
**СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА
В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ—ПЕРО
И РАЗЛИЧНЫМ ВЕРСИЯМ МОДЕЛИ HWM****SEASONAL VARIABILITY OF HORIZONTAL NEUTRAL WIND
IN THE BAIKAL REGION FROM FABRY—PEROT INTERFEROMETER
OBSERVATIONS AND DIFFERENT VERSIONS OF HWM****А.А. Будовкина** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, abudovkina@iszf.irk.ru***И.К. Едемский** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ilya@iszf.irk.ru***Р.В. Васильев** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru***М.Ф. Артамонов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artamonov.maksim@iszf.irk.ru***A.A. Budovkina***Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, abudovkina@iszf.irk.ru***I.K. Edemskiy***Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ilya@iszf.irk.ru***R.V. Vasilyev***Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru***M.F. Artamonov***Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artamonov.maksim@iszf.irk.ru*

Аннотация. Работа основана на данных о характеристиках естественного свечения верхней атмосферы Земли, генерируемого атомарным кислородом на длине волны 630 нм, полученных при помощи интерферометра Фабри—Перо (ИФП) Национального гелиогеофизического комплекса. ИПФ установлен в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики СО РАН (с. Торы, 52° N, 103° E). Измерение доплеровского смещения линии свечения и последующее соотнесение его с направлением луча наблюдения позволяют восстанавливать величины зональной и меридиональной компонент горизонтального ветра в ночной и сумеречные периоды суток. В работе проводится анализ сезонной динамики компонента нейтрального ветра в 2022 г. по данным интерферометра Фабри—Перо и вычислениям по моделям HWM93, HWM07 и HWM14. Анализ выполнен для локальной ночи 10–24 UTC. Данные были разделены по сезонам относительно дней солнцестояния и равноденствия, а также отфильтрованы по условию наличия облачности.

Расхождение между значениями модели и измерениями каждого компонента ветра варьирует как в течение суток, так и в зависимости от сезона. При этом можно заключить, что ни одна модель не дает приемлемого согласования с измеренными величинами и предоставляемые моделью HWM значения ветра для Байкальского региона не следует рассматривать как точные. Развитие настоящей работы позволит выработать рекомендации по коррекции или улучшению модели HWM с целью более точного описания динамики верхней атмосферы региона. Полученные в работе результаты будут также полезны при выборе версии модели нейтрального ветра для расчетов заданной компоненты ветра в заданный сезон.

Abstract. This study is based on observations of the atomic oxygen airglow emission at 630 nm obtained with a Fabry—Perot interferometer (FPI) of the National Heliogeophysical Complex. FPI is installed in the Geophysical Observatory of the Institute of Solar Terrestrial Physics SB RAS (Tory, 52° N, 103° E). Doppler shifts of the emission line were measured and then converted into horizontal wind velocities along the zonal and meridional directions during nighttime and twilight periods. We analyze the seasonal variability of neutral wind components during 2022, using both FPI measurements and model calculations from three versions of the Horizontal Wind Model: HWM93, HWM07, and HWM14. The analysis covers local nighttime hours (10–24 UTC). The data was separated by seasons relative to solstices and equinoxes and filtered by cloud conditions.

The discrepancies between modeled and observed wind components vary with both local time and season. None of the HWM versions provide acceptable agreement with the measurements, indicating that HWM outputs for the Baikal region should not be considered accurate. The results of this study can be used to develop recommendations for improving or adjusting HWM in order to better describe the dynamics of the upper atmosphere in the region. These findings are also useful when choosing the most suitable HWM version for estimating a specific wind component in a given season.

Keywords: Horizontal Wind Model (HWM), Fabry—Perot interferometer, neutral wind, thermosphere.

Ключевые слова: модель горизонтального ветра (HWM), интерферометр Фабри—Перо, нейтральный ветер, термосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Высотный профиль нейтрального ветра в атмосфере определяется в первую очередь температурными градиентами, формируемыми солнечным излучением, которые создают разность давлений между дневной и ночной сторонами Земли, а также между низкими и высокими широтами [Матвеев, 1984]. Сила Кориолиса, доминирующая в тропосфере и стратосфере, формирует струйные течения и пассаты, но ее влияние ослабевает выше 100 км из-за снижения плотности воздуха и роста доминирующей роли ион-нейтрального взаимодействия [Holton, Hakim, 2012; Richmond, Maute, 2014]. Приливные и внутренние гравитационные волны (ВГВ), генерируемые в нижних слоях атмосферы (например, конвекцией в тропосфере или орографическими возмущениями), переносят энергию и импульс в верхние слои. Амплитуда ВГВ экспоненциально растет с высотой из-за уменьшения плотности, что приводит к их разрушению в мезосфере и термосфере, где они передают часть своей энергии нагреву среды, а остаточный импульс — нейтральному ветру [Матвеев, 1984].

На ионосферных высотах (выше 100 км) значимым становится влияние ион-нейтральных столкновений. Это приводит к тому, что конфигурация электрического поля и токов в значительной степени зависит от параметров нейтрального ветра [Richmond, Maute, 2014]. Усиление ионосферных токов во время геомагнитных бурь и суббурь посредством взаимодействия с нейтральными частицами приводит к усилению ветров в полярной термосфере до 500–1000 м/с, что оказывает влияние на ветровую динамику в глобальном масштабе [Prölss, 2012].

Можно говорить, что вследствие наличия нелинейностей взаимодействия, участия процессов различной природы и воздействия различных сил, а также сезонной, широтной и геомагнитной зависимости отдельных компонент процессов задача предсказания величины нейтрального ветра представляется крайне сложной. Ситуацию осложняет ограниченность наблюдательной базы, особенно на ионосферных высотах, где невозможно использование метеозондов, а дистанционные лидарные и радарные методы исследования эффективны только в нижней ионосфере (резонансное рассеяние на металлических ионах и радиолокация метеорных следов). Динамика верхней ионосферы может успешно наблюдаться при помощи ионозондов и радаров некогерентного рассеяния, однако ее взаимосвязь с нейтральным ветром неоднозначна вследствие наличия, помимо ветровой динамики, плазменно-химических и иных факторов, влияющих на изменчивость концентрации плазмы. Спутниковые измерения нерегулярны и не позволяют исследовать суточную динамику ветра с хорошим временным разрешением.

Между тем существуют и активно используются различные модели, позволяющие рассчитывать компоненты нейтрального ветра: TIE-GCM

(Thermosphere—Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model) [Richmond et al., 1992], GITM (Global Ionosphere Thermosphere Model) [Ridley et al., 2006], CTIM (A Coupled Thermosphere—Ionosphere Model) [Fuller-Rowell et al., 1996], GSM-TIP [Klimenko et al., 2007]. Отдельно следует назвать модель HWM (Horizontal Wind Model). Она основана на эмпирических сведениях о нейтральном ветре, получаемых из различных источников (ионозонды, спутниковые эксперименты, наземные интерферометры Фабри—Перо и пр.). В рамках настоящего исследования мы приводим значения компонент нейтрального ветра, полученные в течение года наземными оптическими наблюдениями, и сопоставляем их с модельными значениями модели HWM трех актуальных версий. Аналогичные исследования нейтрального ветра с использованием наземных интерферометров Фабри—Перо выполнялись на средних широтах Китая [Yao et al., 2015; Yang et al., 2020] и в Восточной Азии при сопоставлении с глобальными моделями [Jiang et al., 2018], а также на высоких широтах в Норвегии [Xu et al., 2019]. Эти работы показали устойчивые сезонные и внутрисуточные паттерны, а также зависящие от широты, сезона и уровня солнечной активности систематические расхождения смоделированных (в том числе с помощью HWM) и наблюдаемых величин [Emmert et al., 2006; Okoh et al., 2022]. Настоящая работа дополняет картину уникальными данными для Байкальского региона (средние широты Евразии) и оценивает согласие наблюдений с помощью интерферометра Фабри—Перо 630 нм и HWM различных версий в 2022 г.

