УДК 551.510.5
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-206
ORCID: 0009-0000-4155-8770, 0000-0002-6795-3995, 0000-0001-8758-7964

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ — ПЕРО И МОДЕЛИ HWM

А.А. Будовкина, И.К. Едемский, Р.В. Васильев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, abudovkina@iszf.irk.ru

FEATURES OF NEUTRAL WIND DYNAMICS IN THE UPPER ATMOSPHERE DURING SOLAR MINIMUM, ACCORDING TO THE FABRY-PÉROT INTERFEROMETER AND HMW MODEL DATA

A.A. Budovkina, I.K. Edemskiy, R.V. Vasiliev

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

Аннотация. В работе представлены результаты исследования динамики нейтрального ветра в верхней атмосфере по данным интерферометра Фабри — Перо и Horizontal Wind Model (HWM). Выполнено сравнение экспериментальных и модельных значений ветра для линий атмосферного свечения кислорода 557.7 и 630 нм, соответствующих различным высотным областям атмосферы. Для анализа пространственной организации циркуляции построены карты завихренности и температуры на высотах 100 и 300 км. Рассматриваются особенности структуры поля нейтрального ветра и возможные проявления приливных процессов в верхней атмосфере.

Ключевые слова: нейтральный ветер, верхняя атмосфера, интерферометр Фабри–Перо, HWM, завихренность, атмосферные приливы, термосфера.

Abstract. This paper presents results of the study of neutral wind dynamics in the upper atmosphere using the Fabry–Pérot interferometer and Horizontal Wind Model (HWM) data. Experimental and model wind values for the 557.7 and 630 nm oxygen airglow lines, corresponding to different altitudes, were compared. To analyze the spatial organization of the circulation, vorticity and temperature maps were constructed at altitudes of 100 and 300 km. Features of the neutral wind field structure and possible manifestations of tidal processes in the upper atmosphere are examined.

Keywords: neutral wind, upper atmosphere, Fabry – Pérot interferometer, HWM, vorticity, atmospheric tides, thermosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование нейтрального ветра играет существенную роль в изучении динамики верхней атмосферы, поскольку процессы переноса энергии и импульса оказывают влияние на состояние термосферы и ионосферы. Одним из основных источников вариаций параметров верхней атмосферы являются атмосферные приливы [Forbes, 2011], которые распространяются из нижних слоев атмосферы в мезосферу и термосферу.

Для изучения динамики нейтрального ветра используются как данные интерферометрических наблюдений, так и данные эмпирических моделей ветра, в частности HWM. Сравнение данных модели с экспериментальными измерениями позволяет оценить особенности воспроизведения моделью динамических процессов в рассматриваемом регионе, а также исследовать пространственную структуру циркуляции.

Целью данной работы является исследование особенностей динамики нейтрального ветра в верхней атмосфере на основе анализа сезонных вариаций измеренного и смоделированного ветра, а также пространственной структуры циркуляции, полученной по данным моделей HWM и MSIS.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе используются данные ночных измерений с помощью интерферометра Фабри — Перо, расположенного в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в поселке Торы (Республика Бурятия). Наблюдения проводились для двух линий атмосферного свечения кислорода — 557.7 нм (зеленое свечение), что соответствует области нижней термосферы и мезопаузы (высота примерно 100 км), и 630 нм (красное свечение), что соответствует области термосферы (высоты примерно 200–400 км). Использовались данные измерений за период с 2021 по 2025 г.

Для сравнительного анализа динамики ветра использовались расчеты моделей HWM93, HWM07 и HWM14 [Drob et al., 2015] для того же временного интервала. Интерферометр Фабри — Перо регистрирует излучение, формирующееся в некотором диапазоне высот, поэтому измеряемая по этим данным скорость ветра представляет собой интегральную характеристику по высоте. Для корректного сопоставления экспериментальных данных с моделью были рассчитаны весовые коэффициенты высотного вклада для каждой линии свечения. С их использованием для каждой версии модели были получены эквивалентные интегральные значения скорости ветра. Сопоставлялись сезонные вариации экспериментальных и модельных данных. Облачность искажает оценку скорости ветра по измерениям интерферометром, поэтому ночи с облачностью исключались из рассмотрения. Затем

данные модели и данные измерений были разделены по сезонам и усреднены по 15-минутным интервалам времени с учетом среднеквадратичного отклонения и количества точек измерений [Будовкина и др., 2026].

