



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему «Результаты модификации модели горизонтального ветра
НWM: модель и эксперимент»

Исполнитель Шейнов Ростислав Андреевич

Руководитель д.ф.-м.н., доцент

Дробжева Яна Викторовна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н., доцент

Анискина Ольга Георгиевна

«27» мая 2022г.

Санкт-Петербург

2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Измерение скорости и направления ветра на высотах с помощью радиозонда	5
2 Описание модели ветра и её возможностей	10
3. База экспериментальных и модельных данных	15
3.1 Подготовка базы экспериментальных данных	15
3.1.1 Приведение экспериментальных данных высотных профилей направления и скорости ветра к формату модельных данных	16
3.2. Подготовка базы модельных данных	18
3.3 Осреднение высотных профилей направления и скорости ветра по модельным расчетам и по экспериментальным данным.	21
4 Оценка ошибок модельных расчетов направления и скорости ветра на основе экспериментальных данных	26
Заключение	47
Список используемых источников	49

ВВЕДЕНИЕ.

Актуальность: Международная модель горизонтального ветра (HWM) используется для исследования закономерностей атмосферы, также для расчета траектории падения отделяемых частей ракетносителей и более точного определения их места падения, а в случае его аварии для определения направления распространения токсичного облака, для определения направления распространения и размеров загрязнения в случае выбросов промышленных предприятий в городах, исследования распространения акустических волн от различных источников в атмосфере. В этой связи актуально оценить ее работоспособность.

Цель исследования: Оценка работоспособности модели ветра HorizontalWindModel 2014 на основе экспериментальных данных: сопоставление моделей HWM 2014 и HWM 1993 для станции города Йокийнен.

Задачи исследования:

- Сформировать базу данных измерений высотных профилей скорости и направления ветра для станции Йокийнен за каждый день января, апреля, июля и октября 2021 года;
- Сформировать базу данных индексов солнечной (F10.7) и геомагнитной активности (Ap) за каждый день выбранных месяцев в 2021 году в Йокийнене;
- Сформировать базу данных модельных высотных профилей скорости и направления ветра по моделям ветра HWM-14 и HWM-93 для станции Йокийнен за каждый день января, апреля, июля и октября 2021 года;
- Сформировать базу данных осредненных за месяц высотных модельных и измеренных профилей скорости и направления ветра для данной станции и выбранных месяцев;

- Провести совместный анализ измеренных и модельных профилей скорости и направления ветра: рассчитать ошибки модельных расчетов, выявить закономерности изменения ошибок;

- Провести совместный анализ моделей HWM -14 и HWM-93 с использованием данных измерений: исследовать результативность современной модификации модели HWM -14

Выпускная квалификационная работа бакалавра состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В первой главе описано измерение скорости и направления ветра с помощью радиозонда, местоположение аэрологической станции Йокиойнен, а также путь к получению данных о скорости и направлении ветра в различное время с сайта Вайоминг.

Во второй главе кратко описаны горизонтальные модели ветра, а также указаны новшества модели HWM -14.

В третьей главе описано составление измеренных и модельных баз данных, приведение измеренных баз данных к единому формату (узлы в м/с и неравномерный шаг в шаг величиной 1 км), а также как объясняется процесс осреднения.

В четвертой главе описан принцип расчета ошибок и анализ полученных осредненных высотных измеренных профилей направления и скорости ветра для станции Йокиойнен за январь, апрель, июль и октябрь 2021 года.

1 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ РАДИОЗОНДА

В проделанной работе использовались экспериментальные данные высотных профилей направления и скорости ветра за 4 месяца (среднесезонные значения за январь, апрель, июль и октябрь)каждого дня 2021 года для города Йокиойнен. Исследуемые величины обладают сильной изменчивостью при изменении высоты.

Для разработки прогнозов погоды и для различных научно-исследовательских целей, помимо прочей информации, очень важными являются сведения об изменении направления и скорости ветра с высотой. Одним из таких вариантов измерений будет являться радиозонд.

Аэростатный радиозонд – это аэрологический прибор, измеряющий давление, температуру и влажность воздуха и автоматически передающий по радиоволнам на Землю значения этих метеорологических элементов с разных высот во время подъёма в атмосфере. Радиозонд состоит из приёмников — чувствительных элементов (датчиков), преобразователей, превращающих малые перемещения чувствительных элементов в электрические величины, кодового устройства и лёгкого коротковолнового передатчика.

Поднимается радиозонд в определенные часы по мировому времени (UTC) с помощью шар-пилота на высоту до 30-40 км и одновременно при подъёме автоматически посылает кодированные сигналы, соответствующие показаниям прибора. Сигналы принимаются радиоприёмником в месте выпуска с действием по пространству вокруг на 150—200 км. [4]

Все данные, которые принимаются от радиозонда, обрабатываются и анализируются. Аэрологическое зондирование позволило точнее определять эволюцию синоптических процессов и состояние атмосферы. Положение радиозонда, направление его движения и скорость его перемещения непосредственно являются отображением направления и скорости ветра.

Данная зависимость определяется с помощью радиолокатора, зафиксированного на положении радиозонда в пространстве.

Информация, которую можно получить от радиозонда помогает при составлении различных типов прогнозов и облегчает работу таких служб, как МЧС, метеорологические службы, службы организации воздушного движения и т.д.

Наиболее объемный и общедоступный архив данных аэрологического радиозондирования за различные годы с различных аэрологических станций в квазиреальном режиме находится на сайте Университета штата Вайоминг в двух экземплярах: старой и новой версиях, которые дополняют друг друга.

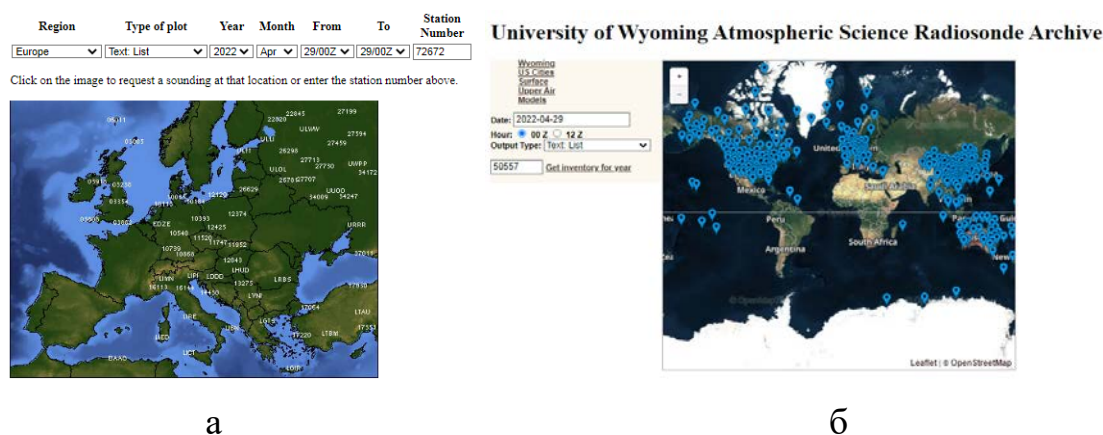


Рис.1.1 – Версии сайтов архива данных аэрологического радиозондирования Университета штата Вайоминг, где а - старая версия и б – новая версия.

В данной работе используются данные с аэрологической станции, расположенной в городе Йокийнене – город к северу от Хельсинки (синоптический индекс станции: 02963).

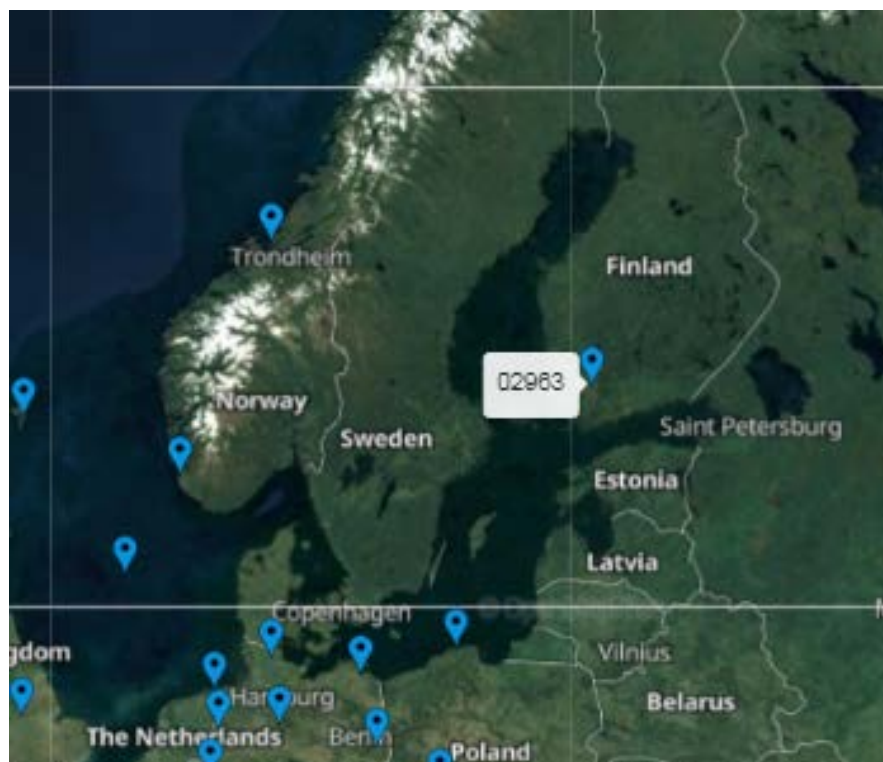


Рис. 1.2 - Местоположение аэрологической станции в городе Йокийнен (местоположение указано синей галочкой с синоптическим индексом).

Данная станция выбрана по ряду причин, среди которых главной является местоположение. В данном случае влияние прибрежной территории не такое сильное, но все равно при этом значимое.

По данной причине Йокийнен имеет влажный континентальный климат, но в прошлом он попадал в континентальную субарктическую зону, данная зависимость связана с влиянием урбанизации.



а



Köppen climate type
 ET (Tundra)
 Dfc (Subarctic)
 Dfb (Warm-summer humid continental)

б

Рис. 1.3 - Местоположение (город Йокиойнен указан красной звездой)аэрологической станции на физической и климатической картах

По результатам выполненных запусков на аэрологической станции, мы можем получить ежегодный список результатов, проведенных в течении года с периодичностью в среднем 6 часов.