Цель работы состоит в определении версии (или комбинации версий) модели, наилучшим образом согласующуюся с результатами наблюдений.

1. АНАЛИЗ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

1.1. Модель горизонтального ветра

HWM представляет собой эмпирическую модель, описывающую горизонтальный нейтральный ветер. В ее основе лежат данные, собранные как со спутников, так и с наземных устройств, включая радары и интерферометры Фабри—Перо [<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/HWM14~2014>]. Существует пять версий этой модели, отличающихся набором исходных данных и диапазоном высот, на которые распространяется прогноз (табл. 1).

Модель первой версии, получившая название HWM87, использовалась для прогнозирования ветров на высотах больше 220 км [Hedin et al., 1988]. Позднее в 1990 г. появилась HWM90 более совершенной версии. Она включала данные о ветре, полученные с помощью наземных инструментов: радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров Фабри—Перо (ИПФ). Эта модель использо-

Таблица 1

Сравнение версий HWM

| Версия | Источники данных | Высоты |
|--------|--|---------------------------|
| HWM87 | Спутники AE-E и DE 2 | от 220 до ~500 км |
| HWM90 | Спутники AE-E и DE 2 Наземные радары некогерентного рассеяния и оптические интерферометры Фабри—Перо | от 100 до ~500 км |
| HWM93 | Спутники AE-E и DE 2 Наземные радары некогерентного рассеяния и оптические интерферометры Фабри—Перо Радары MF/Meteor | от уровня земли до 500 км |
| HWM07 | Спутники AE-E и DE 2 Наземные радары некогерентного рассеяния и оптические интерферометры Фабри—Перо Радары MF/Meteor Профили высот с приборов NASA/UARS-WINDII и -HRDI | от уровня земли до 500 км |
| HWM14 | Спутники AE-E и DE 2 Наземные радары некогерентного рассеяния и оптические интерферометры Фабри—Перо Радары MF/Meteor Профили высот с приборов NASA/UARS-WINDII и -HRDI Интерферометры Фабри—Перо на длине волны 630 нм в экваториальных и полярных регионах Поперечные ветры, полученные со спутника Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer (GOCE) (на высоте ~250 км) | от уровня земли до 500 км |

валась для прогнозирования ветров на высотах от 100 км и выше [Hedin et al., 1991]. В версии HWM93 модель была расширена благодаря данным радаров MF/Meteor, что позволило прогнозировать ветры начиная от уровня земли [Hedin et al., 1996]. HWM07 расширяет возможности HWM93, так как построена с учетом новых данных наблюдений, включая высотные профили, собранные с помощью приборов NASA/UARS-WINDII и -HRDI [Drob et al., 2008]. В HWM14 последней версии используются данные наземных измерений, полученные с помощью интерферометров Фабри—Перо на длине волны 630 нм в экваториальных и полярных регионах. На этапе создания в эту модель были включены также данные, собранные спутником GOCE (Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer) о ветрах, поперечных его траектории на высоте орбиты (~250 км). Кроме того, в HWM07 [Drob et al., 2008] и HWM14 [Drob et al., 2015] для термосферы предусмотрены два режима: для спокойного времени и для геомагнитно-возмущенного.

В настоящем исследовании для работы с моделью использовалась библиотека Pyglow, которая предоставляет доступ к различным атмосферным моделям, таким как HWM, IRI и MSIS [<https://github.com/timduly4/pyglow>]. В состав библиотеки входят три наиболее популярные версии HWM: HWM93, HWM07 и HWM14, написанные на языке программирования Fortran. Для удобства имеется специальная Python-оболочка, которая упрощает работу с моделями. Кроме того, библиотека позволяет запускать модель с актуальными индексами состояния околоземного космиче-

ского пространства (ОКП). Согласно принятой в HWM системе координат, зональная компонента считается положительной при направлении на восток, а меридиональная — при направлении на север.

1.2. Определение компонент ветра интерферометром Фабри—Перо

Инструментальную основу работы обеспечивают данные интерферометра Фабри—Перо, установленного в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН). Обсерватория расположена в с. Торы (52° N, 103° E). Несколько таких интерферометров были закуплены у фирмы КЕО Scientific для создания первого пускового объекта «Оптические инструменты» [Васильев и др., 2020] Национального гелиогеофизического комплекса РАН (НГК РАН) [Жеребцов, 2020].

Интерферометр регистрирует свечение линии атомарного кислорода $O(^1D)$ с длиной волны 630 нм. Наиболее значительный вклад в это свечение и его вариативность вносят плазменно-химические реакции и динамические процессы в атмосфере, происходящие на высотах от 200 до 400 км [Васильев и др., 2017]. В работе использовались значения скорости ветра (зональная и меридиональная компоненты), полученные на основе данных о характеристиках атмосферного свечения, измеренных интерферометром. Точность измерения ветра при помощи интерферометров НГК РАН, заявленная производителем, составляет 5–10 м/с.

Скорость ветра определяется из доплеровского сдвига длины волны свечения, вызванного коллективным движением светящихся воздушных масс [Васильев и др., 2017]. Для этого регистрируются четыре интерференционные картины в узком (2.54°) поле зрения при наблюдении в направлении сторон света (север, юг, запад, восток) с зенитными углами 45° . Из каждой интерферограммы получают смещение длины волны регистрируемого излучения относительно 630 нм. При заданных зенитном и азимутальных углах можно получить компоненты проекций горизонтальных ветров на направление наблюдения. Если предположить, что за время проведения этих замеров поле ветра над обсерваторией было однородным как в пространстве, так и во времени, а остаточные вариации параметров также не изменялись, то вектор скорости горизонтального ветра можно получить путем несложных расчетов:

$$V_i = c - c \left(\frac{\lambda_0 + \delta\lambda_i}{\lambda_0} \right),$$

где V_i — скорость вдоль направления; c — скорость света; λ_0 — длина волны излучения без смещения (630 нм); $\delta\lambda_0$ — доплеровское смещение, наблюдаемое в направлении одной из сторон света. Индекс i обозначает наблюдения в направлениях на север, юг, восток и запад (соответственно, n, s, e, w).

Скорость ветра в зональном направлении вычисляется с использованием значений скоростей, полученных в западном и восточном направлениях с учетом зенитного угла наблюдений $\alpha=45^\circ$. При этом действие вертикального ветра и систематические погрешности, имеющие одинаковый знак, сокращаются, а проекции зональной скорости на линию наблюдений, имеющие разные знаки, складываются:

$$u = \frac{V_e - V_w}{2 \cos \alpha}.$$

Аналогично по данным, полученным в северном и южном направлениях, можно получить значение меридиональной скорости ветра v :

$$v = \frac{V_n - V_s}{2 \cos \alpha}.$$

Приведенные формулы позволяют определить скорости горизонтального ветра при прямом наблюдении свечения из небольших областей термосферы (примерно 10 км на высоте 200–400 км) находящихся в разных направлениях. Однако свет, идущий из термосферы, проходит через тропосферу и может рассеиваться облаками и аэрозолями. Из-за неоднородности плотности облаков интерферометр вместо оптического излучения одного доплеровского сдвига из конкретной небольшой области термосферы будет фиксировать смесь оптических сигналов, приходящих с различных направлений и обладающих разными доплеровскими сдвигами. В таких условиях расчет горизонтальных скоростей по формулам, описанным выше, приводит к неточным результатам. Поэтому для более корректного расчета следует учитывать условия наблюдений, которые можно определить по числу звезд в поле зрения обзорной камеры

[Подлесный и др., 2022]. Этот критерий позволяет отобрать данные, полученные при минимальной облачности и/или плотности аэрозолей. Далее в работе данные измерений будут разделены по этому критерию на несколько наборов данных: все измерения, измерения для ясных периодов и измерения для облачных периодов.

1.3. Данные измерений

В работе использовались экспериментальные данные о зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за один год (период ноябрь 2021 – ноябрь 2022 г.), полученные в ночное время (локальная ночь с 10 до 24 UT). В разные сезоны этот временной интервал может немного различаться, так как он зависит от продолжительности ночи, но в целом находится в указанных пределах.

