутным шагом. Полученные данные были обработаны с помощью ранее разработанных методов и были получены следующие результаты. Возмущения с периодами менее 30 минут составляют ~ 25% от общего числа возмущений. Законом распространения внутренних гравитационных волн (дисперсионное соотношение, ветровая фильтрация) удовлетворяют ~58% высокочастотных возмущений.

Ключевые слова: ПИВ; ВГВ; нейтральный ветер; ветровая фильтрация ВГВ

EXPERIMENTAL STUDY OF HIGH-FREQUENCY TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ACCORDING TO THE DATA OF THE RADIOPHYSICAL COMPLEX OF THE ISTP SB RAS

M.V. Tolstikov, K.G. Ratovsky, A.V. Medvedev

Abstract. In 2022, from January 31 to February 6, measurements on the incoherent scattering radar and ionosonde were carried out in 5-minute increments. The data obtained were processed using previously developed methods and the following results were obtained. Disturbances with periods of less than 30 minutes account for ~ 25% of the total number of disturbances. About 58% of high-frequency disturbances satisfy laws of internal gravitational waves propagation (dispersion relation, wind filtration).

Keywords: TID; IGW; neutral wind; IGW wind filtration

Введение

Нами разработаны методы определения пространственно-временной структуры и характеристик распространения ПИВ [1] по данным совместных непрерывных измерений ионозонда вертикального зондирования DPS-4 и Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). В работах [2-4] проведена проверка дисперсионного соотношения Хайнса для ВГВ на представительной статистике измерений полного вектора скорости ПИВ. В данных работах показано, что большинство экспериментальных данных хорошо согласуются 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 моделей HWM07-14, так и с независимыми измерениями интерферометра. Фабри-Перои и автокорреляционными измерениями ИРНР. Однако, все результаты получены для ПИВ с периодами более 30 минут. Характерный период Брента-Вайсяля для среднеширотной ионосферы составляет ~11.5 минут, таким образом существует не исследованный диапазон периодов. Данная работа посвящена исследованию ПИВ с периодами менее 30 минут по данным трёхточки ионозонд – ИРНР.

Результаты

В 2022 году с 31 января по 6 февраля измерения на радаре некогерентного рассеяния и ионозонде проводились с 5 минутным шагом. Данные были обработаны с помощью ранее разработанного нами метода выделения ПИВ и определения полного вектора скорости распространения ПИВ. В основе метода выделения ПИВ лежит предположение, о том что, из всего спектра волнового возмущения можно выделить доминирующую гармонику в которой сосредоточена большая часть энергии. Если это предположение выполняется, тогда на каждой из высот, которые захватывает волна, в спектре вариаций электронной концентрации должен наблюдаться локальный максимум на одной и той же частоте. Таким образом,

существование локального максимума в спектре на данной частоте как минимум на трех соседних высотах на каждом инструменте (ионозонд и два луча радара) являлось критерием наличия ПИВ. Далее, используя разности фаз между возмущениями на разных инструментах и высотах, можно составить систему линейных уравнений и определить полный вектор скорости ПИВ. Подробно данная методика описана в работе [1]. Было выделено 2037 ПИВ (измерения в каждый момент времени и на каждой высоте считается отдельным событием). Возмущения с периодами более 30 минут составляют ~ 75% от общего числа возмущений, с периодом меньше 30 минут соответственно ~ 25%.

Прямой способ разделения ПИВ вызванных ВГВ и ПИВ другой физической природы является проверка дисперсионного соотношения для ВГВ. Однако прямая проверка дисперсионного соотношения осложняется нейтральным ветром. Взаимодействие ВГВ с горизонтальным ветром в линейном приближении определяется выражением:

$$f' = f - \frac{U}{L_h} \quad (1)$$

здесь f – наблюдаемая частота, f' – внутренняя частота, U – скорость нейтрального ветра вдоль направления распространения ВГВ, L_h – горизонтальная длина волны ВГВ. Так как, дисперсионное соотношение выполняется для внутренней частоты нейтральный ветер «разрушает» зависимость.