2 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ВЕТРА И ЕЁ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

В качестве эмпирической модели HWM обеспечивает легкодоступное статистическое представление всеобъемлющей базы данных наблюдений.

Важным аспектом оценки коэффициентов модели HWM является анализ и сравнение перекрывающихся, частично перекрывающихся и разрозненных наборов данных. Сравнение данных и моделей облегчает идентификацию удаленных наборов данных, а также проверку новых приборов и методов измерений.

Модель HWM93 дает представление горизонтального поля ветра атмосферы Земли от земли до экзосферы (от 0 до 500 км). Она представляет собой более сорока лет спутниковых, ракетных, и наземных измерений ветра. Модель представляет собой функцию от географического местоположения, высоты, дня года, времени, а также солнечной и геомагнитной активности.

Версия модели нейтрального ветра HWM93 позволяет рассчитывать зональную и меридиональную компоненты скорости горизонтального нейтрального ветра в средней и верхней атмосфере. Положительное значение зональной компоненты соответствует восточному направлению. Тогда как положительное значение меридиональной компоненты обозначает северное направление.

Модель использует данные спутников, радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров Фабри — Перо. Для описания зональной и меридиональной компонент ветра используется ограниченный набор векторных сферических гармоник.

Сравнение различных наборов экспериментальных данных (вариаций) с помощью модели показывает в целом хорошее соответствие, особенно в средних и низких широтах. Наземные данные позволяют хорошо моделировать сезонные изменения в средних широтах. Вариации солнечной

активности учитываются, однако часто они оказываются непоказательными, они наиболее очевидны в более высоких широтах.

Входными параметрами эмпирической модели HWM-93 являются: номер дня в году, местное время, географическая широта, географическая долгота, высота, поток солнечного излучения на волне 10,7 см (F10.7), индекс A_p для выражения геомагнитной активности. Для солнечной активности используется среднее значение за три месяца и значение для предыдущего дня. Магнитный индекс берется в день моделирования.

Направление и скорость горизонтального нейтрального ветра зависят от геомагнитного состояния. В спокойном состоянии, когда весомую роль в характере нейтральных ветров играет солнечный нагрев, согласно модели ветра HWM93, на средних широтах северного полушария на высотах выше 100 км днём зональный ветер меняет направление. И так, когда Солнце находится на востоке, зональный ветер имеет отрицательное направление. Другими словами, перенос осуществляется из дневного полушария от области высокого давления в ночное полушарие. В тот момент, когда Солнце находится на западе, зональная компонента положительна.

На высотах, меньших 100 км, зональный ветер имеет преимущественно восточное направление (то есть зональная компонента положительна). На всех высотах днём меридиональный ветер приблизительно направлен к экватору (это значит, что меридиональная компонента ветра имеет отрицательные значения). Тогда, когда Солнце находится вблизи точки дневной кульминации в южном направлении от точки наблюдения, меридиональный ветер в основном имеет полярное направление (значит, что меридиональная компонента ветра положительна).[2,5]

исторические данные доступны как с помощью наземных, так и космических методов.

Модель HWM07 даёт возможность рассчитывать горизонтальный ветер при магнитных бурях.

Наибольшим отличиями от двух предыдущих моделей HWM14 то, что она включает измерения FPI Южного полюса с 1989 по 1999 год, которые были исключены из HWM07, представляет собой синтез измерений $\sim 73 \times 10^6$ из 44 различных инструментов, охватывающих более 60 лет, а также HWM14 исключает ночной спутник для исследования верхних слоев атмосферы длиной 630 нм (UARS), измерения интерферометром изображения ветра (WINDII), которые были включены в HWM07.

Табл.2.2 - Новые наблюдения за верхней термосферой [3]

Instrument	Location	Height (km)	Years	Local Time	Days	Points	Reference
<i>Fabry-Perot Interferometer</i>							
Arecibo	18.7°N, 67.5°W	250	2012–2013	nighttime	428	29,434	Ruan et al. [2013]
Arequipa	16.47°S, 71.49°W	250	2007–2013	nighttime	260	16,447	Meriwether et al. [2008]
Jicamarca	11.96°S, 76.86°W	250	2009–2013	nighttime	318	10,056	Meriwether et al. [2008]
Movil	14.97°S, 74.89°W	250	2011–2013	nighttime	293	10,412	Meriwether et al. [2008]
PARI ^a	35.2°N, 82.85°W	250	2011–2013	nighttime	166	12,610	Makela et al. [2012]
Poker Flat ^b	65.1°N, 147.5°W	250	2009–2011	nighttime	297	5,983,090	Conde and Smith [1995]
RENOIR ^c	6.89°S, 38.56°W	250	2009–2012	nighttime	637	37,301	Makela et al. [2013]
South Pole	90.0°S	250	1989–1999	nighttime	1,091	198,560	Hernandez et al. [1992]
<i>Satellite</i>							
GOCE ^d	± 83.4°	253–295	2009–2012	twilight	813	6,613,172	Doornbos et al. [2010]

^aPisgah Astronomical Research Institute.
^bImaging FPI.
^cRelocatable Equatorial Nighttime Observatory of Ionospheric Regions.
^dCross track only.

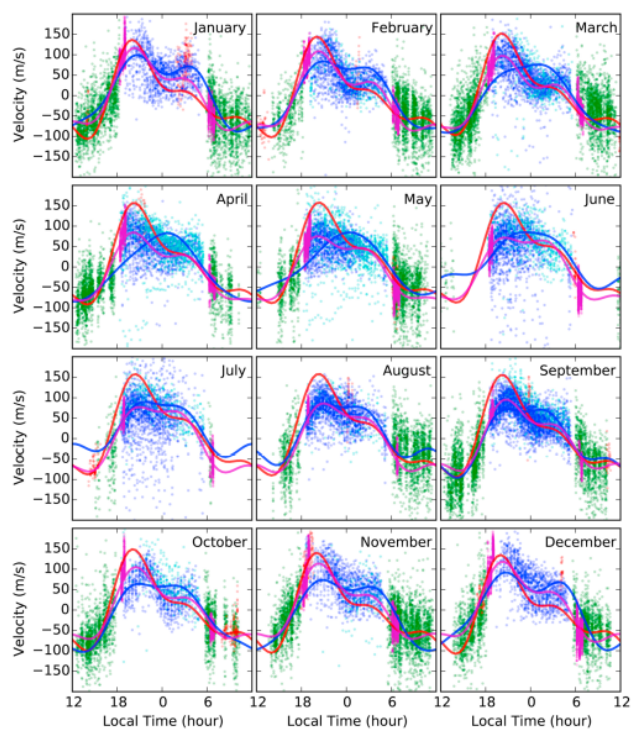


Рис. 2.1 - Сравнение HWM с зональными наблюдениями ветра между 225 и 300 км в пределах приблизительно $\pm 7,5^\circ$ широты Перемещаемой Экваториальной ночной обсерватории ионосферных регионов (RENOIR) FPI ($6,89^\circ$ С, $38,56^\circ$ ВТ). Приведенные наблюдения получены с помощью FPI RENOIR (синий), Jicamarca FPI (голубой), спутника GOCE (пурпурный), измерений WINDII 557,7 нм (зеленый) и DE2 WATS (красный). Результаты модели-HWM93 (красный), HWM07 (синий) и HWM14 (пурпурный) на расстоянии 250 км [3].

Горизонтальная модель ветра (HWM) позволяет рассчитать:

- направление ветра, измеряемое в градусах по часовой стрелке относительно земной поверхности, где началом будет направление на север;
- скорость ветра измеряется в м/с.

3 БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для исследования работоспособности модели ветра HWM93 и ее модификации HWM14 на основе экспериментальных данных необходимо сформировать базы высотных профилей измерений скорости и направления ветра и модельных профилей.

3.1 Подготовка базы экспериментальных данных

Как упоминалось ранее, для данной работы требуется создать архив данных с использованием сайта университета штата Вайоминг.

Архив состоит из высотных профилей направления и скорости ветра. Для получения нужных данных в разделе Soundings отмечаешь нужный город: в моем случае это Йокиойнен (02963), 2021 год, с 1 января по 31 января, с 1 по 30 апреля, с 1 по 31 июля и с 1 по 31 октября за 12 ВСВ.

Затем будет получена таблица с необходимой информацией по заданным условиям (например, Рис.1.4). Из таблицы с экспериментальными данными, полученной на аэрологической станции, выбираются определенные параметры, которые важны для последующих действий:

- 1) Высота в метрах;
- 2) Скорость ветра в узлах;
- 3) Направление ветра в градусах.

После получения экспериментальных данных, их нужно изменить, так чтобы величины измерений и моделей совпадали, например: скорости ветра различаются (модели в м/с, а измерения в узлах), но они должны быть приведены к единой системе измерения (оба формата должны быть в м/с).

3.1.1 Приведение экспериментальных данных высотных профилей направления и скорости ветра к формату модельных данных.

В процессе выполнения работы пришлось экспериментальные данные привести к формату модельных данных.

Для того чтобы, полученные экспериментальные данные привести к формату модельных данных, необходимо привести скорость ветра, измеряемую в узлах, к единице измерения – м/с по следующей формуле:

$$V[m/s] = V[knot] \times 0.514444444444, \quad (1)$$

где $V[knot]$ – скорость ветра в узлах.

Далее, данные измерений представлены с неравномерным шагом по высоте, а в модели шаг по высоте составляет 1 км.

Для представления высотных профилей скорости и направления ветра с шагом 1 км использована процедура интерполяции и экстраполяции.

Линейная интерполяция экспериментального высотного профиля направления ветра проводилась по следующей формуле:

$$dd(h) = dd(h_0) + \frac{dd(h_1) - dd(h_0)}{h_1 - h_0} (h - h_0), \quad (2)$$

где dd – направление ветра, h – значение высоты, для которой проводится интерполяция значения направления ветра, которое, в свою очередь, находится между экспериментальными значениями h_0 и h_1 .

С помощью процедуры экстраполяции получены значения направления ветра на высоте 0 км. Использовалась следующая формула:

$$dd(h) = dd(h_0) + \frac{dd(h_1) - dd(h_0)}{h_1 - h_0} (h - h_0), \quad (3)$$

где h меньше h_0 .