Сравнение экспериментальных и модельных данных показало наличие расхождений как в абсолютных значениях скорости ветра, так и в фазе вариаций. Результаты модельных расчетов существенно различаются в зависимости от версии модели. При этом, как видно на рис. 1, ни одна из рассматриваемых версий модели не воспроизводит данные измерений полностью.

Для различных сезонов наилучшее согласие с измерениями демонстрируют разные версии модели. Так, для высоты 100 км (рис. 1, нижний ряд, зеленая линия) зимой 2023 г. наиболее близкое соответствие наблюдаемым данным показывает модель HWM14, тогда как для высоты 300 км в тот же в тот же период лучшие результаты демонстрирует модель HWM07.

Качественно модель HWM воспроизводит ключевую деталь вариаций: суточную и полусуточную вариацию, наблюдаемую в измерениях ветра по красной и зеленой линиям соответственно. Это согласуется с теорией динамики атмосферы, согласно которой на ионосферных высотах (~300 км) должно сказываться суточное действие приливных сил, а на высоте мезосферы (~100 км) значимыми оказываются полусуточные вариации. Наиболее наглядно это влияние можно продемонстрировать в глобальном масштабе. На рис. 2 стрелками показано поле ветра, рассчитанное для каждой из высот по модели HWM14.

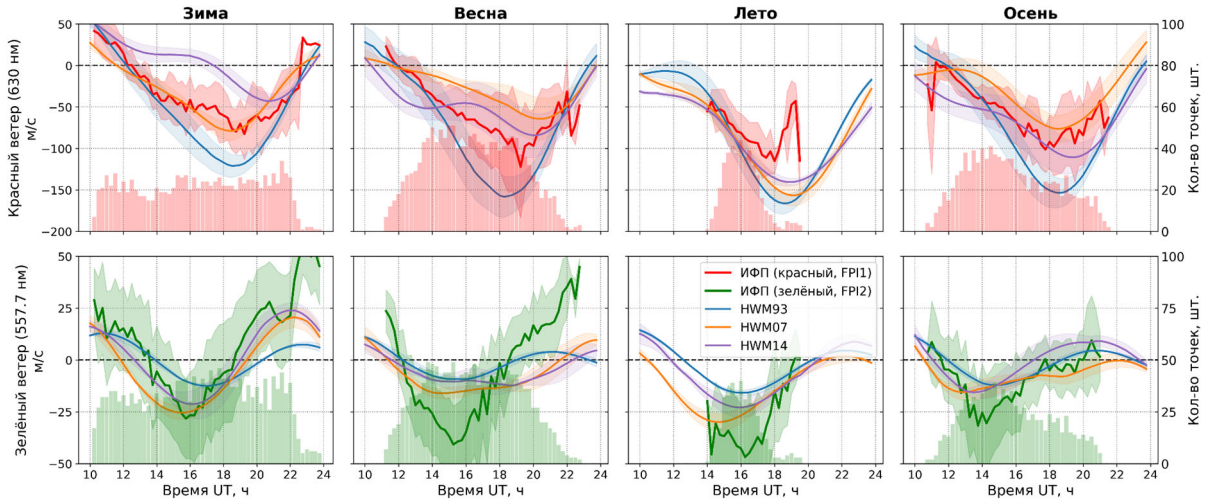

Рис. 1. Вариации скорости ночного меридионального ветра по данным интерферометра Фабри — Перо и моделей HWM для эмиссионных линий 630 и 557.7 нм для 2023 г. (шкала слева). Гистограммы показывают число измерений, по которому получены экспериментальные значения (шкала справа)

