



Двадцать третья международная конференция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, Москва, ИКИ РАН, 10 - 14 ноября 2025 г.



ДИНАМИКА НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ

Н.В. Бахметьева, Е.Е. Калинина, И.Н. Жемаков, А. А. Лисов

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

При поддержке РФФ – грант № 25-27-00031



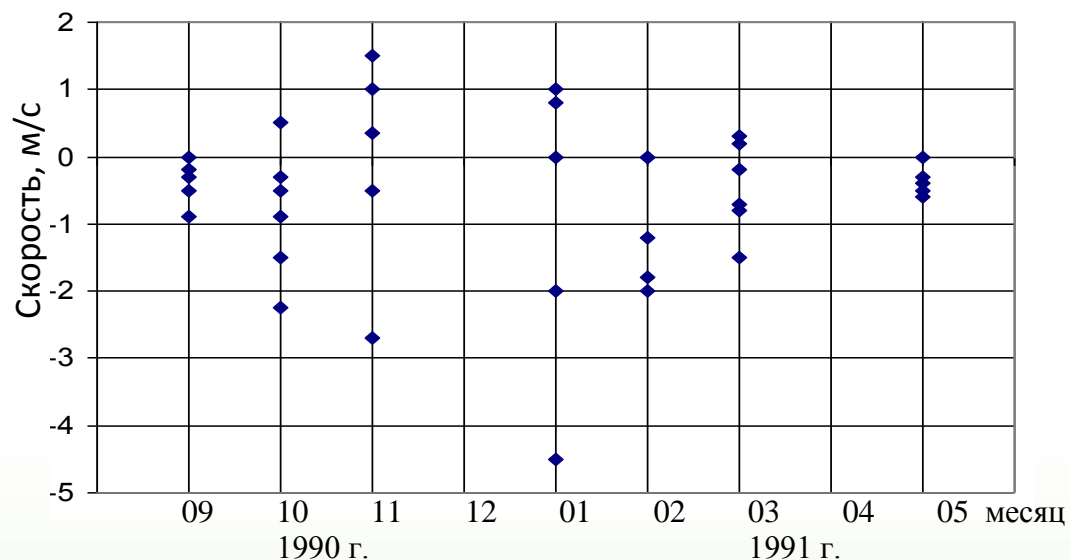
Вертикальные движения плазмы - измерения методом ИПН

Вертикальные движения плазмы и нейтральной компоненты являются составляющими общей циркуляции атмосферы и представляют собой один из важных механизмов влияния на состав атмосферы и электродинамические процессы, играют существенную роль в динамике, электродинамике, физике плазмы и химии нижней ионосферы Земли. В мезосфере и нижней термосфере плазма является пассивной примесью и движется вместе с нейтральной компонентой.

В течение многих лет в НИРФИ проводятся исследования вертикальных движений среды на основе рассеяния радиоволн искусственными периодическими неоднородностями ионосферной плазмы, создаваемыми полем мощной радиоволны. Вертикальная скорость определяется по измерению фазы рассеянного сигнала на стадии релаксации неоднородностей, то есть в условиях невозмущенной ионосферы. В результате этих исследований, осуществлённых в разных природных условиях, получены высотные профили вертикальной скорости, исследованы ее временные вариации на высотах мезосферы и нижней термосферы (60-130 км). Выяснилось, что важной особенностью вертикальной динамики являются быстрые временные вариации скорости – изменение ее величины и направления в течение 15 с, то есть за время одного измерения, при этом величина скорости могла достигать 10 м/с и более. Отмечается регулярное волнообразное изменение величины скорости в зависимости от высоты, наблюдаются также волнообразные временные вариации с периодами, характерными для атмосферных волн.