Для интерполяции экспериментального высотного профиля скорости ветра использовалась следующая формула:

$$v(h) = v(h_0) + \frac{v(h_1) - v(h_0)}{h_1 - h_0} (h - h_0), \quad (4)$$

где v – скорость ветра, h – значение высоты, для которой проводится интерполяция значения скорости ветра, которое, в свою очередь, находится между экспериментальными значениями h_0 и h_1 .

На высоте 0 км значения скорости ветра получены при помощи процедуры экстраполяции. Использовалась следующая формула:

$$v(h) = v(h_0) + \frac{v(h_1) - v(h_0)}{h_1 - h_0} (h - h_0), \quad (5)$$

где h меньше h_0 .

Для примера, на рисунке 3.1 и 3.2 представлены высотные профили скорости ветра и направления ветра, соответственно для 01.01.2021 до и после интерполяции.

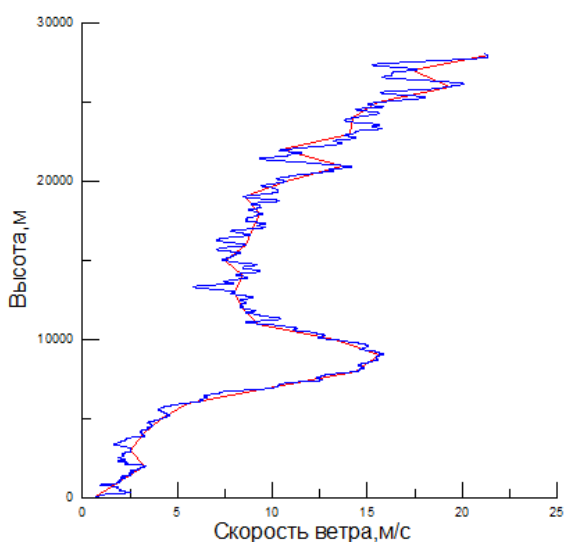


Рис 3.1 - Высотные профили скорости ветра за 01.01.2021 на станции Йокийнен: синяя (до) и красная (после) интерполяции и экстраполяции.

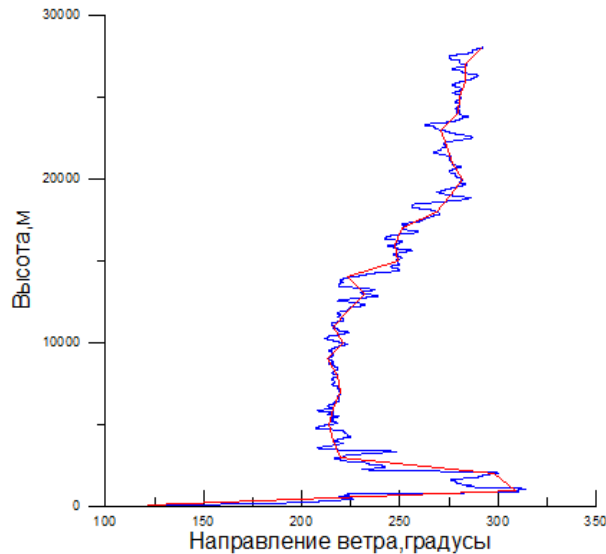


Рис 3.2 - Высотные профили направления ветра за 01.01.2021 на станции Йокийнен: синяя (до) и красная (после) интерполяции и экстраполяции.

В целом, интерполяционные кривые высотных профилей для решения поставленной задачи – оценки ошибки расчетов по эмпирической модели ветра являются достоверными, за исключением пропажи минимумов или максимумов.

3.2 Подготовка базы модельных данных

Вторым шагом в данной работе является формирование базы модельных данных по эмпирической модели ветра (HWM) для города Йокийнен для различных заданных условий.

При формировании базы данных модели необходимо рассчитать 256 высотных профилей направления и скорости ветра по двум программам моделей HWM93 и HWM14 за 4 выбранных месяца.

Для модельных расчетов необходимо знание индексов солнечной (F10.7) и геомагнитной активности (Ap).

Мерой фиксирования уровня солнечной активности является поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 нм – F10.7.

Наиболее часто используемый индекс для фиксирования геомагнитной активности (геомагнитных бурь) – Ap, который вычисляется для средних широт международной службой каждые три часа или в среднем за сутки, является мерой изменчивости геомагнитного поля. «A» имеет под собой понимание изменчивости индукции геомагнитного поля, а «p» под собой масштабность по всей планете (значения на обсерватории усредняются по планете). По значениям Ap можно зафиксировать условия от идеально спокойных до магнитных бурь.

По итогу были созданы базы данных F10.7 каждого дня в течение 4 выбранных месяцев, среднесезонные значения F10.7 для этих месяцев и значения Ap также для этого периода.

Для получения высотных профилей (скорости и направления ветра) использовались модели ветра (HWM93 и HWM14), где вводились следующие данные:

- интересующий день года от 1 до 365 (январь: 1-31, февраль: 32-59, март: 60-90 и так далее);
- время (любое в всв);
- необходимая высота, до которой необходимо рассчитать высотный профиль ветра (в моем случае 24 км);
- широта и долгота места (для города Йокиойнен – это 60.8°с.ш. и 23.5°в.д.);
- значения индекса солнечной активности F10.7;
- значения среднесезонного индекса солнечной активности F10.7;
- значение индекса геомагнитной активности Ap.

Пример входных данных представлен на рисунке 3.3.

```

Day of year from 1 to 365 <INTEGER>
1
Altitude to which we calculate from earth <INTEGER>
24
Universal time, sec <REAL>
12.
Geodetic latitude, deg <REAL>
60.8
Geodetic longitude, deg <REAL>
23.5
3 month average of F10.7 flux <REAL>
79.8
Daily F10.7 flux for previous day <REAL>
78.5
AP - magnetic index <daily> <REAL>
2.5_

year <INTEGER>
2021
MMDD <INTEGER>
0101
2021 1
Universal time, hour <REAL>
12.
minutes <REAL>
0.
seconds <REAL>
0.
12.000000 0.000000 0.000000
Altitude to which we calculate from earth <INTEGER>
24
Geodetic latitude, deg <REAL>
60.8
Geodetic longitude, deg <REAL>
23.5
3 month average of F10.7 flux <REAL>
79.8
Daily F10.7 flux for previous day <REAL>
78.5
AP - magnetic index <daily> <REAL>
2.5

```

а

б

Рис. 3.3 - Примеры ввода данных для 1 января программ моделей HWM93 (а) и HWM14 (б)

В результате выполненных действий были рассчитаны и получены высотные профили ветра (скорость и направление ветра) за каждый день 4 месяцев 2021 года по моделям HWM93 и HWM14.

Для примера, на рисунках 3.4 и 3.5 представлены модельные кривые зависимости скорости ветра и направления от высоты для 1 января 2021 г. за 12 UT для города Йокойнен.

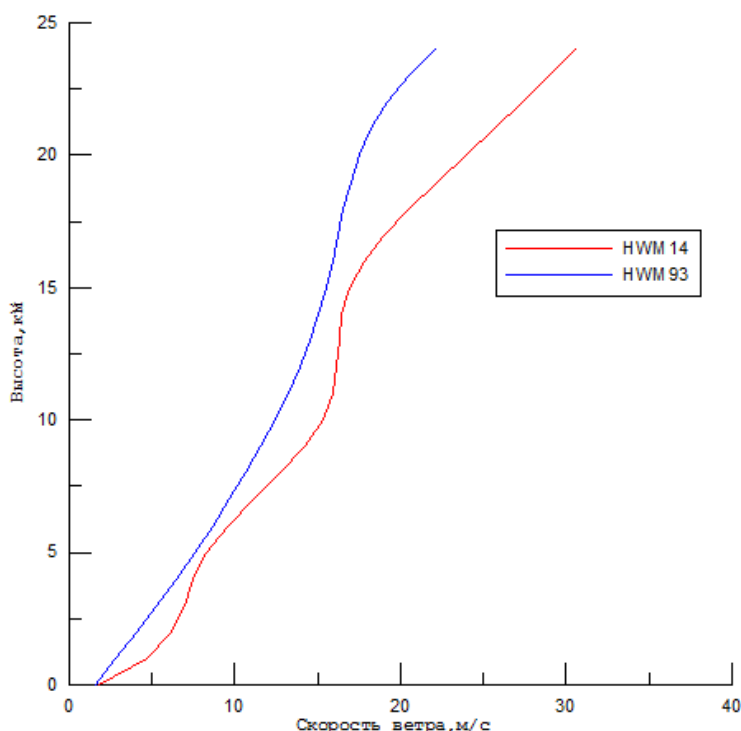


Рис. 3.4 - Модельные высотные профили скорости ветра, для 1 января 2021 года, где синяя линия это HWM93 и красная линия HWM14.

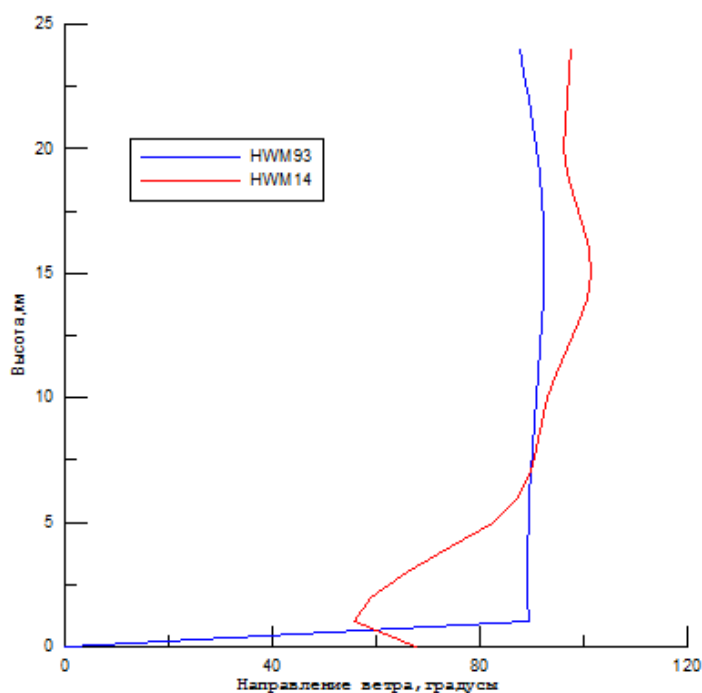


Рис. 3.5 - Модельные высотные профили направления ветра, для 1 января 2021 года, где синяя линия это HWM93 и красная линия HWM14.