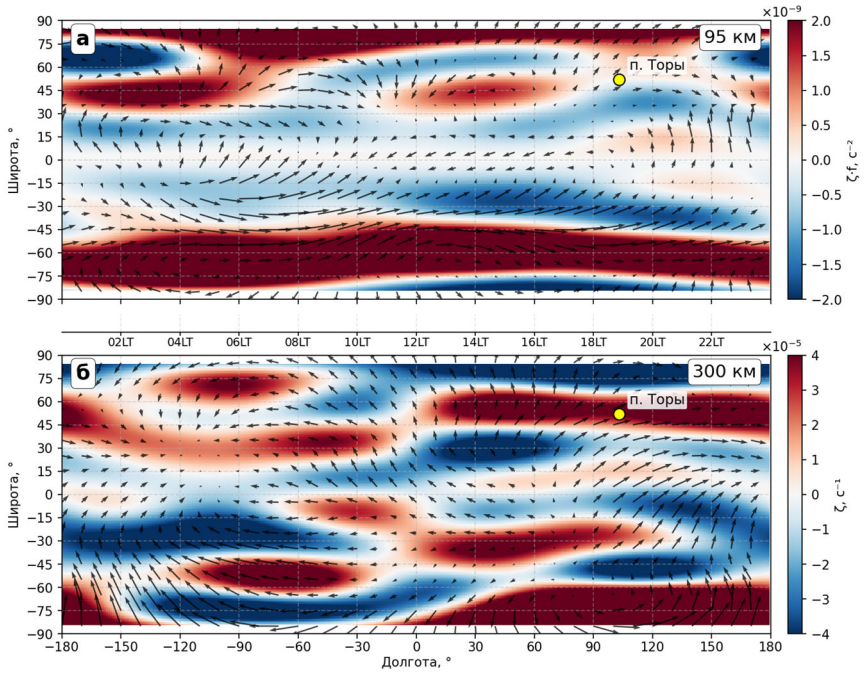

Рис. 2. Карта завихренности для зимы 2023 г. по модели HWM14 для 12 UT: *а* — высота 100 км; *б* — высота 300 км; желтым кружком отмечено положение обсерватории в п. Торы

Пространственную динамику ветра удобно оценить количественно с помощью вертикальной компоненты относительной завихренности [Holton, 2004]:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

где u и v — зональная и меридиональная компоненты скорости нейтрального ветра соответственно, а x и y соответствуют направлениям на восток и север. Относительная завихренность характеризует локальное вращение поля скорости и широко используется для анализа циркуляционных структур в нижней атмосфере [Holton, 2004]. На тропосферных высотах значительное влияние на динамику атмосферы оказывает сила Кориолиса, поэтому вводят так называемую циклоническую завихренность:

$$\zeta \times f,$$

где f — параметр Кориолиса. Вне зависимости от полушария положительное значение циклонической завихренности говорит о наличии циклона, отрицательное — о наличии антициклона и, соответственно, о понижении или повышении температуры в этих областях. Цветом на рис. 2 показана величина циклонической (*а*) и относительной (*б*) завихренности (так так влияние силы Кориолиса на ионосферных высотах незначительно).

Карты демонстрируют выраженную пространственную неоднородность поля завихренности (рис. 2). Вместе с тем области больших значений циклонической завихренности не соответствуют ожидаемым представлениям и не показывают выраженной циклонической циркуляции. Сопоставление поля завихренности с векторным полем ветра показывает, что большие значения циклонической завихренности соответствуют любым изменениям направления ветра, не гарантируя наличия выраженного циклона или антициклона.

Для интерпретации выявленных циркуляционных структур было использовано глобальное распределение температуры [Hedin, 1991], рассчитанное по модели MSIS 2.1. Согласно представлениям о динамике верхней атмосферы, температурные неоднородности формируют соответствующие градиенты давления и оказывают влияние на ветровую структуру атмосферы [Харгривс, 1982]. Для высот 100 и 300 км были построены глобальные карты температуры (рис. 3).

Сопоставление карт температуры и завихренности показывает наличие выраженных пространственных неоднородностей как в термической, так и в циклонической структуре верхней атмосферы. В динамике (см. дополнительные материалы) можно наблюдать наличие температурных неоднородностей, однако их связь с картами завихренности нужно исследовать отдельно.

Детальное сравнение пространственных структур полей завихренности и температуры не выявило их однозначного соответствия ни на высоте 100 км, ни на высоте 300 км. Таким образом, использование двух независимых эмпирических моделей (HWM и MSIS) не позволяет однозначно установить связь между особенностями циркуляции и температурной структурой атмосферы.