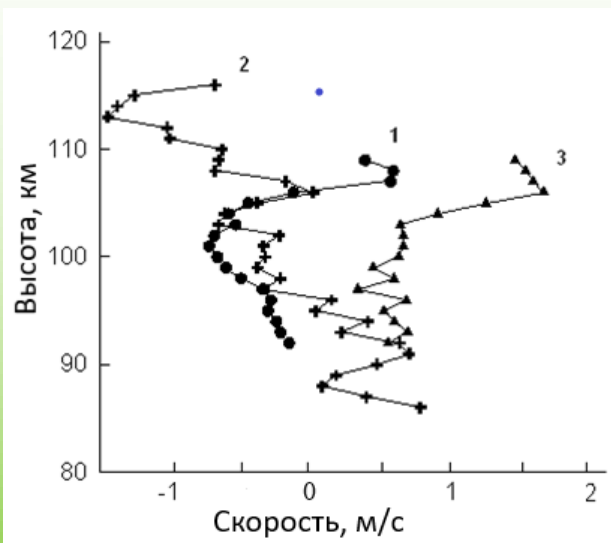
В докладе приведены результаты усредненных значений скорости регулярного вертикального движения плазмы, сделана попытка исследования корреляционных связей с целью выяснить особенности вертикальной динамики на разных высотах нижней ионосферы в разных природных условиях.

Средние за месяц значения вертикальной скорости



Показаны вариации среднемесячных значений вертикальной скорости на высотах 89–114 км с сентября 1990 г. по май 1991 г. Ниже 90 км средние за месяц значения скорости составили менее 1 м/с, возрастая до $\approx 4,6$ м/с при увеличении высоты до 120 км. Выше 90 км преобладали движения вверх (отрицательные значения – движение вверх, более 70% данных).

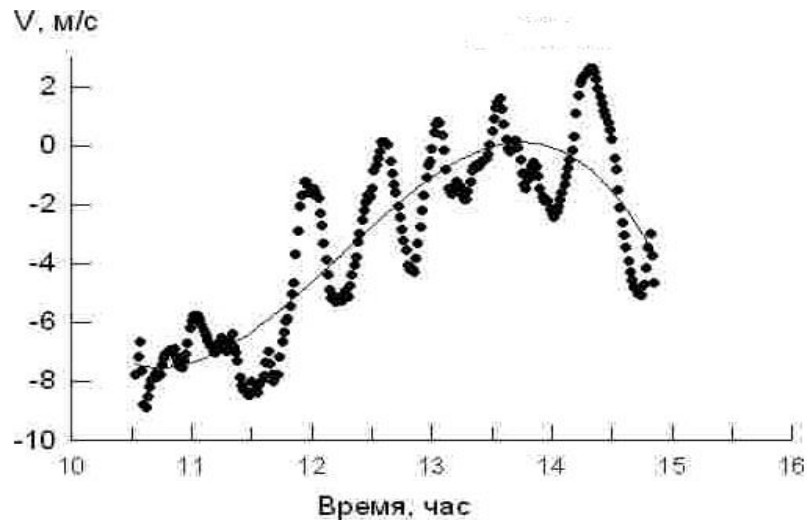
Максимальные средние за месяц абсолютные значения скорости получены в ноябре 1990 г. и январе 1991 г. и составили по величине 4,6 и 2,6 м/с. В остальное время они не превышали 1,5 м/с. Наибольший разброс средних за месяц значений пришелся на ноябрь 1990 г. и январь 1991 гг.



Высотные профили вертикальной скорости для трех осенних месяцев 1991 г.: 1 – сентябрь, 2 – октябрь, 3 – ноябрь. Разный характер вариаций скорости в осенние месяцы, проявление атмосферных волн.

Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН. – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999, 156 с.
Belikovitch V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva. N.V. Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities. –Copernicus GmbH. Katlenburg-Lindau, Germany. 2002, 160 pp.