Для более точного расчета в процессе обработки данные были разделены на две категории: в одну вошли измерения, соответствующие введенному условию «облачно», в другую — «ясно» (см. конец подраздела 1.2). Для заданного сезона определялись медианные значения в каждом 15-минутном интервале времени и соответствующее среднеквадратичное отклонение (СКО). Сезоны определялись по дням солнцестояния и равноденствия. В результате зима охватывает период с 7 ноября 2021 по 6 февраля 2022 г. включительно, весна — с 7 февраля по 8 мая 2022 г., лето — с 9 мая по 7 августа 2022 г., а осень — с 8 августа по 6 ноября 2022 г.

На рис. 1 показана динамика медианы зональной компоненты ветра для весны, лета, осени и зимы ($a-z$). Гистограммы под каждой панелью показывают число отдельных измерений в заданный интервал времени для ночей с облаками (красная заливка) и без облаков (синяя заливка), те же цвета использованы для основных кривых. Полупрозрачная заливка показывает диапазон СКО найденной компоненты. Аналогичное представление для меридиональной компоненты скорости ветра показано на рис. 2.

Наличие облачности оказывает заметное влияние на измеренные значения скорости ветра: в облачные дни они становятся ближе к нулю, тогда как в ясные имеют значительно большую амплитуду. Как отмечалось в разделе 1.2, облачность приводит к регистрации интерферометром усредненных сигналов с различными доплеровскими сдвигами, что снижает точность расчета скорости ветра.

Следует также отметить, что отсутствие измерений в отдельные моменты времени, может быть связано не только с погодными условиями, но и с возможными техническими причинами, например с периодами обслуживания аппаратуры.

HWM определяет значение скорости ветра на заданной высоте, а интерферометр Фабри—Перо измеряет интенсивность свечения высотного слоя, поэтому рассчитанную на основе его измерений скорость ветра нельзя отнести к какой-то конкретной высоте. Значение, полученное интерферометром, следует рассматривать как некоторую интегральную величину. Интенсивность свечения изменяется с высотой, и можно предположить, что ветер на разных

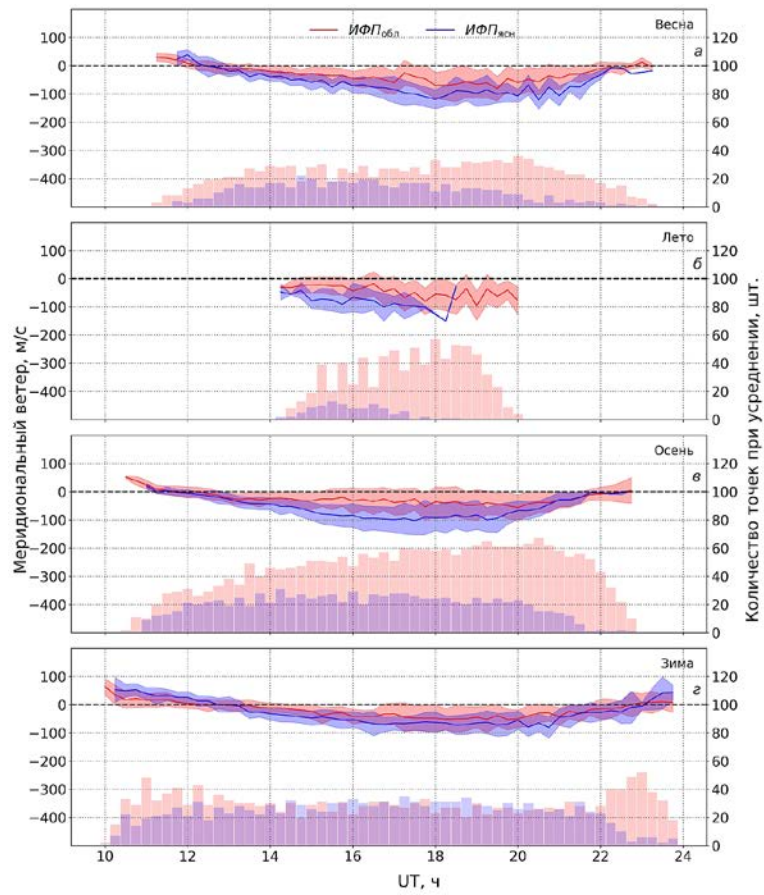


Рис. 1. Сравнение облачных и ясных измерений, зональная составляющая для весны, лета, осени и зимы 2022 г. (а–г)

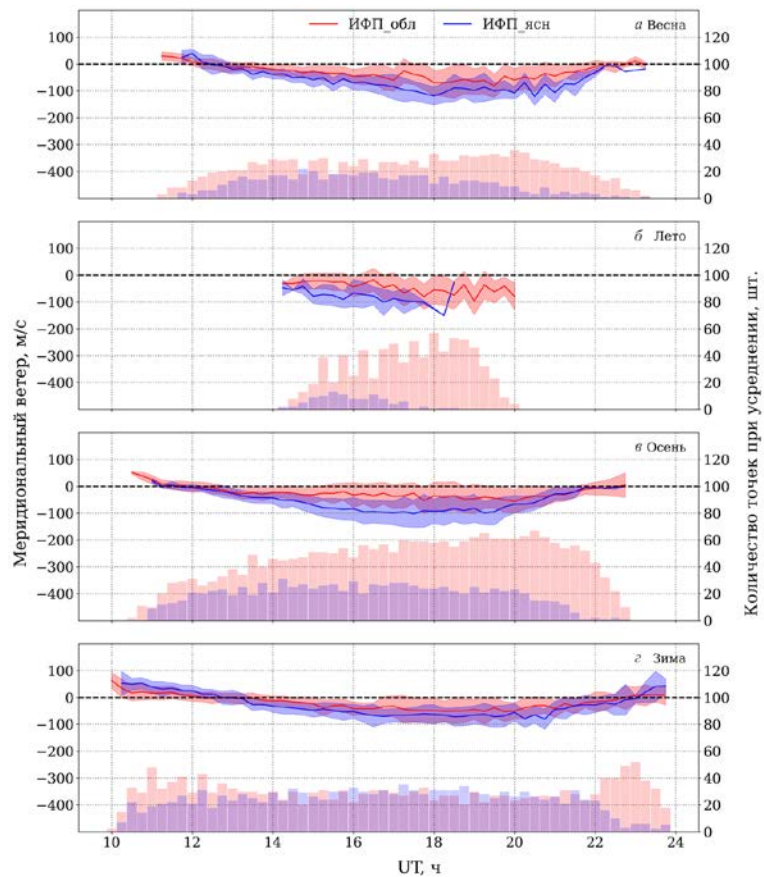


Рис. 2. Сравнение облачных и ясных измерений, меридиональная составляющая для весны, лета, осени и зимы 2022 г. (а–г)

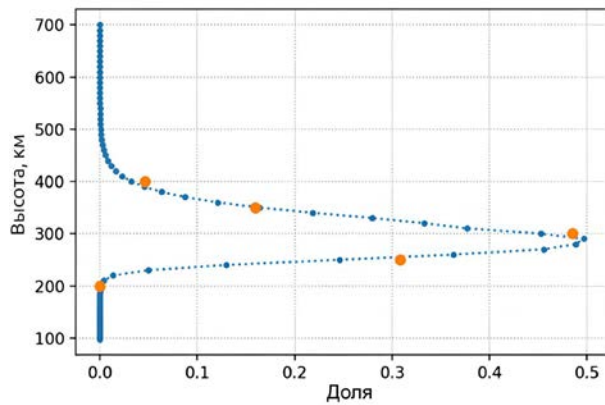


Рис. 3. Нормированный медианный высотный профиль объемного свечения (синий цвет) и соответствующие весовые коэффициенты (оранжевый) на высотах 200, 250, 300, 350 и 400 км

высотах вносит различный вклад в интегральную величину. Мы промоделировали профиль свечения для нескольких летних ночей, по результатам которого был определен медианный профиль (рис. 3), и выбрали наиболее значимые высоты от 200 до 400 км с шагом 50 км [Тащилин, Леонович, 2016].