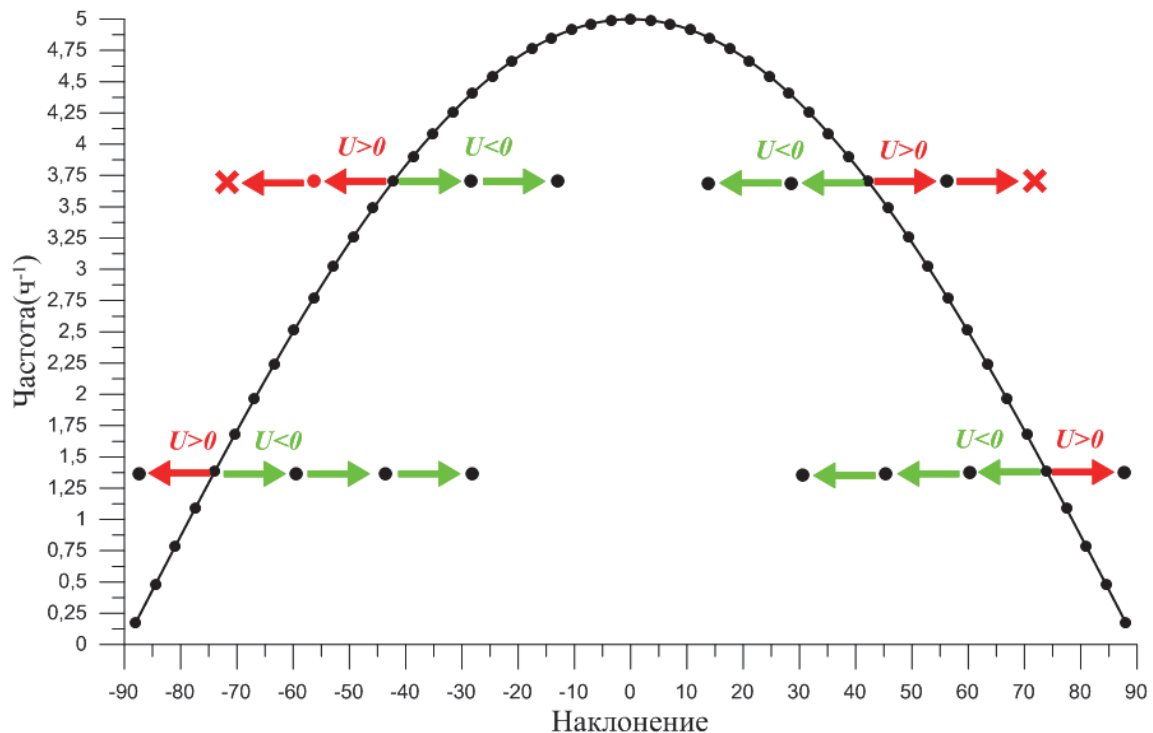


Рис. 1. Дисперсионное соотношение Буссинеска

При встречном нейтральном ветре внутренняя частота возмущения будет больше наблюдаемой и экспериментальные точки будут сдвигаться под кривую дисперсионного соотношения (зелёные стрелки на рисунке 1). При попутном ветре внутренняя частота возмущения будет меньше наблюдаемой и экспериментальные точки будут подниматься над кривой дисперсионного соотношения (красные стрелки на рисунке 1). При распространении ВГВ по ветру сильно уменьшается амплитуда ВГВ за счет диссипации, в то время как при распространении против ветра амплитуда ВГВ увеличивается (эффект ветровой фильтрации [5–7]). Следовательно, нейтральный ветер не может сильно поднять экспериментальные точки над кривой дисперсионного соотношения и на высоких частотах мы должны видеть профиль дисперсионного соотношения.