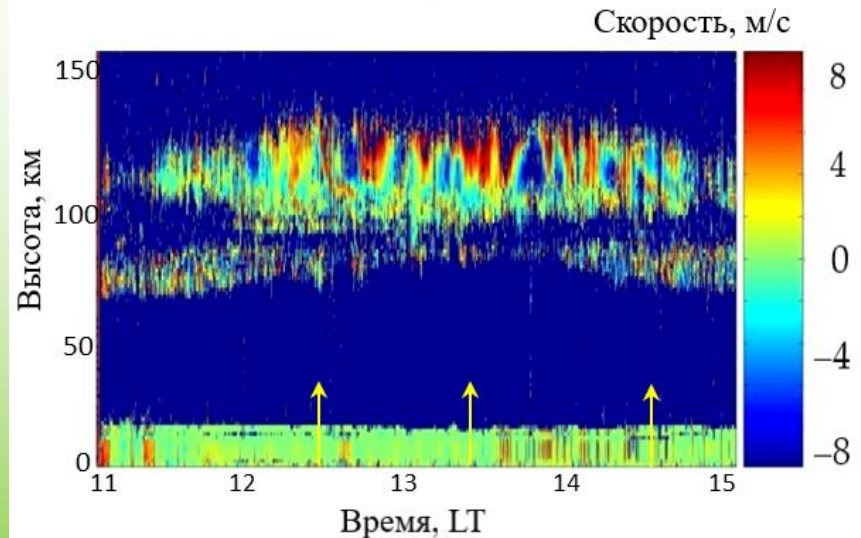
Вклад атмосферных волн в вертикальную скорость



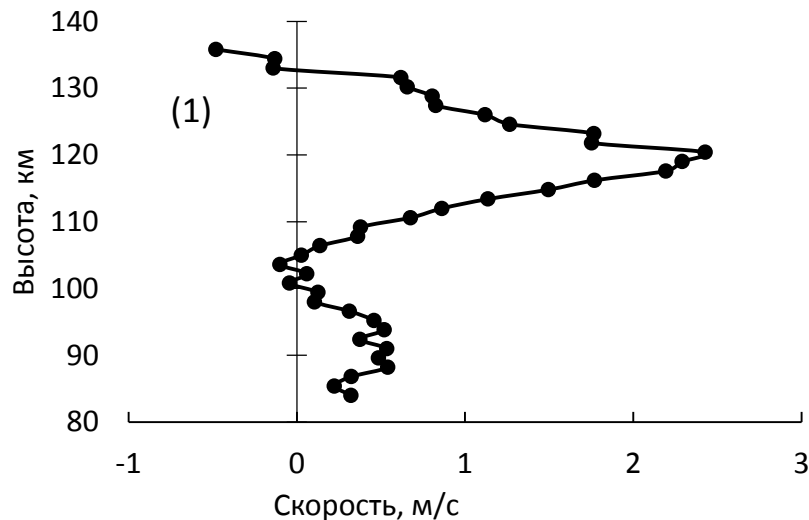
Вариации вертикальной скорости во времени на высоте 117 км 27.02.1991, точки – средние значения скорости за каждую минуту. Отчетливо видны ярко выраженные волнообразные изменения скорости с размахом до 9 м/с и периодом 30 мин. Пунктиром обозначен полиномиальный тренд, показывающий период волн более 5 часов.

Во время затмения - глубокие вариации скорости, связанные с распространением атмосферных волн.