3.3 Осреднение высотных профилей направления и скорости ветра по модельным расчетам и по экспериментальным данным

Следующим важным шагом данной работы будет являться осреднение полученных экспериментальных и модельных данных.

Чтобы решить задачу, которая была поставлена в предыдущем абзаце, будет использована специальная программа, основанная на языке FORTRAN. По итогу будут получены средние высотные профили направления и скорости ветра, включая доверительный интервал, и профили среднеквадратического отклонения.

Расчет среднеквадратичного отклонения для направления ветра проводился по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (dd_{im} - dd_{iex})^2}{N-1}}, \quad (6)$$

где dd_m – модельные значения направления ветра, dd_{ex} – экспериментальные значения скорости ветра, N – количество равноотстоящих отсчетов для дискретных данных направления ветра).

Расчет среднеквадратичного отклонения для скорости ветра проводился по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_{im} - v_{iex})^2}{N-1}}, \quad (7)$$

где v_m – модельные значения скорости ветра, v_{ex} – экспериментальные значения скорости ветра, N – количество равноотстоящих отсчетов для дискретных данных направления ветра).

Рассчитанные среднеквадратические отклонения для направления и для скорости ветра позволяют рассчитать доверительные интервалы высотных профилей средних значений направления и скорости ветра по формуле:

$$I_{\beta} = (m - \varepsilon_{\beta}; m + \varepsilon_{\beta}), \quad (8)$$

где m – среднее значение направления или скорости ветра,

$$\varepsilon_{\beta} = t_{\beta} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}, \quad (9)$$

где n – число независимых измерений,

$$t_{\beta} = \arg\Phi\left(\frac{1+\beta}{2}\right), \quad (10)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (11)$$

– интеграл вероятностей для нормально распределенной случайной величины, β – задаваемая в опыте величина вероятности. В данном случае предполагается определить доверительные интервалы для средних значений направления и скорости ветра с вероятностью $\beta=0.95$.

Возможность использования нормального закона распределения случайной величины (в данном случае m) определяется следующими соображениями [1, с.130]. Так как величина m представляет собой сумму n – независимых одинаково распределенных случайных величин x_i (в данном случае величин направления и скорости ветра). Согласно центральной предельной теореме, большинство встречающихся на практике случайных величин, например такие, как ошибки измерений, могут быть представлены как суммы весьма большого числа сравнительно малых слагаемых – элементарных ошибок, каждая из которых вызвана действием отдельной причины, не зависящей от остальных.

Каким бы законам распределения ни были подчинены отдельные элементарные ошибки, особенности этих распределений в сумме большого числа слагаемых нивелируются, и сумма оказывается подчиненной закону, близкому к нормальному. На практике даже при относительно небольшом числе слагаемых (порядка 10...20) закон распределения суммы можно приближенно считать нормальным.

Программа расчёта среднеквадратичного отклонения, доверительных интервалов с левой и правой стороны для направления и скорости ветра запускается в каждой папке, в которых имеются пронумерованные (например 1 файл в папке января это 1 января) файлы с проинтерполированными профилями направления и скорости ветра для экспериментальных данных за каждый день 4 выбранных месяцев 2021 года за 12UTC. Программа создана таким образом, что при запуске вводятся номер первого файла и номер последнего файла, пример указан на рисунке 3.6, по количеству которых следует осреднить высотный профиль направления и скорости ветра.

```
Number of first file (from 1 to 75), Integer
1
Number of last file (from 1 to 75), Integer
31
```

Рис.3.6 – Пример ввода данных для осреднения

На выходе получаются два файла в формате DAT:

- 1) В первом выходном файле (azimuth.dat) содержится информация о высоте в км в первом столбце, направления ветра в градусах во втором столбце, среднеквадратическое отклонение в третьем столбце, в четвертом и в пятом столбце – доверительный интервал слева и справа.
- 2) Во втором выходном файле (v.dat) содержится аналогичная первому выходному файлу, но только для скорости ветра.

По итогу проделанного этапа работы получено 12 пар (azimuth.dat+v.dat) осредненных файлов для высотных профилей скорости и направления ветра для экспериментальных и модельных данных.

Все полученные значения потребуются для дальнейшего сопоставления осредненных рассчитанных модельных профилей и имеющихся

экспериментальных проинтерполированных осредненных профилей направления и скорости ветра, а также для оценки стандартного отклонения.

4 ОЦЕНКА ОШИБОК МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЕТРА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Главными целями данного пункта является визуализация профилей направления и скорости ветра, анализ зависимостей и выявление определенных закономерностей, которые получены по моделям ветра (HWM) для различных месяцев 2021 года.

Экспериментальные значения направления и скорости ветра, используемые в работе, получены на основе аэрологических наблюдений максимально до высоты 30 км, а модельные расчеты, проводились до высот, которые соответствуют наиболее частым высотам среди экспериментальных данных (в данной работе до 23 километров).

Для оценки ошибки расчетов направления и скорости ветра по эмпирической модели ветра HWM был проведен совместный качественный анализ экспериментальных и модельных данных высотных профилей направления и скорости ветра для города Йокиойнена для 2021 года за 12UTC.

Оценка модели происходит по такому принципу, что если профили ветра, рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93, находятся внутри доверительных интервалов, то такие профили с вероятностью 95% соответствуют эксперименту, также если линии моделей будут лежать на сплошной линии, то модель будет идеальна. В других же случаях, если они находятся за краями, то значения будут неудовлетворительными (завышенными или заниженными).

Для количественной оценки модельных расчетов скорости и направления ветра для января, апреля, июля, октября 2021 г., 12 UT для станции Йокиойнен были рассчитаны абсолютные и относительные ошибки.

Абсолютная ошибка модели – погрешность модельного расчета по сравнению с экспериментальными данными (применительно к данной работе).

Относительная ошибка модели – погрешность модельного расчета, выраженная отношением абсолютной ошибки модели к экспериментальному значению направления и скорости ветра (применительно к данной работе).

Вычисление абсолютной ошибки расчета для высотного профиля направления ветра проводилось по следующей формуле:

$$\Delta dd = dd_m - dd_{ex}, \quad (12)$$

где dd_m – модельное значение направления ветра, dd_{ex} – экспериментальное значение направления ветра.

Вычисление абсолютной ошибки расчета для высотного профиля скорости ветра проводилось по следующей формуле:

$$\Delta v = v_m - v_{ex}, \quad (13)$$

где v_m – модельное значение скорости ветра, v_{ex} – экспериментальное значение скорости ветра.

Вычисление относительной ошибки расчета для высотного профиля направления ветра проводилось по следующей формуле:

$$\delta dd = \frac{\Delta dd}{dd_{ex}} * 100\%, \quad (14)$$

где Δd – абсолютное значение ошибки расчета для высотного профиля направления ветра, d_{ex} – экспериментальное значение направления ветра.

Вычисление относительной ошибки расчета для высотного профиля скорости ветра проводилось по следующей формуле:

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v_{ex}} * 100\%, \quad (15)$$

где Δv – абсолютное значение ошибки расчета для высотного профиля скорости ветра, v_{ex} – экспериментальное значение скорости ветра.

Осредненные за январь модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили скорости ветра и среднеквадратическое отклонение, а также абсолютная и относительная ошибки модельных расчетов для всей высотной области представлены на рисунке 4.1.

Ход высотного профиля измеренных данных по скорости ветра за январь таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 2 м/с;
- До высоты примерно 300 гПа или примерно до 9 километров идет увеличение до 7-12 м/с. На данном уровне зафиксирован максимум в тропосфере, это связано с тем, что на данной высоте очень характерна высокая зависимость от струйных течений, то есть будет повышение скорости ветра;
- После этого идет уменьшение до 4-6 м/с на высоте примерно 12 километров. Это связано с тем, что чаще всего на данной широте и высоте находится тропопауза. Известно, что чем больше будет температура, то ветра будут становиться сильнее и наоборот. По температуре эта часть является самой холодной из-за минимальных температурных градиентов, в следствие чего и наблюдается минимум на данной высоте;

- С высоты 12 километров идет постепенное увеличение скорости ветра до 8-13 м/с. Данное увеличение связано с тем, что с повышением высоты будет увеличиваться поглощение поступающей солнечной радиации, то есть будет увеличиваться температура. А как сказано ранее, то скорость ветра будет тоже увеличиваться.

- Модельные расчеты HWM14 и HWM93 сопоставимы со значениями у фактических данных наблюдений, так как их значения находятся внутри доверительного интервала до уровня 9 километров, а выше этого уровня значения у моделей становятся завышенными по сравнению с фактическими данными.
- Значения среднеквадратического отклонения у фактических данных измерений с 105 метров до 9 километров увеличивается до 6,5 м/с, далее идет уменьшение до 14 километров до 2 м/с, а в конце снова увеличение до 23 километров до 6 м/с.

Из анализа графиков, представленных на рисунке 4.1, видно, что кривые, рассчитанные по модели HWM93 и HWM14, практически во всем интервале области высот от 0 до 9 километров с вероятностью 95% соответствует измеренному профилю. При этом кривая, значения моделей выше этой области с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю, то есть области верхней тропосферы и нижней стратосферы.

Таким образом, только в области высот от 0 до 8 км для середины зимнего сезона модель HWM93 адекватно описывает высотное распределение скорости ветра. При этом среднеквадратическое отклонение составляет в диапазоне 1,5-6,5 м/с, например, максимум в 6,5 м/с соответствует высоте 9 км. А модель HWM14 не адекватно отражает реальную картину на всем высотном промежутке.