Этот профиль позволил рассчитать весовые коэффициенты, учитывающие вклад свечения на разных высотах в общую интегральную величину. Используя эти коэффициенты в качестве весов, мы рассчитали эквивалентный интегральный ветер по данным НWM.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В этом разделе сравниваются компоненты горизонтального ветра, полученные по данным интерферометра Фабри—Перо: зональная $U_{\text{ИФП}}$ и меридиональная $V_{\text{ИФП}}$ с соответствующими значениями, рассчитанными по версиям НWM93, НWM07 и НWM14 ($U_{93,07,14}$ и $V_{93,07,14}$). На рис. 4, 5 показаны средние значения эквивалентного интегрального ветра (синяя линия) и ветра на заданной высоте 300 км (синие точки), что показывает как наиболее значимый вклад последних в интеграл, так и общее соответствие суточной динамики обоих рядов.

Подразделы 2.1 и 2.2 посвящены анализу зональной и меридиональной компонент соответственно.

2.1. Зональный ветер

При первичном сопоставлении (см. рис. 4) модельные и измеренные данные показывают сходные черты суточной динамики зонального ветра. Однако более детальное рассмотрение выявляет существенные расхождения по амплитуде и фазе в каждом из сезонов в разные временные интервалы.

Весной наибольшее соответствие как по форме кривой, так и по абсолютным значениям наблюдается между $U_{\text{ИФП}}$ и U_{93} (панель а, красный и синий цвета соответственно). Особенно хорошо это видно в интервале времени 13–20 UT: разность между моделью и измерениями в большинстве случаев не превышает 20 м/с. Ближе к концу ночи расхождения увеличиваются, но остаются в пределах стандартного

отклонения (полупрозрачные области). Значения U_{07} (б) также совпадают с измерениями в интервале 14–18 UT, однако после 18 UT наблюдается как существенное расхождение, так и смена направления ветра на западное в интервале 18–22 UT. Сравнение $U_{\text{ИФП}}$ и U_{14} , напротив, демонстрирует лучшее соответствие в начале и конце ночи.

Летний период характеризуется наименьшим числом измерений (гистограммы на панелях г, д, е), что связано с высокой облачностью в это время года. Количество доступных значений варьирует от 1 (минимум по выборке) до 12 (максимальное значение для лета). Для сравнения: при идеальных условиях за 90 дней можно было бы получить до 90 измерений, как, например, получается при расчете с помощью модели. Таким образом, даже максимальное количество измерений не превышает 15 % от возможного. Нехватка данных сказывается и на ширине области СКО: колебания измерений практически не компенсируются усреднением. Гистограммы под каждой панелью позволяют визуально оценить достоверность усредненных значений: чем ниже столбик, тем менее надежны данные. Учитывая это, относительно корректное сравнение возможно лишь для интервала 14–18 UT. В этот период U_{14} и U_{93} показывают с $U_{\text{ИФП}}$ наилучшее соответствие, тогда как U_{07} — существенное расхождение (до 60 м/с).

Осенние измерения (панели ж, з, и) отличаются большей надежностью благодаря существенно большему количеству доступных данных по сравнению с весной и летом. Вероятно, именно это обуславливает наилучшее совпадение среди всех сезонов между $U_{\text{ИФП}}$ и U_{14} : за исключением последнего часа ночи расхождение между ними остается умеренным (~25–30 м/с), а формы кривых визуально хорошо совпадают. Сходство наблюдается и для U_{93} , однако в этом случае расхождения возникают не только в конце, но и в начале ночи. Напротив, U_{07} демонстрирует наибольшее расхождение за весь период наблюдений. Значения на всем интервале времени находятся в противофазе: там, где модель предсказывает восточный ветер (положительные значения), измерения находятся ближе к нулю или показывают отрицательные значения (западное направление ветра).

Зимний период (панели к, л, м) характеризуется аналогичной динамикой. Смоделированная U_{07} показывает значения, противоположные измеренной $U_{\text{ИФП}}$, за исключением короткого интервала времени (~18:30–19:30 UT), в течение которого кривые визуально совпадают, а расхождение не превышает 20 м/с. Поведение U_{14} , как и осенью, хорошо воспроизводит форму кривой $U_{\text{ИФП}}$ на большей части интервала, за исключением начала и конца ночи, где наблюдаются отклонения. Компонента U_{93} также показывает схожий с $U_{\text{ИФП}}$ профиль, однако есть расхождения в начале и конце ночи, которые достигают 40–60 м/с, что существенно выше, чем для U_{14} .

В целом наилучшее соответствие зональной компоненты и измерений $U_{\text{ИФП}}$ по всем сезонам наблюдается для НWM14, особенно в осенний и зимний периоды. НWM93 нередко воспроизводит общий тренд,

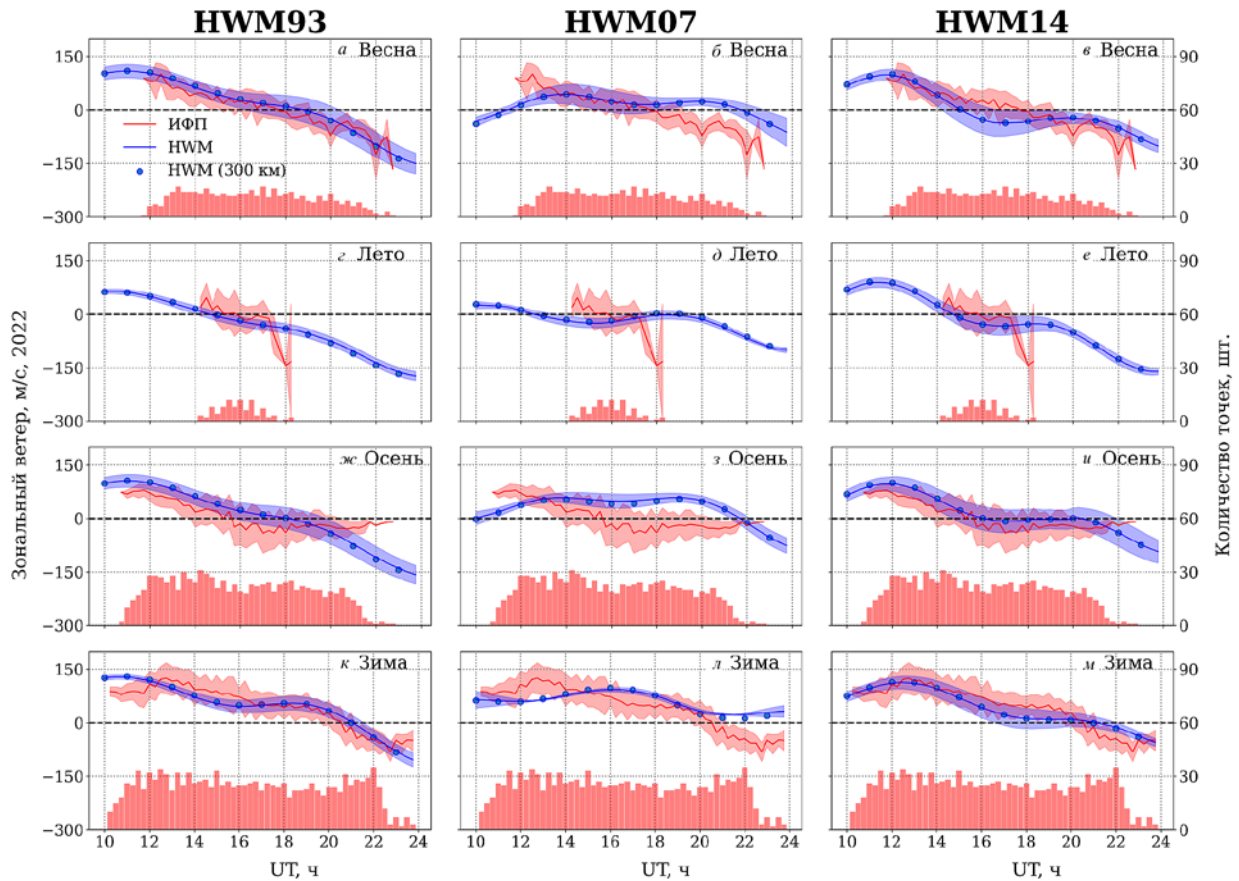


Рис. 4. Зональная компонента скорости ветра. Красные линии соответствуют измерениям интерферометра, синие — значениям модели; точками обозначены средние значения компоненты ветра по данным модели на высоте 300 км. Полупрозрачные области показывают стандартное отклонение (СКО). Слева направо — версии HWM93, HWM07, HWM14, сверху вниз — сезоны (весна, лето, осень, зима)

однако ее значения часто расходятся с измерениями в начале и в конце ночи. Наибольшие отклонения характерны для HWM07, причем в ряде сезонов смоделированные значения находятся в устойчивой противофазе с измерениями. Кроме того, вне зависимости от версии модели, повышенные расхождения систематически наблюдаются на границах интервала наблюдений в начале и конце ночи.