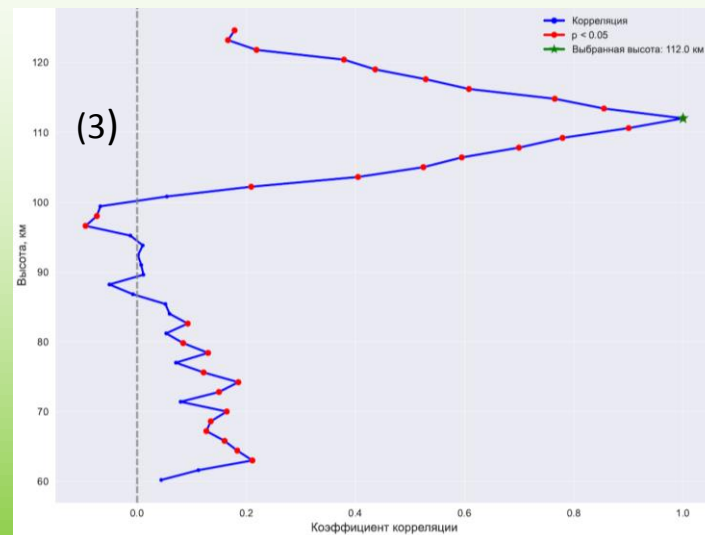
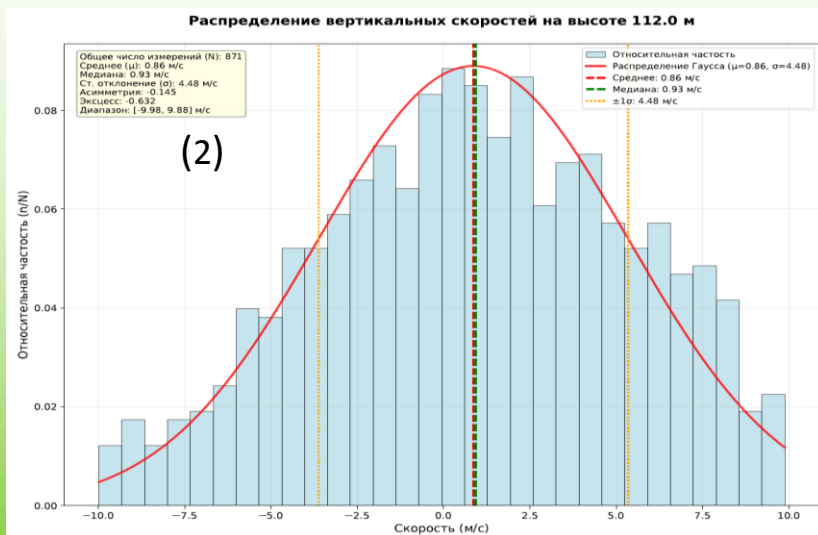
Вариации вертикальной скорости в день затмения Солнца 20.03.2015.



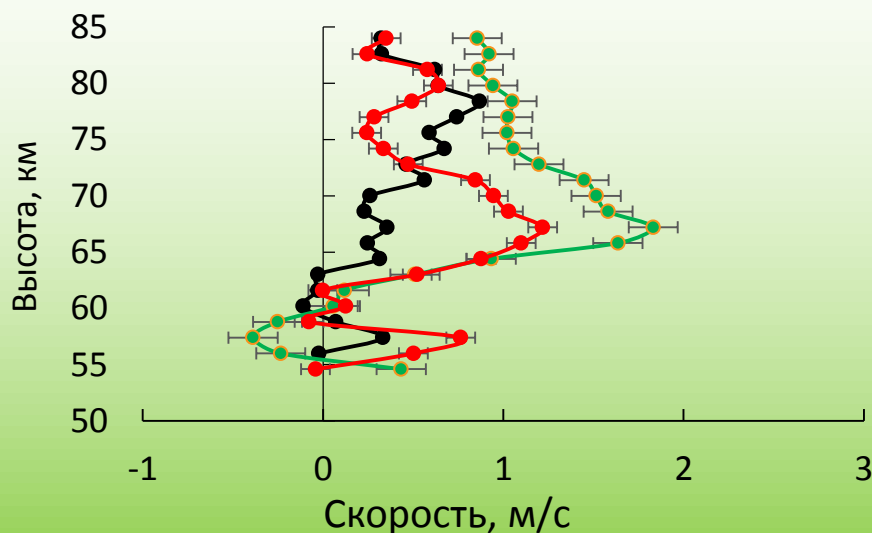
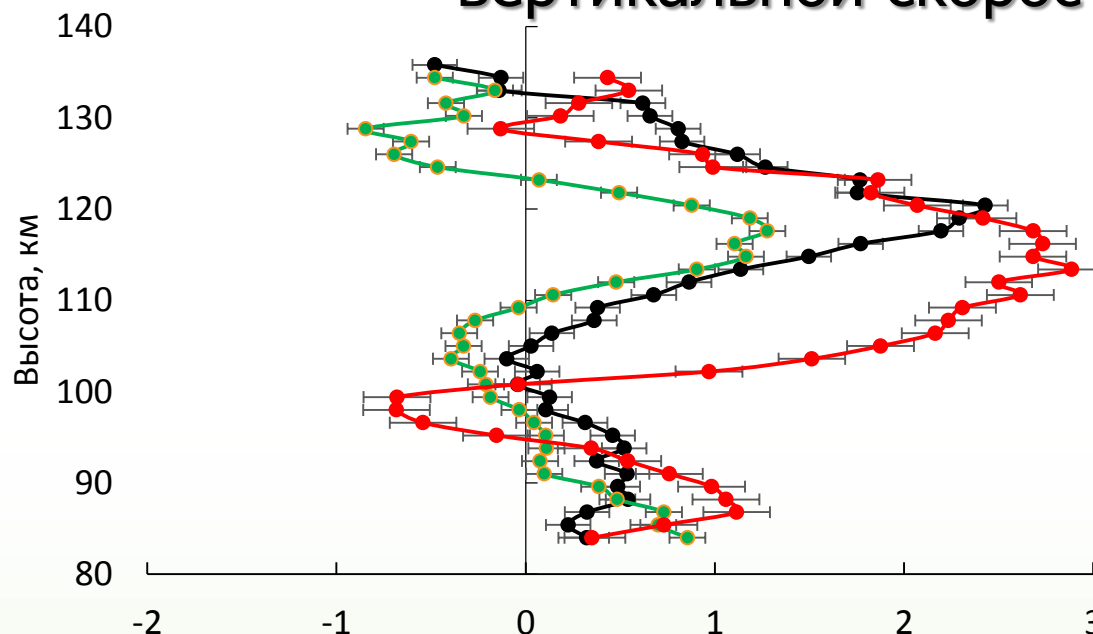
Вертикальная скорость во время затмения 20.03.2015