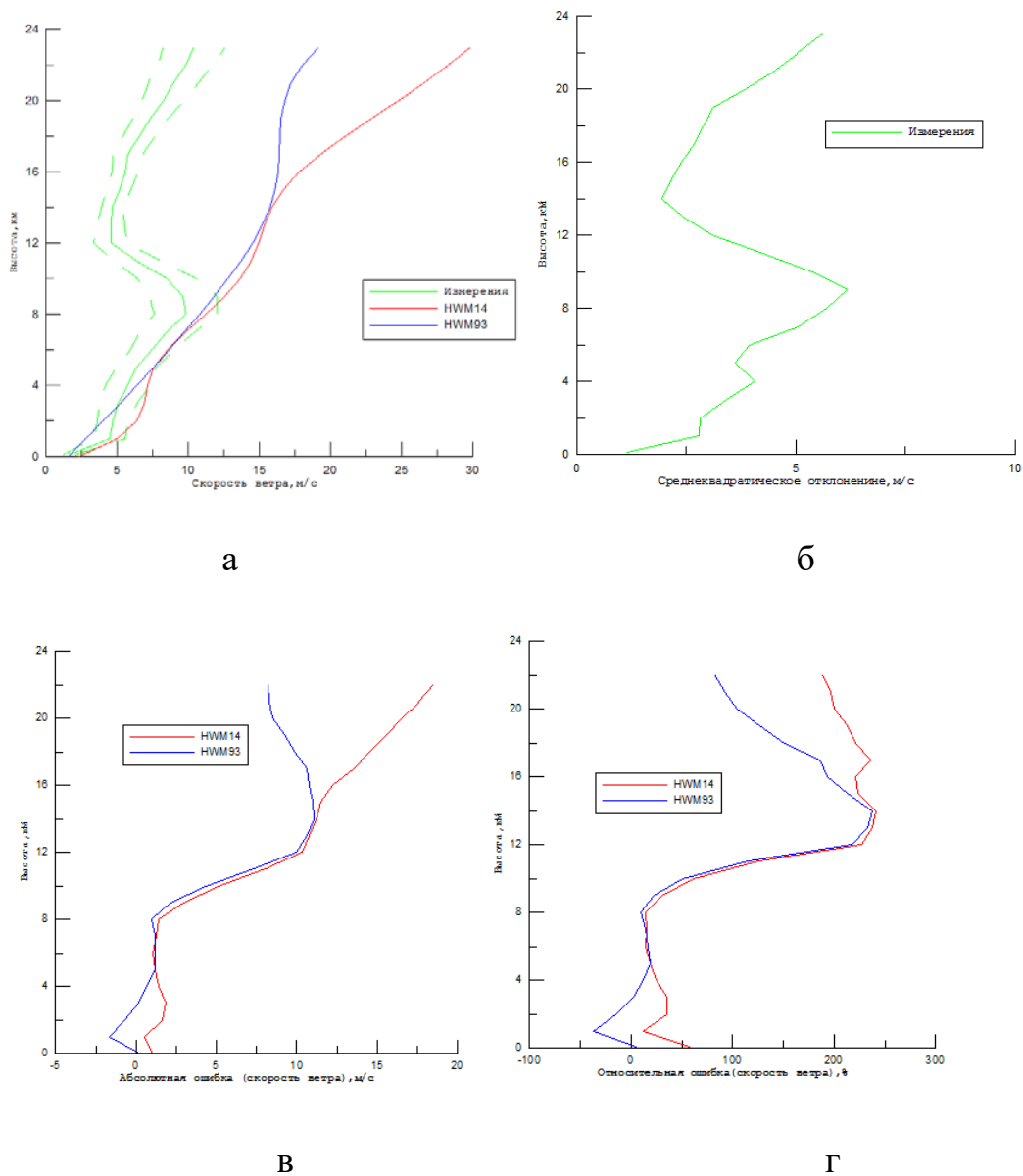


Рис. 4.1 – Изменения скорости ветра с высотой (а),среднеквадратического отклонения (б), абсолютной ошибки (в) и относительной ошибки (г) в январе 2021 года: измеренные значения - сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала -прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Оценка абсолютной ошибки расчета модельных профилей, полученных по модели горизонтального ветра HWM93 для января, для высотной области до 9 км показала, что, в целом, с высотой значение абсолютной ошибки

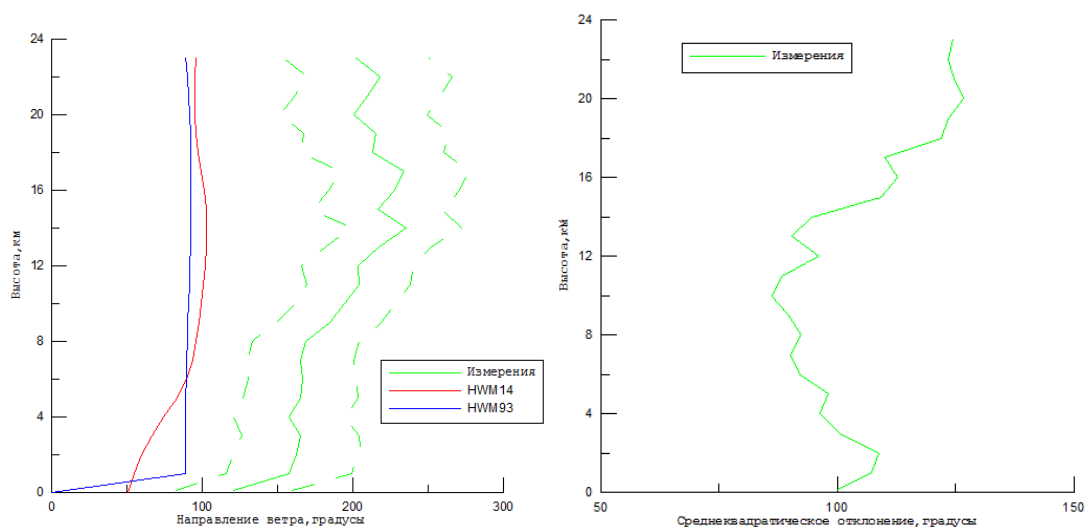
увеличивается, достигая значения 2,2 м/с на высоте 9 км, что составило 19%. Анализ изменения с высотой относительной ошибки расчета скорости ветра по модели HWM93 показал, что в диапазоне до 9 км, в целом, также увеличивается, достигая значения 22,6% на высоте 9 км. При этом в остальной части высотной области максимальное значение данной ошибки составило около 28%. А модель HWM14 не адекватно отражает реальную картину на данном высотном промежутке.

Средняя по высотному профилю ошибка модельных расчетов для января и высотной области до 9 км составила 0,53 м/с.

На рисунке 4.2 представлены осредненные за январь модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили направления ветра и среднеквадратическое отклонение.

Ход высотного профиля измеренных данных по направлению ветра за январь таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 80-155 градусов;
- До высоты примерно 14 километров идет изменение направления до 190-260 градусов;
- После этого идет изменение направления до 150-270 градусов.



а

б

Рис. 4.2 – Изменения направления ветра с высотой (а) и среднеквадратического отклонения (б) в январе 2021 года: измеренные значения -сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (НWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (НWM14) - красная линия

Модели горизонтального ветра на всех уровнях от 105 метров до 23 километров показывают неудовлетворительные показания азимута ветра относительно фактических данных измерений.

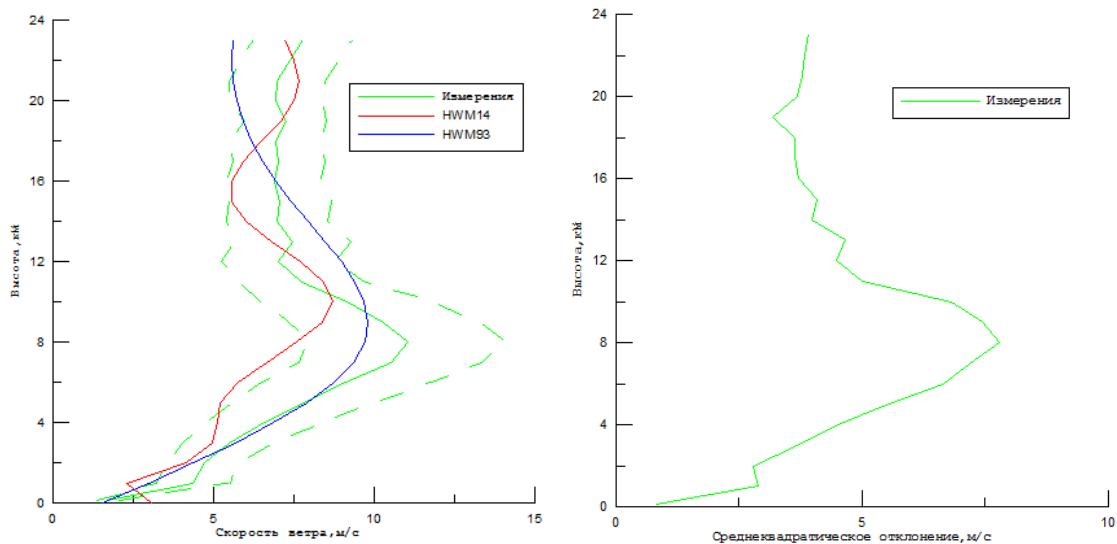
Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели НWM93и НWM14, во всем интервале области высот от 0 до 23 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю. При этом кривая, рассчитанная по модели НWM14, располагается ближе к границам доверительного интервала и старается отображать экстремумы и изменения, полученные от данных измерений.

Таким образом, высотные профили направления ветра, рассчитанные по обеим модели, не адекватно отражает реальную картину на всем высотном промежутке.

На рисунке 4.3 представлены осредненные за апрель модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили скорости ветра и среднеквадратическое отклонение, а также абсолютная и относительная ошибки модельных расчетов для всей высотной области.