2.2. Меридиональный ветер

По рис. 5 видно, что, как и в случае зональной компоненты скорости ветра, HWM воспроизводит суточный ход меридионального ветра. При этом, несмотря на сохраняющиеся расхождения по амплитуде и фазе, модельные и измеренные значения меридионального ветра в большинстве случаев совпадают по направлению.

Весной V_{93} (панель *a*, синий цвет) наиболее близка по форме к $V_{ИФП}$ (красный), однако модельные значения имеют большую амплитуду. Напротив, V_{07} (*б*) характеризуются заниженной амплитудой по сравнению с наблюдениями, а также смещением минимума по времени ближе к концу ночи. На панели *в* V_{14} имеет схожую с $V_{ИФП}$ форму кривой и наименьшее расхождение по амплитуде в интервале 14–22 UT. Вместе с тем в начале и конце ночи наблюдаются отклонения: до 30–70 м/с в 12–14 UT и 30–50 м/с в 22–23 UT.

Для лета, как и в случае с зональной компонентой, количество измерений (панели *г, д, е*, гистограммы) после исключения облачных ночей значительно сокращено. Интервал наблюдений в летние ночи ограничен по времени и составляет ~5 ч — с 14 до 19 UT. Максимальное количество точек при усреднении не превышает 13, вследствие чего отдельные выбросы существенно искажают результирующие значения. В частности, в промежутке 18:00–18:30 UT наблюдается большое расхождение между модельными и измеренными значениями, достигающее 140 м/с. Мы посчитали нужным оставить такие значения на графиках, однако отмечаем их низкую статистическую значимость.

Осенний сезон для всех трех версий модели характеризуется совпадением формы кривой с $V_{ИФП}$ (панели *ж, з, и*), при этом минимум значений в модельных данных смещен по времени относительно измерений. Для V_{93} амплитуда расхождений остается наибольшей, особенно с середины до конца ночи. $V_{07}(з)$ демонстрирует хорошее совпадение формы кривой с $V_{ИФП}$ и при минимальных отклонениях по амплитуде. В случае V_{14} (*и*) наблюдается соответствие $V_{ИФП}$ в середине ночи, однако на интервалах 11–14 и 20–23 UT фиксируются расхождения ~30–50 и 40–70 м/с соответственно.

Зимой кривые V_{93} и $V_{ИФП}$ также совпадают по форме (рис. 5, *к*), однако на интервале минимальных

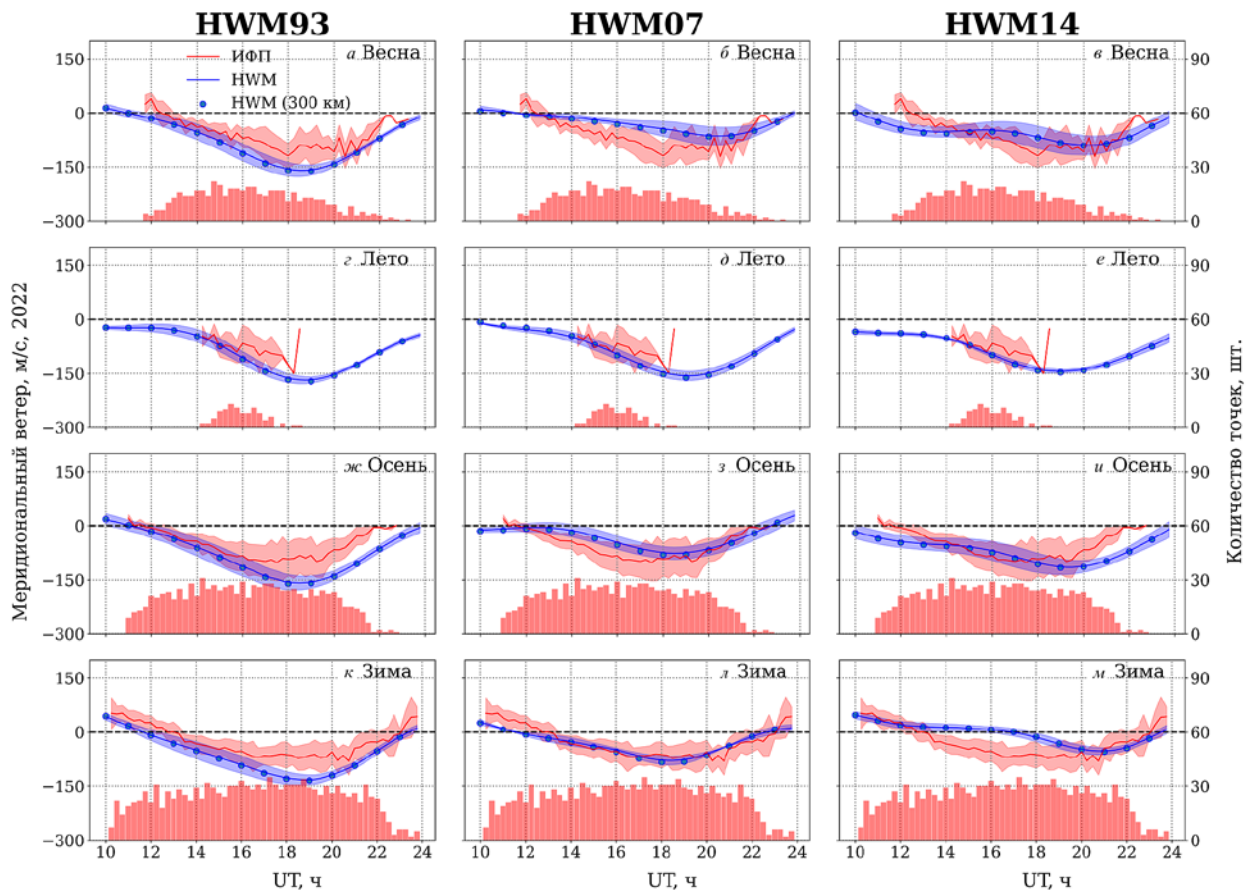


Рис. 5. Меридиональная компонента скорости ветра. Красные линии соответствуют измерениям интерферометра, синие — значениям модели; точками обозначены средние значения компоненты ветра по данным модели на высоте 300 км. Полупрозрачные области показывают стандартное отклонение (СКО). Графики расположены следующим образом: слева направо — версии HWM93, HWM07, HWM14, сверху вниз — сезоны (весна, лето, осень, зима)

значений расхождения наиболее выражены: модельные значения имеют большую амплитуду. На панели *л* представлено наилучшее для всех сезонов соответствие между модельными предсказаниями V_{07} и измерениями $V_{ИФП}$ с середины до конца ночи. При этом в начале ночи (10–13 UT) расхождения достигают 40 м/с. Напротив, V_{14} (*м*) демонстрирует хорошее совпадение с $V_{ИФП}$ в начале и конце ночи, но на интервале 13–20 UT значения находятся в противофазе, а расхождения могут достигать 75 м/с.