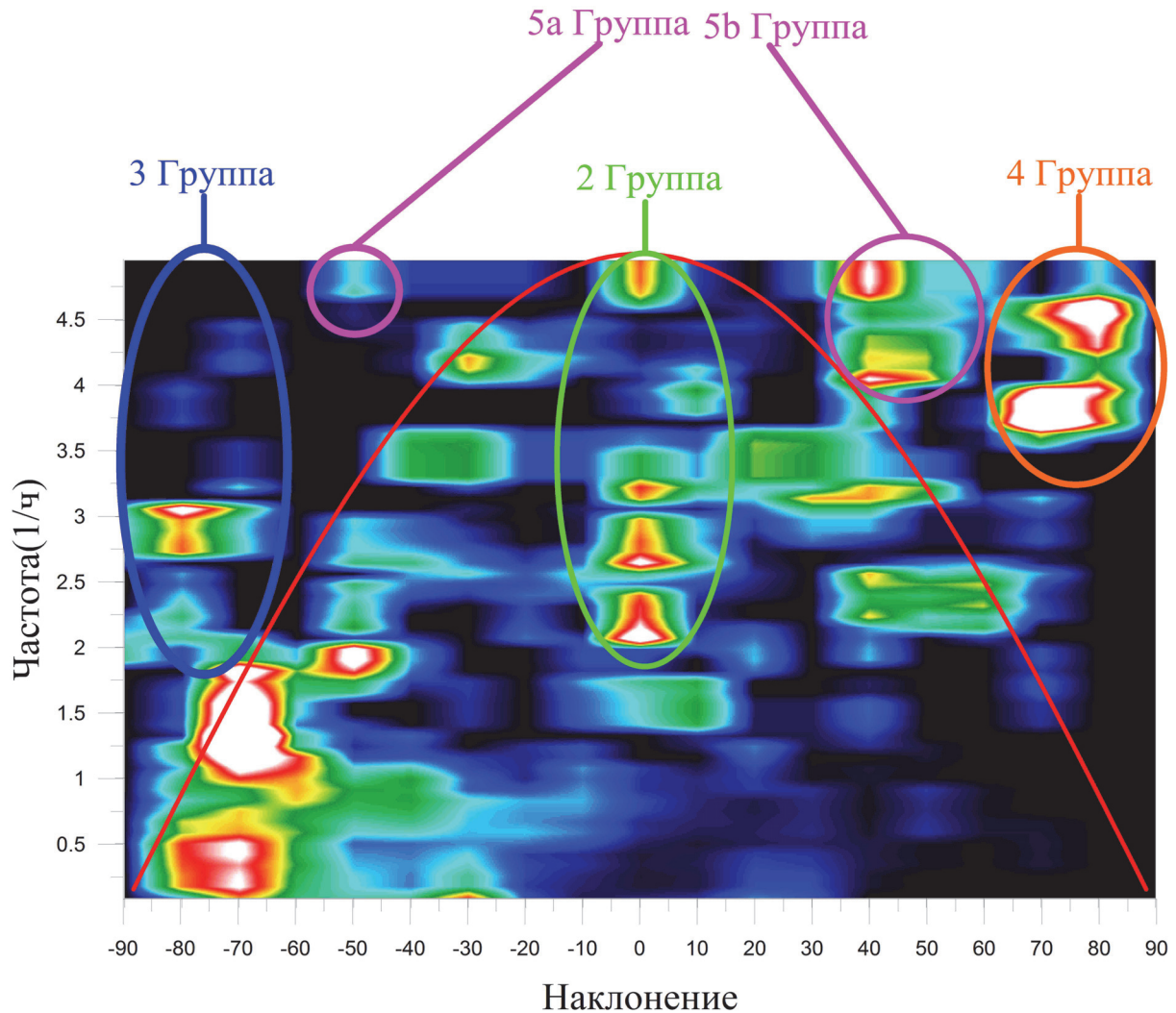


Рис. 2. Распределение ПИВ по частотам и наклонениям (экспериментальные данные).