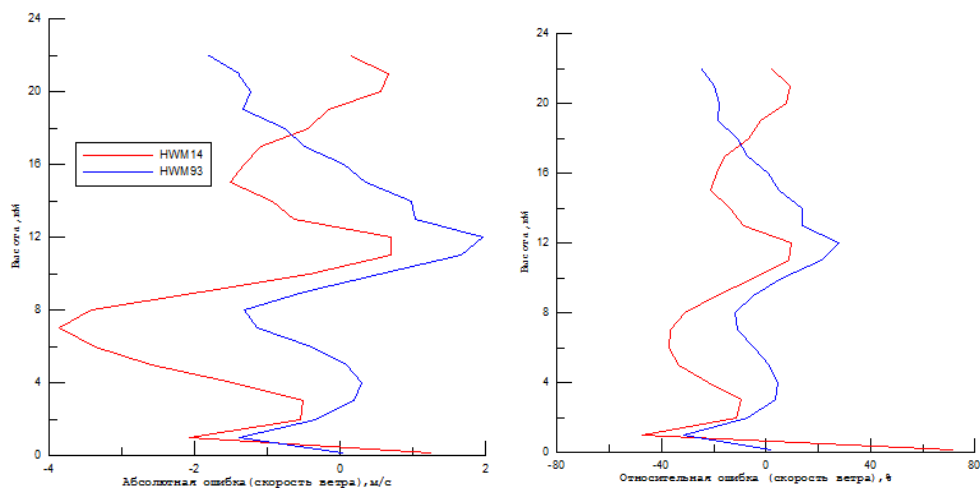
Ход высотного профиля измеренных данных по скорости ветра за апрель таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 2 м/с;
- До высоты 9 километров идет увеличение до 8-12 м/с. На данном уровне зафиксирован максимум в тропосфере;
- После этого идет уменьшение до 5-9 м/с на высоте примерно 13 километров. На данном уровне зафиксирован минимум.
- С высоты 13 километров идет постепенное увеличение скорости ветра до 6,5-10 м/с. В данном участке присутствует лишь медленное увеличение из-за небольшого температурного градиента.



а

б



в

г

Рис. 4.3 – Изменения скорости ветра с высотой (а), среднеквадратического отклонения (б), абсолютной ошибки (в) и относительной ошибки (г) в апреле 2021 года: измеренные значения - сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия

Модели HWM14 и HWM93 сопоставимы со значениями у фактических данных наблюдений, так как их значения находятся внутри доверительного интервала на протяжении всего хода линии, но у HWM93 более приближен к центру пространства, заключенного между границами доверительного интервала.

Значения среднеквадратического отклонения у фактических наблюдений с 105 метров до 9 километров увеличивается до 8 м/с, далее идет уменьшение до 18 километров до 3 м/с, а в конце снова увеличение до 23 километров до 3,5 м/с.

Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели HWM93 и HWM14, в целом практически во всем интервале области высот от 0 до 23 километров с вероятностью 95% соответствует измеренному профилю. При этом кривая модели HWM14, значения которой выходят в области высот от 2 до 9 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю, то есть области верхней тропосферы и нижней стратосферы.

Таким образом, для середины весеннего сезона модель HWM93 более адекватно описывает высотное распределение скорости ветра по сравнению с моделью HWM14, но выше 9 километров можно использовать обе модели. При этом среднеквадратическое отклонение составляет в диапазоне 0,5-8 м/с, например, максимум в 8 м/с соответствует высоте 9 км.

Оценка абсолютной ошибки расчета модельных профилей, полученных по модели горизонтального ветра HWM93 для апреля, для высотной области до 9 км показала, что, в целом, с высотой значение абсолютной ошибки уменьшается, достигая минимального значения -1,3 м/с на высоте 8 км, что составило 12%. При этом в остальной высотной области максимальное значение данной ошибки составило около 2 м/с. Анализ изменения с высотой относительной ошибки расчета скорости ветра по модели HWM93 показал, что в диапазоне до 9 км, в целом, также уменьшается, достигая значения -

12% на высоте 8 км. При этом в остальной части высотной области максимальной значение данной ошибки составило около 28%. А модель HWM14 не адекватно отражает реальную картину на данном высотном промежутке.

Средняя по высотному профилю ошибка модельных расчетов для апреля и высотной области до 9 км составила -0,44 м/с.

На рисунке 4.4 представлены осредненные за апрель модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили направления ветра и среднеквадратическое отклонение.

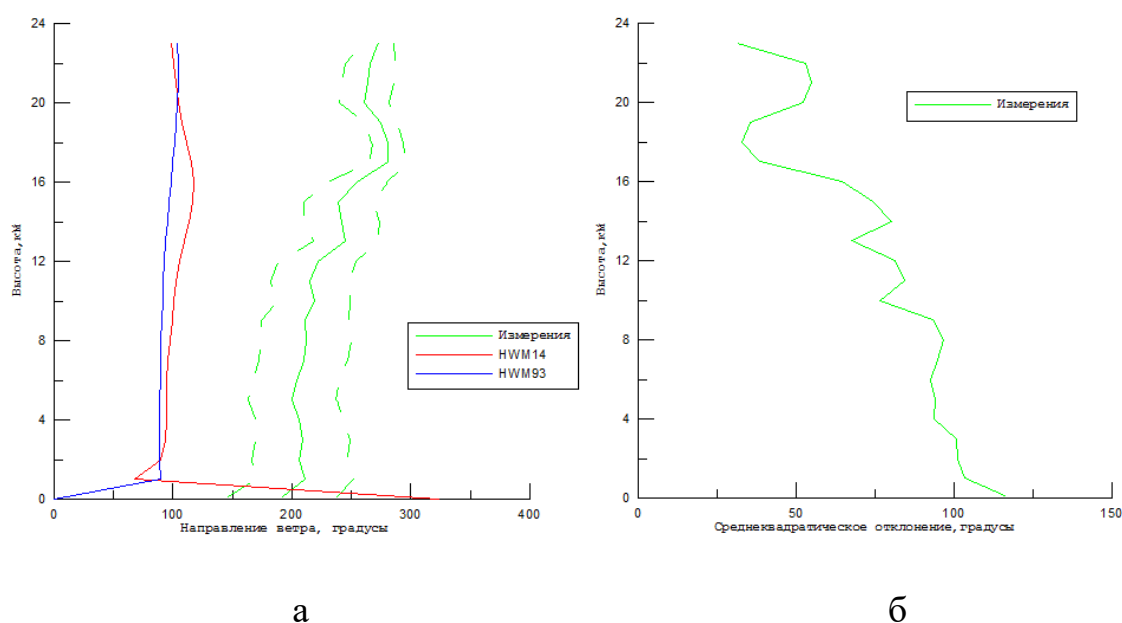


Рис. 4.4 – Изменения направления ветра с высотой (а) и среднеквадратического отклонения (б) в апреле 2021 года: измеренные значения -сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Ход высотного профиля измеренных данных по направлению ветра за апрель таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 145-240 градусов;
- До высоты примерно 17 километров идет изменение направления до 260-290 градусов;
- После этого идет изменение направления до 250-280 градусов.

Модели горизонтального ветра на всех уровнях от 105 метров до 23 километров показывают неудовлетворительные показания азимута ветра относительно фактических данных измерений.

Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели HWM93 и HWM14, во всем интервале области высот от 0 до 23 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю.

Таким образом, для середины весеннего сезона модель обе модели не адекватно отражают реальную картину.

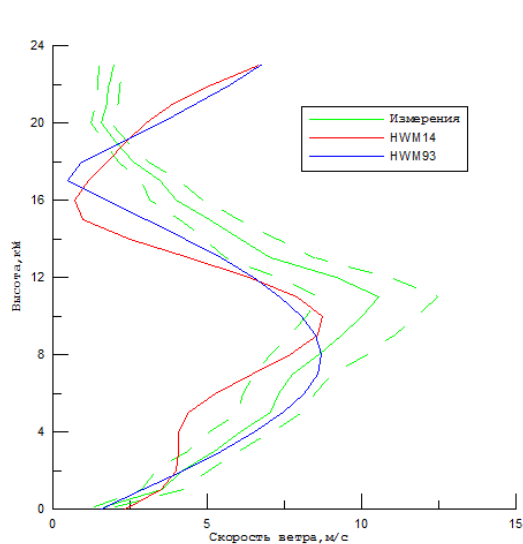
На рисунке 4.5 представлены осредненные за июль модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили скорости ветра и среднеквадратическое отклонение, а также абсолютная и относительная ошибки модельных расчетов для всей высотной области.

Ход высотного профиля измеренных данных по скорости ветра за июль таков:

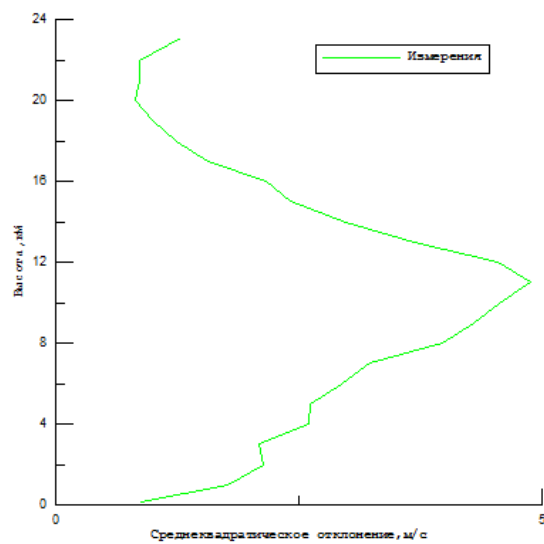
- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 2 м/с;
- До высоты 12 километров идет увеличение до 8,5-12,5 м/с. На данном уровне зафиксирован максимум;

- После этого идет уменьшение до 20 километров 1,5-2 м/с. На данном уровне зафиксирован минимум.

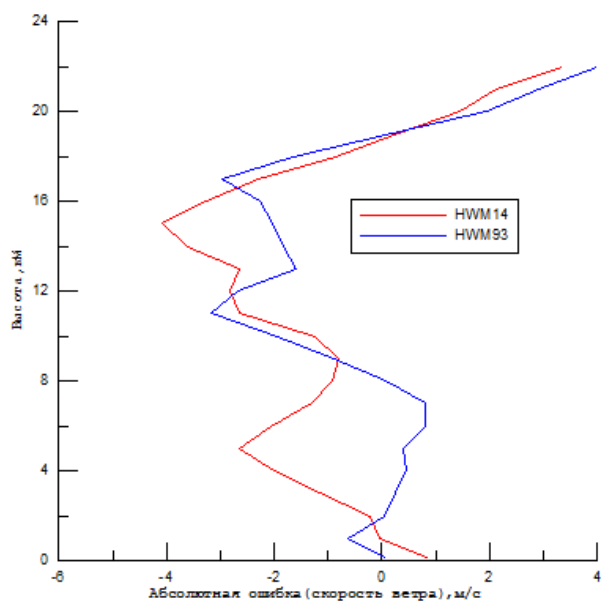
- До высоты 23 километров идет небольшое увеличение скорости ветра до 2-2,5 м/с. В данном участке присутствует лишь медленное увеличение из-за небольшого температурного градиента.