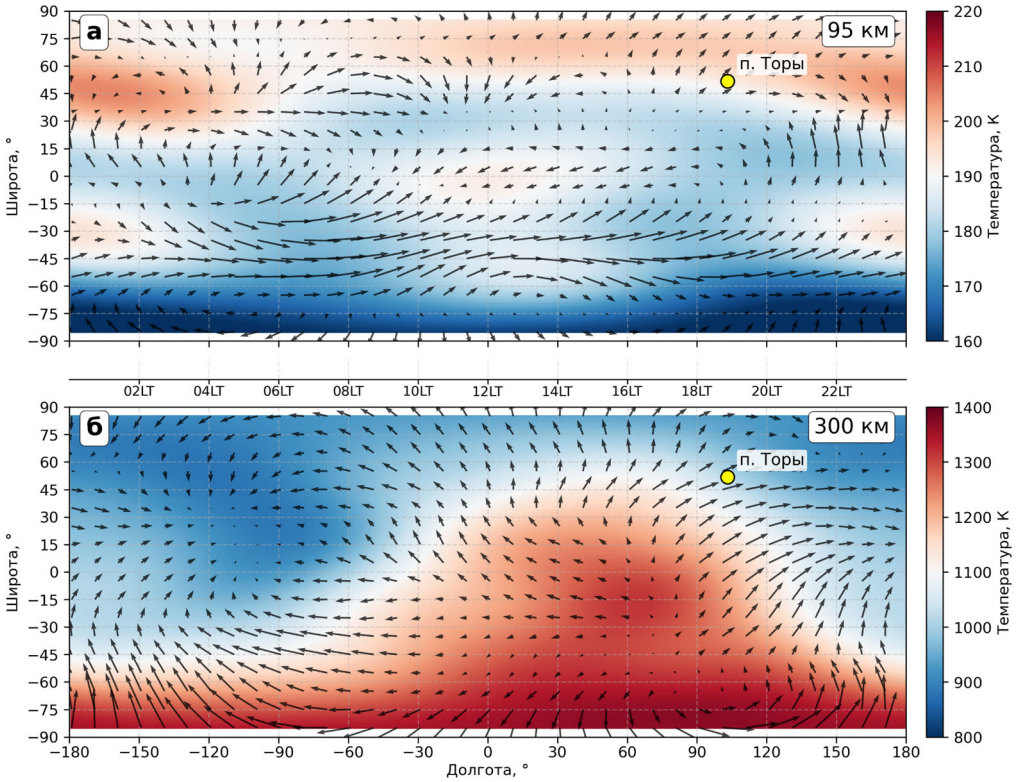

Рис. 3. Карта температурного распределения для зимы 2023 г. по модели MSIS для 12 UT: *а* — высота 100 км; *б* — высота 300 км; желтым кружком отмечено положение обсерватории в п. Торы

Представленные материалы подкрепляют показанные ранее [Будовкина и др., 2026] трудности моделей HWM в воспроизведении наблюдаемых в п. Торы вариаций ветра. Тем не менее качественная согласованность наблюдаемого и смоделированного ветров говорит о наиболее вероятных механизмах наблюдаемых вариаций и свидетельствует в пользу модели HWM при анализе приливных эффектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено сравнение динамики нейтрального ветра в верхней атмосфере по данным различных версий модели HWM и интерферометра Фабри — Перо для эмиссионных линий 557.7 и 630 нм. Модели воспроизводят основные особенности сезонной динамики ветра, включая характерные полусуточные вариации на высоте около 100 км, что согласуется с представлениями о влиянии атмосферных приливов на динамику верхней атмосферы.

Для исследования пространственной структуры поля ветра построены карты завихренности и температуры на высотах 100 и 300 км. Видно, что использование циклонической завихренности для 100 км позволяет выявить области изменения структуры ветрового поля, однако не приводит к однозначному выделению циклонических и антициклонических образований. Сопоставление температуры и завихренности не выявило их прямого соответствия. Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего исследования динамики верхней атмосферы с использованием моделей, в которых поле ветра согласовано с параметрами температуры и плотности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Описанные в работе эффекты для каждого сезона 2023 г. можно наблюдать в динамике пространственных распределений температуры и завихренности:
https://disk.yandex.ru/d/BHJbTfI0BlCyCQ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Будовкина А.А., Едемский И.К., Васильев Р.В. и др. Сезонная динамика горизонтального нейтрального ветра в Байкальском регионе по данным интерферометра Фабри — Перо и различным версиям модели HWM // Солнечно-земная физика. 2026. Т. 12, № 2. С. 63–75

Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 351 с.

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. V. 2, N 7. P. 301–319.

Forbes J.M. Atmospheric tides and planetary waves // Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. Dordrecht: Springer, 2011. P. 11–109.

Hedin A.E. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N A2. P. 1159–1172.

Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology: 4th ed. Burlington: Elsevier Academic Press, 2004. 535 p.