Видно, что для меридиональной компоненты ветра наилучшее соответствие измерениям интерферометра демонстрирует HWM07, особенно в осенний и зимний периоды. В отличие от зональной компоненты для меридионального ветра предсказания модели чаще совпадают с измерениями, выраженные расхождения в начале и конце ночи встречаются реже и имеют меньшую амплитуду.

2.3. Обсуждение расхождений между измерениями и моделью

После подробного сравнения скоростей зонального и меридионального ветров по всем сезонам видно, что расхождение модельных и измеренных значений меняется в течение суток для каждого сезона (рис. 6, 7). Красным цветом показано расхождение для полного набора измерений (облачные и безоблачные ночи), синим — только для ясных ночей.

Для зональной компоненты ветра (см. рис. 6) практически для всех случаев введение условия наличия облачности ($\Delta U_{ясн}$) не вносит значительного изменения в расхождение измеренных и модельных данных. В некоторых случаях даже может увеличить это расхождение: весной (*б, в*) и зимой (*к, л, м*) — в конце ночи, осенью (*ж, з, и*) — в середине ночи. Вероятно, разница между полным набором данных и данными для ясных ночей не так заметна, потому что облачность фиксировалась камерой, направленной на север. Это не гарантирует наличия или отсутствия облаков по другим направлениям и поэтому такая выборка данных по условиям облачности меньше сказывается на зональном ветре (запад–восток).

Для меридиональной компоненты (север–юг) расхождение между модельными и наблюдаемыми значениями выражено сильнее для полного набора данных ($\Delta V_{вс}$) по сравнению с набором данных для ясных ночей ($\Delta V_{ясн}$). Это особенно заметно в летний сезон для моделей всех трех версий (см. рис. 7, *г, д, е*), а также в весенний, осенний и зимний периоды для HWM93 (*а, ж, к* соответственно). Напротив, для осени в HWM14 (*и*) наблюдается меньшее расхождение для набора данных для ясных ночей. Но одновременно с этим для трех сезонов HWM07 (*б, з, л*) и для зимы HWM14 (*м*) в выборке для ясных ночей отчетливо видно, что расхождение между модельными данными и данными измерений может и увеличиваться.

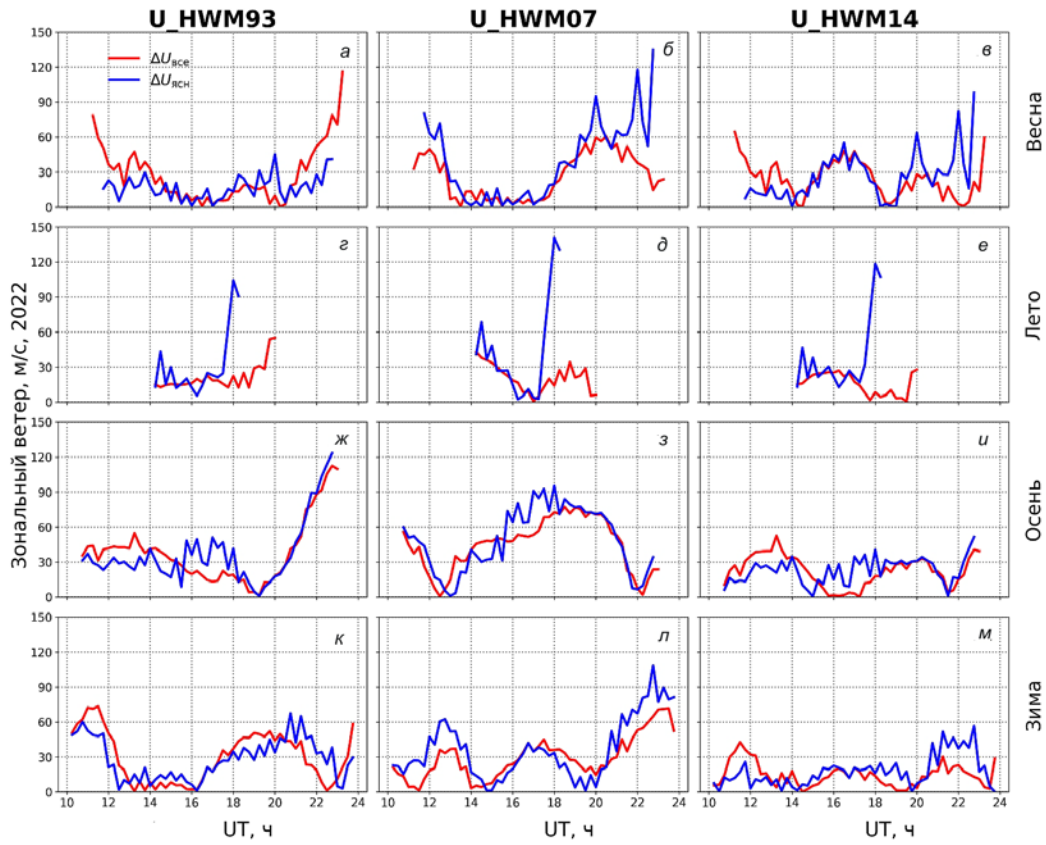


Рис. 6. Модуль среднего отклонения зональных компонент (измеренной и смоделированной). Красная линия $\Delta U_{\text{всe}}$ — расхождение между модельными данными и полным набором измерений (включая ясные и облачные ночи); синяя линия $\Delta U_{\text{ясн}}$ — расхождение между моделью и измерениями, полученными только в ясные ночи

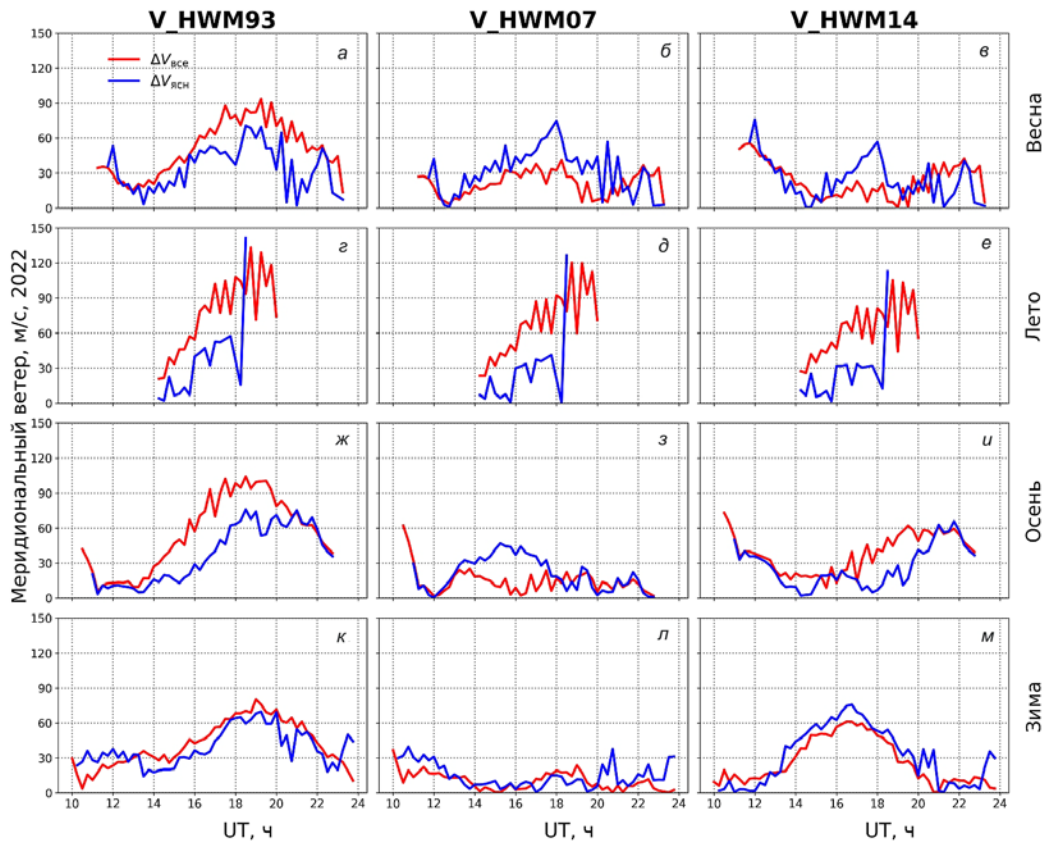


Рис. 7. Модуль среднего отклонения меридиональных компонент (измеренной и смоделированной). Красная линия $\Delta V_{\text{всe}}$ — расхождение между модельными данными и полным набором измерений (включая ясные и облачные ночи); синяя линия $\Delta V_{\text{ясн}}$ — расхождение между моделью и измерениями, полученными только в ясные ночи