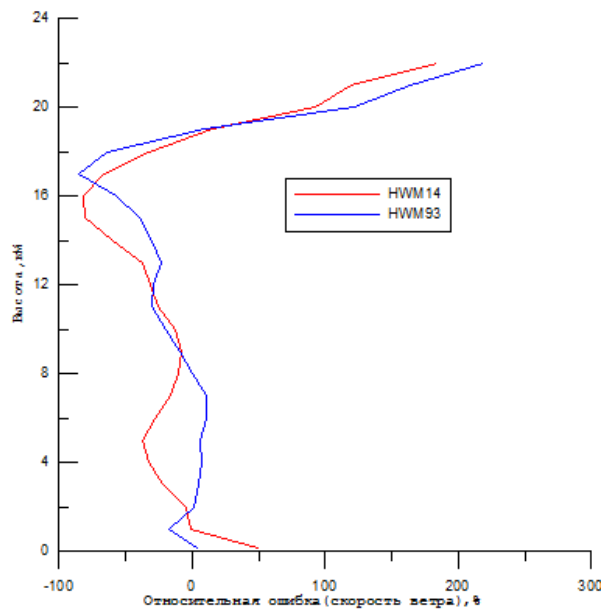
а



б



в



г

Рис. 4.5 – Изменения скорости ветра с высотой (а), среднеквадратического отклонения (б), абсолютной ошибки (в) и относительной ошибки (г) в июле 2021 года: измеренные значения -сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала -прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Модельные профили в целом сопоставимы со значениями у фактических данных наблюдений, так как их значения находятся внутри доверительного интервала на протяжении всего хода линии до высоты тропопаузы.

Значения среднеквадратического отклонения у фактических наблюдений с 105 метров до 12 километров увеличивается до 5 м/с, далее идет уменьшение до 20 километров до 1 м/с, а в конце снова увеличение до 23 километров до 1,5 м/с.

Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели HWM93 в интервале области высот от 0 до 12 километров с вероятностью 95% соответствует измеренному профилю. При этом кривая модели HWM14, значения которой незначительно выходят в области высот от 2 км до 7 км и от 12 км до 23 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю.

Таким образом, для середины летнего сезона модель HWM93 более адекватно описывает высотное распределение скорости ветра по сравнению с моделью HWM14. При этом среднеквадратическое отклонение составляет в диапазоне 0,5-8 м/с, например, максимум в 8 м/с соответствует высоте 9 км.

Оценка абсолютной ошибки расчета модельных профилей, полученных по модели горизонтального ветра HWM93 для июля, для высотной области от 0 до 12 км показала, что, в целом, с высотой значение абсолютной ошибки увеличивается, достигая значения 0,8 м/с на высоте около 6 км, что составило 9,8%. При этом в остальной высотной области максимальное значение данной ошибки составило около 4 м/с. Анализ изменения с высотой относительной ошибки расчета скорости ветра по модели HWM93 показал, что в диапазоне до 12 км, в целом, также увеличиваются, достигая значения 11% на высоте 6 км. При этом в остальной части высотной области максимальное значение данной ошибки составило около 217%. А модель

HWM14 не адекватно отражает реальную картину на данном высотном промежутке.

Средняя по высотному профилю ошибка модельных расчетов для июля и высотной области до 9 км составила: -0,49 м/с.

На рисунке 4.6 представлены осредненные за июль модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили направления ветра и среднеквадратическое отклонение.

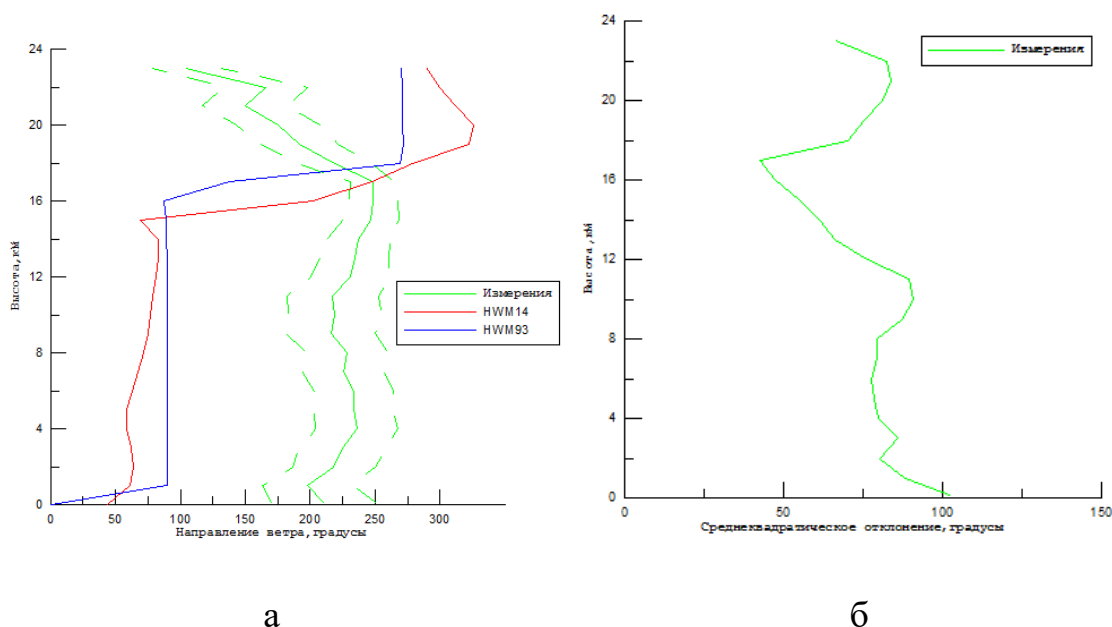


Рис. 4.6 – Изменения направления ветра с высотой (а) и среднеквадратического отклонения (б) в июле 2021 года: измеренные значения -сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Ход высотного профиля измеренных данных по направлению ветра за июль таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 170-250 градусов;
- До высоты примерно 11 километров идет изменение направления до 185-255 градусов;
- После этого идет изменение направления до 80-135 градусов.

Модели горизонтального ветра на всех уровнях от 105 метров до 23 километров показывают неудовлетворительные показания азимута ветра относительно фактических данных измерений, но НWM14в целом показывают более приемлемые.

Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели НWM93и НWM14, в целом во всем интервале области высот от 0 до 23 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю. При этом кривые, рассчитанные по моделямНWM93и НWM14, в области высот от 17 км до 19 км с вероятностью 95% соответствует измеренному профилю.

Таким образом, для середины летнего сезона нельзя назвать предпочтительную модель, но НWM14 может оказаться более приемлемой, так как старается отображать колебания высотного профиля данных, полученных от измерений. При этом среднеквадратическое отклонение составляет в диапазоне от 40 до 100 градусов, а максимум в100градусовприходится на область у поверхности земли.

На рисунке 4.7 представлены осредненные за октябрь модельные (рассчитанные по моделям НWM14 и НWM93) и измеренные высотные профили скорости ветра и среднеквадратическое отклонение, а также абсолютная и относительная ошибки модельных расчетов для всей высотной области.

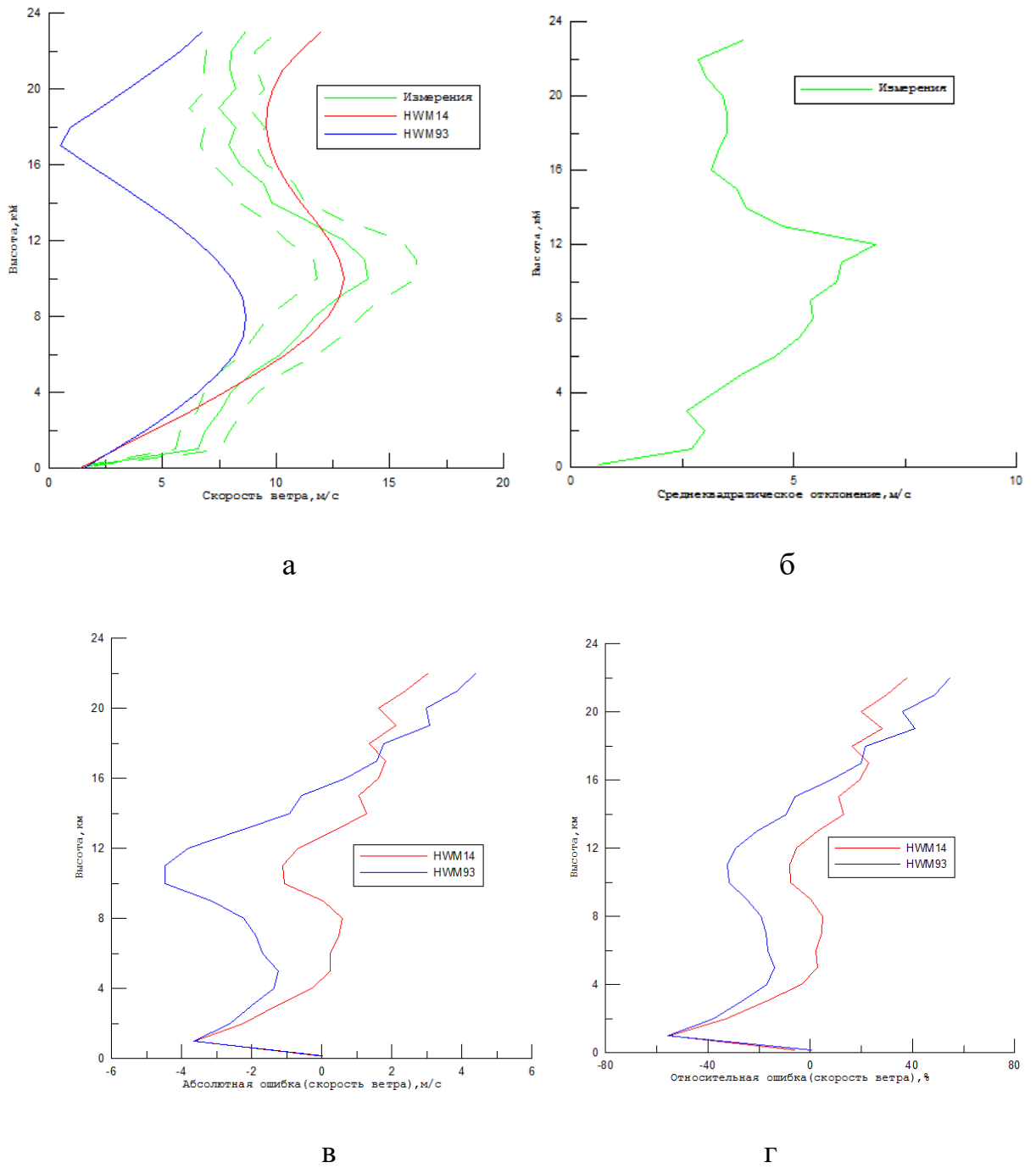


Рис. 4.7 – Изменения скорости ветра с высотой (а), среднеквадратического отклонения (б), абсолютной ошибки (в) и относительной ошибки (г) в октябре 2021 года: измеренные значения - сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Ход высотного профиля измеренных данных по скорости ветра за октябрь таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 2 м/с;
- До высоты 11 километров идет увеличение до 12-16 м/с. На данном уровне зафиксирован максимум;
- После этого идет уменьшение до 19 километров 7-9,5 м/с.
- До высоты 23 километров идет небольшое увеличение скорости ветра до 7,5-10,5 м/с. Здесь снова происходит медленное увеличение из-за небольшого температурного градиента.