На рисунке 2 представлены результаты наблюдения. Цветом показана относительная частота наблюдения ПИВ (отношение числа ПИВ наблюдавшихся на данной частоте к общему числу ПИВ наблюдавшихся на данной частоте). Красная линия – дисперсионное соотношение Буссинеска без учета нейтрального ветра. Возмущения можно условно разделить на шесть основных групп: 0) Возмущения с периодами более 30 минут – подавляющее большинство лежит под кривой дисперсионного соотношения (Низкочастотные ВГВ), 1) Возмущения с периодами менее 30 минут, лежащие под кривой дисперсионного соотношения и углами наклонения по модулю большими 10 градусов (высокочастотные ВГВ), 2) Возмущения лежащие под кривой дисперсионного соотношения и углами наклонения по модулю меньшими 10 градусов (высокочастотные отражённые ВГВ), 3–5 группы, выделены цветом на рисунке и явно не соответствуют дисперсионному соотношению (лежат значительно выше кривой). Как отмечалось выше большинство наблюдаемых ВГВ должны распространяться против ветра, а возмущения иной физической природы могут распространяться как по ветру, так и против ветра. Следовательно большая часть возмущений в 0–2 группах должны распространяться против ветра, а в 3–5 группах половина возмущений должны распространяться по ветру, половина против ветра. С помощью модели нейтрального ветра NWM14 был рассчитан процент возмущений, распространяющихся против ветра в каждой группе. В нулевой группе (ВГВ) ~79% возмущений распространяется против ветра, в первой группе (высокочастотные ВГВ) ~71%, во второй группе (высокочастотные отражённые ВГВ) ~73%, в третьей группе ~60%, в четвёртой группе ~52%, в пятой ~47% возмущений распространяется против ветра.

Заключение

Возмущения с периодами менее 30 минут составляют ~ 25% от общего числа возмущений. Высокочастотные возмущения можно условно разделить на шесть основных групп: 1) ВГВ (возмущения, удовлетворяющие дисперсионному соотношению для ВГВ и углами наклона по модулю большими 10°) ~39% от высокочастотных возмущений. 2) Отражённые ВГВ (возмущения, удовлетворяющие дисперсионному соотношению для ВГВ и углами наклона по модулю меньшими 10°) ~19% от высокочастотных возмущений. 3) Плазменные возмущения с фазовой скоростью направленной вниз (не удовлетворяющие дисперсионному соотношению для ВГВ и углами наклона меньшими -65° градусов) ~12% от высокочастотных возмущений. 4) Плазменные возмущения с фазовой скоростью, направленной вверх (не удовлетворяющие дисперсионному соотношению для ВГВ и углами наклона большими 65°) ~16% от высокочастотных возмущений. 5a) Возмущения, не удовлетворяющие дисперсионному соотношению и концентрирующиеся возле углов наклона ~45 градусов составляют ~1% от высокочастотных возмущений. 5b) Возмущения, не удовлетворяющие дисперсионному соотношению и концентрирующиеся возле углов наклона ~45 градусов составляют ~13% от высокочастотных возмущений.

Благодарности

Исследование выполнено 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

1. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2013. – Vol. 105–106. – P. 350–357. DOI:10.1016/j.jastp.2013.09.001.
2. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin, S.S., Scherbakov A.A. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2015, 132. – P. 13–21, DOI:10.1016/j.jastp.2015.06.012.
3. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zherebtsov G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2017, 122. – P. 7567–7580, DOI:10.1002/2017JA024103.
4. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Vasilyev R.V., Artamonov M.V. Method for Determining Neutral Wind Velocity Vectors Using Measurements of Internal Gravity Wave Group and Phase Velocities // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10. – No. 9: 546. DOI: 10.3390/atmos10090546.
5. 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 physics. – 1996. – Vol. 132. – № 6. – P.723–728.
6. Waldock J. A., and 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, 46. – P. 217–231. DOI: 10.1016/0021-9169(84)90149-1.
7. Waldock, J.A. and Jones T.B. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. – 1986, 48. – P. 245–260, DOI: 10.1016/0021-9169(86)90099-1.