Таблица 2

Данные для измерений без учета облачности

| Ветер | Версия модели | Среднее значение за ночь расхождения измерений и прогноза модели, м/с | | | | |
|---------------------|---------------|---|------|-------|------|-----|
| | | весна | лето | осень | зима | год |
| зональный, U | HWM93 | 17 | 17 | 37 | 26 | 22 |
| | HWM07 | 26 | 21 | 49 | 28 | 27 |
| | HWM14 | 21 | 13 | 18 | 14 | 16 |
| меридиональный, V | HWM93 | 50 | 78 | 56 | 36 | 53 |
| | HWM07 | 21 | 65 | 12 | 9 | 16 |
| | HWM14 | 22 | 61 | 42 | 19 | 32 |

Таблица 3

Данные для измерений ясных ночей

| Ветер | Версия модели | Среднее значение за ночь расхождения измерений и прогноза модели, м/с | | | | |
|--------------------|---------------|---|------|-------|------|-----|
| | | весна | лето | осень | зима | год |
| зональный U | HWM93 | 16 | 21 | 30 | 28 | 24 |
| | HWM07 | 35 | 27 | 51 | 31 | 33 |
| | HWM14 | 21 | 20 | 21 | 16 | 20 |
| меридиональный V | HWM93 | 35 | 27 | 35 | 34 | 53 |
| | HWM07 | 31 | 20 | 19 | 11 | 16 |
| | HWM14 | 22 | 21 | 23 | 30 | 32 |

В целом расхождения между измеренной и смоделированной меридиональными компонентами ветра достаточно велики для всех сезонов и всех моделей. В некоторых случаях для ясных ночей у меридионального ветра расхождение может превышать 60 м/с, для зонального ветра — 120 м/с.

В табл. 2 и 3 приведены средние значения расхождений между измеренными и модельными данными для каждого сезона для всех моделей. Зеленым цветом выделены наименьшие значения расхождений для заданного сезона и модели. Видно, что для зонального ветра наименьшее расхождение наблюдается с HWM14, а для меридионального ветра — с HWM07. При этом такая зависимость сохраняется как для полного набора измерений, так и для выборки, включающей только ясные ночи. Вычисление корреляции между рядами усредненных смоделированных и измеренных данных малоэффективно в рамках решаемой задачи, так как отражает преимущественно соответствие характера вариаций и не учитывает критически важные силу и направление ветра: хорошая корреляция не гарантирует соответствия ни по направлению, ни по амплитуде. Это

хорошо видно в сопоставлении данных табл. 3 и 4. Видно, что высокая корреляция не гарантирует низкого расхождения измерений с моделью: например, V_{93} имеет наибольшее расхождение 35 м/с при корреляции 0.92. Ячейки, демонстрирующие такое противоречие, выделены красным. Мы считаем, что согласие наблюдается только в случае $U_{93\text{весна}}$ (зеленая заливка). Промежуточные уровни соответствия показаны желтым. Таким образом, мы полагаем наиболее ценной частью исследования данные табл. 3.

Обобщая представленные в табл. 3 данные, можно с осторожностью заключить, что для региона Геофизической обсерватории (с. Торы) наилучшее соответствие наблюдениям демонстрируют HWM14 (для зональной компоненты ветра) и HWM07 (для меридиональной). Следует принять во внимание низкую статистическую значимость отдельных измерений и ограниченность учета влияния фазы солнечного цикла: наблюдения за один год не могут гарантировать высокой достоверности полученных выводов.

Проведенный анализ выявил также ряд факторов, способствующих расхождениям между модельными данными и наблюдениями. Во-первых, это геог-

Таблица 4

Корреляция рядов данных для ясных ночей

| Ветер | Версия модели | Коэффициент корреляции с данными FPI | | | |
|--------------------|---------------|--------------------------------------|--------|-------|-------|
| | | весна | лето | осень | зима |
| зональный U | HWM93 | 0.961 | 0.788 | 0.770 | 0.907 |
| | HWM07 | 0.735 | -0.836 | 0.023 | 0.762 |
| | HWM14 | 0.814 | 0.474 | 0.901 | 0.912 |
| меридиональный V | HWM93 | 0.927 | 0.495 | 0.889 | 0.962 |
| | HWM07 | 0.744 | 0.482 | 0.844 | 0.917 |
| | HWM14 | 0.684 | 0.495 | 0.668 | 0.620 |

рафическая ограниченность эмпирической базы модели: большинство наземных измерений, используемых при создании HWM, получены преимущественно в западном полушарии (Северная Америка, Европа). Вследствие этого при использовании моделей в восточном полушарии (например, в Восточной Сибири) могут возникать систематические ошибки, что подтверждается результатами другого исследования [Щербаков и др., 2015], в котором также отмечались несоответствия между предсказаниями модели и наблюдениями. Во-вторых, в отличие от HWM93, HWM07 и HWM14 не учитывают при расчетах значения индексов солнечной активности $F10.7$ и $F10.7A$ [Drob et al., 2008, 2015]. Как отмечают сами разработчики модели, это ограничение особенно сказывается при ночных наблюдениях, когда прямое воздействие солнечного излучения отсутствует, но сохраняется накопленное влияние ультрафиолетового излучения, определяющее глобальную циркуляцию в термосфере и соответственно структуру ветров [Drob et al., 2008]. Учитывая, что наши данные измерений получены в ночное время, отсутствие учета параметров солнечной активности может быть одной из причин систематических расхождений, выявленных в этом исследовании.

Дополнительно отметим, что выявленные в настоящем исследовании расхождения между наблюдаемыми и модельными данными компонент нейтрального ветра согласуются с результатами аналогичных зарубежных работ. Так, в исследованиях для средних широт Китая [Yao et al., 2015; Yang et al., 2020] показано также, что HWM систематически занижают или смещают амплитуды ночных ветров, а согласие существенно зависит от сезона и локального времени. При сравнении наблюдений интерферометра с модельными данными в Восточной Азии [Jiang et al., 2018] выявлены фазовые сдвиги порядка 1–3 ч и регионально обусловленные различия в величинах зонального ветра, аналогичные полученным нами для Байкальского региона. На высоких широтах Норвегии наблюдались аналогичные особенности: HWM14 корректно воспроизводила общую динамику, но демонстрировала значимые расхождения в ам-

плитуде и фазе [Xu et al., 2019]. Таким образом, наши результаты согласуются с выводами зарубежных исследований и подтверждают наличие выраженной региональной специфики в работе HWM, особенно в ночное время и на широтах, где эмпирическая база модели представлена недостаточно.

В дальнейшем это исследование можно развить в нескольких направлениях.

- Расширение временного диапазона наблюдений до нескольких лет позволит повысить статистическую значимость результатов.
- Сравнение данных наших измерений с результатами наблюдений других обсерваторий, расположенных в восточном полушарии (например, в Китае). Это могло бы подтвердить или опровергнуть существование региональных особенностей работы HWM.
- Принимая во внимание важность влияния солнечной активности для ночных прогнозов, можно обратиться к разработчикам модели с предложением учитывать индексы $F10.7$ и $F10.7A$ или попытаться разработать на основе HWM свою модель с включением этих индексов.
- Учитывая, что модели разных версий лучше описывают разные компоненты ветра, в дальнейшем можно предложить использование различных версий HWM в зависимости от решаемой задачи или времени года.