Модель НWM14 в целом сопоставима со значениями у фактических данных наблюдений на протяжении всего хода графика. У модели НWM93 значения сопоставимы примерно до 6 километров, далее они постоянно занижены.

Значения среднеквадратического отклонения у фактических наблюдений с 105 метров до 12 километров увеличивается до 7 м/с, далее идет уменьшение до 23 километров до 3 м/с.

Из рисунка видно, что кривая, рассчитанная по модели НWM14, в интервале области высот от 3 до 13 километров с вероятностью 95% соответствует измеренному профилю. При этом кривая, рассчитанная по модели НWM93, значения которой в целом выходят по всей области высот измерений с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю.

Таким образом, для середины осеннего сезона модель НWM14 более адекватно описывает высотное распределение скорости ветра по сравнению с моделью НWM93. При этом среднеквадратическое отклонение составляет в диапазоне 0,5-6 м/с, например, максимум в 6 м/с соответствует высоте 12 км.

Оценка абсолютной ошибки расчета модельных профилей, полученных по модели горизонтального ветра HWM14, для высотной области от 3 до 13 км показала, что максимальной значение абсолютной ошибки составило $-1,3$ м/с на высоте 3 км, что составило 21%, а минимальное значение: $-1,1$ м/с на высоте 9 км, что составило около 9%. Анализ изменения с высотой относительной ошибки расчета скорости ветра по модели HWM14 показал, что в диапазоне от 3 км до 13 км, максимальной значение: $-17,3\%$ на высоте 3 км, а минимальное $0,4\%$ на высоте 9 км. А модель HWM93 не адекватно отражает реальную картину на всем высотном промежутке.

Средняя по высотному профилю ошибка модельных расчетов для октября и высотной области до 9 км составила: $-0,03$ м/с.

На рисунке 4.8 представлены осредненные за октябрь модельные (рассчитанные по моделям HWM14 и HWM93) и измеренные высотные профили направления ветра и среднеквадратическое отклонение.

Ход высотного профиля измеренных данных по направлению ветра за июль таков:

- На аэрологической станции на высоте 105 метров скорость ветра примерно 190-250 градусов;
- До высоты примерно 11 километров идет изменение направления до 255-285 градусов.

Модели горизонтального ветра на всех уровнях от 105 метров до 23 километров показывают неудовлетворительные показания азимута ветра относительно фактических данных измерений, но HWM14 более приближен к измерениям. Обе модели практически никак не отклоняются от своего матожидания, то есть стандартное отклонение не превышает 5 градусов.

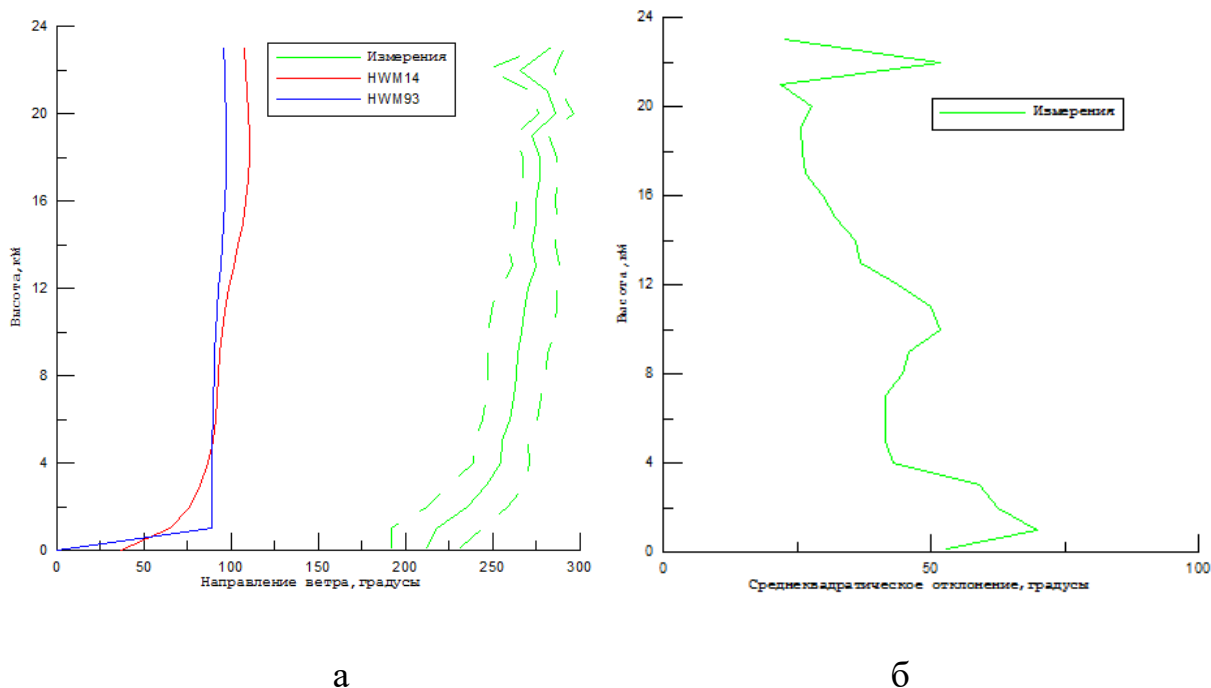


Рис. 4.8 – Изменения направления ветра с высотой (а) и среднеквадратического отклонения (б) в октябре 2021 года: измеренные значения -сплошная зеленая линия, границы доверительного интервала - прерывистая зеленая линия, осредненный за месяц высотный профиль (HWM93) - синяя линия и осредненный за месяц высотный профиль (HWM14) - красная линия.

Из рисунка видно, что кривые, рассчитанные по модели HWM93и HWM14, во всем интервале области высот от 0 до 23 км с вероятностью 95% не соответствует измеренному профилю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Сформирована база экспериментальных данных высотных профилей направления и скорости ветра для территории города Йокийнен за каждый день января, апреля, июля и октября 2021 года за 12 часов мирового времени (UTC), всего 492 профиля. При помощи специализированных компьютерных программ на языке FORTRAN полученная база данных была приведена к единой системе измерений (м/с). Это было сделано для того, чтобы появилась возможность их сопоставления и анализа;

2. Сформирована база данных индексов солнечной (F10.7) и геомагнитной активности (Ap) за каждый день выбранных месяцев в всего 8 файлов;

3. Сформирована база модельных данных высотных профилей направления и скорости ветра для территории города Йокийнен за каждый день января, апреля, июля и октября 2021 года за 12 часов мирового времени (UTC), всего 984 профиля;

4. Показано, что, за исключением осеннего сезона, модель NWM93 более адекватно описывает реальные высотные профили скорости ветра для высот тропосферы и может быть использована для исследования данной области в указанные сезоны, при этом для данных месяцев минимальная ошибка расчета высотных профилей скорости ветра не превышает 12%. Средние ошибки модельных расчетов (модель NWM93) по высотному профилю (в области тропосферы) для января, апреля и июля составили: 0,53 м/с; -0,44 м/с и -0,49 м/с, соответственно.

5. Получено, что для октября месяца более адекватны измеренному профилю модельные расчеты, выполненные по модифицированной модели горизонтального ветра NWM14 также для области тропосферы. Средняя

ошибка модельных расчетов (модель HWM14) по высотному профилю в области тропосферы составила: -0,22 м/с.

б. Высотные профили направления ветра, рассчитанные по обеим модели, не адекватно отражает реальную картину на всем высотном промежутке и модели не могут быть использованы для расчета данного параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст]: учебник / Е.С. Вентцель // Нормальный закон распределения.– М. : КНОРУС, 2010. – № 6. – 664 С.
2. Akmaev R. A. WHOLE ATMOSPHERE MODELING: CONNECTING TERRESTRIAL AND SPACE WEATHER.// JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. SPACE PHYSICS. AN AGU JOURNAL.- 2011 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011RG000364>
3. Drop D.P., et.al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere// Earth and Space science.- 2015. https://www.researchgate.net/publication/276174814_An_Update_to_the_Horizontal_Wind_Model_HWM_The_Quiet_Time_Thermosphere
4. H.-L. Liu, B. T. Foster, M. E. Hagan, J. M. McInerney, A. Maute, L. Qian, A. D. Richmond, R. G. Roble, S. C. Solomon, R. R. Garcia, D. Kinnison, D. R. Marsh, A. K. Smith, J. Richter, F. Sassi, J. Oberheide. Thermosphere extension of the Whole Atmosphere Community Climate Model// JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. SPACE PHYSICS.-2010 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JA015586>
5. Emmert, J. T., B. G. Fejer, G. G. Shepherd, and B. H. Solheim, Altitude dependence of middle and low-latitude daytime thermospheric disturbance winds measured by WINDII//JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH.SPACEPHYSICS.-2002 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JA009646>