ВЫВОДЫ

В работе проведено сопоставление компонент горизонтального ветра, полученных по данным интерферометра Фабри—Перо, с результатами эмпирической HWM трех версий (HWM93, HWM07, HWM14). Сравнение проводилось отдельно для зональной и меридиональной компонент с разделением на сезоны и учетом влияния условий наблюдений (облачности).

Полученные результаты показали следующее.

- Для зональной компоненты ветра наилучшее соответствие с измерениями демонстрирует HWM14, особенно в осенний и зимний периоды.

- Для меридиональной компоненты наиболее близкие к измерениям значения дает HWM07. Направления ветра в большинстве случаев соответствуют измерениям.

- Во всех сезонах наибольшие расхождения между модельными и измеренными данными наблюдаются, как правило, в начале и конце ночи.

- Наличие облачности может влиять на достоверность данных, полученных интерферометром, занижая амплитуды измеренного ветра.

Ряд факторов может объяснять расхождения между модельными и измеренными значениями. В частности, в HWM07 и HWM14 не учитываются индексы солнечной активности $F10.7$ и $F10.7A$ в отличие от HWM93, что может объяснять лучшие результаты модели этой версии в отдельных случаях

Кроме того, HWM основана преимущественно на данных инструментов, расположенных в западном полушарии, тогда как измерения, используемые в работе, получены интерферометром Фабри—Перо в восточном полушарии (с. Торы, Республика Бурятия). Это объясняет снижение точности модели в подобных регионах.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения условий применимости HWM.

Результаты настоящей статьи были получены с использованием Уникальной научной установки «Оптические инструменты» ИСЗФ СО РАН [<https://ckprf.ru/catalog/usu/4138180/>]. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО «Scientific Arinae». *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 3, с. 70–87. <https://doi.org/10.12737/szf-33201707> / Vasiliev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., et al. Registration of upper atmosphere parameters in Eastern Siberia using the Fabry—Perot interferometer КЕО Scientific “Arinae”. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 61–75. <https://doi.org/10.12737/stp-33201707>.
- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Научные задачи оптических инструментов Национального гелиогеофизического комплекса. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 105–122. <https://doi.org/10.12737/szf-62202008> / Vasiliev R.V., Artamonov M.F., Beletskii A.B., et al. Scientific goals of optical instruments of the National Heliogeophysical Complex. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 84–97. <https://doi.org/10.12737/stp-62202008>.
- Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 6–18. <https://doi.org/10.12737/szf-62202001> / Zherebtsov G.A.. Complex of heliogeophysical instruments of new generation. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 3–13. <https://doi.org/10.12737/stp-62202001>.
- Матвеев Л.Т. *Курс общей метеорологии. Физика атмосферы*. Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 752 с.
- Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 4, с. 102–109. <https://doi.org/10.12737/szf-84202210> / Podlesny S.V., Devyatova E.V., Saunkin A.V., Vasiliev R.V. Comparing methods to estimate cloud cover over the Baikal Natural Territory in December 2020. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, iss. 4, pp. 95–102. <https://doi.org/10.12737/stp-84202210>.
- Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно возмущенных геомагнитных условий на средних широтах. *Солнечно-земная физика*. 2016, т. 2, № 4, с. 76–84. <https://doi.org/10.12737/21491> / Tashchilin A.V., Leonovich L.A. Modeling nightglow in atomic oxygen red and green lines under moderate disturbed geomagnetic conditions at midlatitudes. *Sol.-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 94–106. <https://doi.org/10.12737/24276>.
- Щербачев А.А., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. и др. Расчет нейтральных меридиональных ветров в средних широтах с помощью Иркутского радара НР. *Солнечно-земная физика*. 2015, т. 1, № 3, с. 37–48. <https://doi.org/10.12737/10962>.
- Drob D.P., Emmert J.T., She M., et al. An empirical model of the Earth’s horizontal wind fields: HWM07. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2008, vol. 113, iss. A12. <https://doi.org/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 Science*. 2015, vol. 2, pp. 301–319. <https://doi.org/10.1002/2014EA000089>.
- Emmert J.T., Faivre M.L., Hernandez G., et al. Climatologies of nighttime upper thermospheric winds measured by ground-based Fabry—Perot interferometers during geomagnetically quiet conditions: 1. Local time, latitudinal, seasonal, and solar cycle dependence. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2006, vol. 111, iss. A12. <https://doi.org/10.1029/2006JA011948>.
- Fuller-Rowell T.J., Rees D., Quegan S., et al. *A Coupled Thermosphere-Ionosphere Model (CTIM)*. In: Schunk R.W. (ed.) *Solar–Terrestrial Energy Program: Handbook of Ionospheric Models*. Logan, Utah State Univ. Press. 1996, pp. 217–238.
- Hedin A.E., Spencer N.W., Killeen T.L. Empirical global model of upper thermosphere winds based on Atmosphere and Dynamics Explorer satellite data. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1988, vol. 93, iss. A9, pp. 9959–9978. <https://doi.org/10.1029/JA093iA09p09959>.
- Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G., et al. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1991, vol. 96, iss. A5, pp. 7657–7688. <https://doi.org/10.1029/91JA00251>.
- Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H., et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1996, vol. 58, iss. 13, pp. 1421–1447. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00122-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00122-0).
- Holton J.R., Hakim G.J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 2012, 532 p.
- Jiang G., Xu J., Wang W., et al. A comparison of quiet-time thermospheric winds between FPI observations and model calculations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, pp. 7789–7805. <https://doi.org/10.1029/2018JA025424>.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bryukhanov V.V. Numerical modeling of the equatorial electrojet UT-variation on the basis of the model GSM TIP. *Adv. Radio Sci.* 2007, vol. 5, pp. 385–392. <https://doi.org/10.5194/ars-5-385-2007>.
- Okoh D., Bounhir A., Habarulema J.B., et al. Thermospheric neutral wind measurements and investigations across the African region — A review. *Atmosphere*. 2022, vol. 13, no. 6, p. 863. <https://doi.org/10.3390/atmos13060863>.
- Prölss G. *Physics of the Earth’s Space Environment: An Introduction*. Springer. 2012, 486 p.

- Richmond A.D., Maute A. Ionospheric electrodynamics modeling. In: *Modeling the Ionosphere–Thermosphere System*. Wiley, 2014, pp. 57–71.
- Richmond A.D., Ridley E.C., Roble R.G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics. *Geophys. Res. Lett.* 1992, vol. 19, iss. 6, pp. 601–604. <https://doi.org/10.1029/92GL00401>.
- Ridley A.J., Deng Y., Tóth G. The global ionosphere–thermosphere model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, pp. 839–864. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.01.008>.
- Xu H., Shiokawa K., Oyama S., et al. High-latitude thermospheric wind study using a Fabry — Perot interferometer at Tromsø in Norway: averages and variations during quiet times. *Earth, Planets and Space*. 2019, vol. 71, article 110. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1093-8>.
- Yang C., Zhao B., Jin Y., et al. Climatology of nighttime upper thermospheric winds from Fabry — Perot interferometer 2011–2019 measurements over Kelan (38.7 N, 111.6 E), China: Local time, seasonal, solar cycle, and geomagnetic activity dependence. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, iss. 9, e2020JA027892. <https://doi.org/10.1029/2020JA027892>.
- Yao X., Yu T., Zhao B., et al. Climatological modeling of horizontal winds in the mesosphere and lower thermosphere over a mid-latitude station in China. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, iss. 7, pp. 1354–1365. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.026>.
- URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/HWM14~2014/> (дата обращения 27 февраля 2026 г.).
- URL: <https://nom.esa.int/models/hwm> (дата обращения 27 февраля 2026 г.).
- URL: <https://github.com/timduly4/pyglow> (дата обращения 27 февраля 2026 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/> (дата обращения 27 февраля 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Будовкина А.А., Едемский И.К., Васильев Р.В., Артамонов М.Ф. 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. <https://doi.org/10.12737/szf-122202607>.