- (1) Высотный профиль усредненной за весь день вертикальной скорости от высоты с ярко выраженным максимумом на высоте 120 км. Преобладающее направление движение вниз.
- (2) Гистограмма распределения скорости на высоте 112 км. Отброшены значения скорости $> |10 \text{ м/с}|$. Получено распределение близкое к нормальному.
- (3) Корреляционная функция на высоте 112 км. Значения $r > 0,5$ в диапазоне высот 108-119 км.



Усредненные за день высотные профили вертикальной скорости в 2015 г.



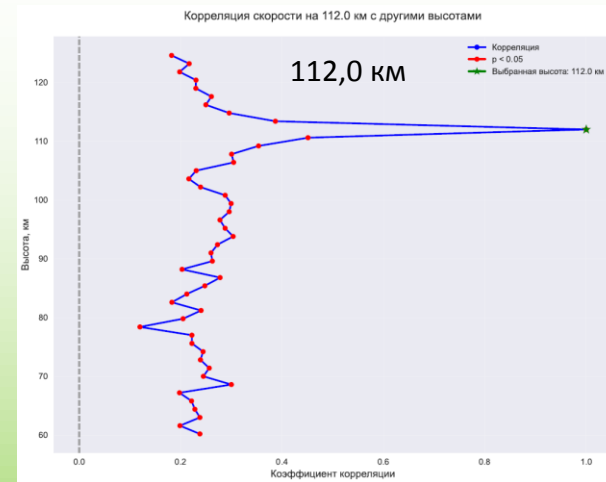
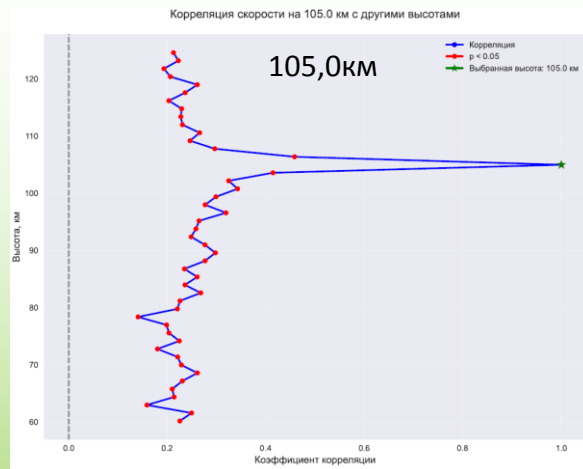
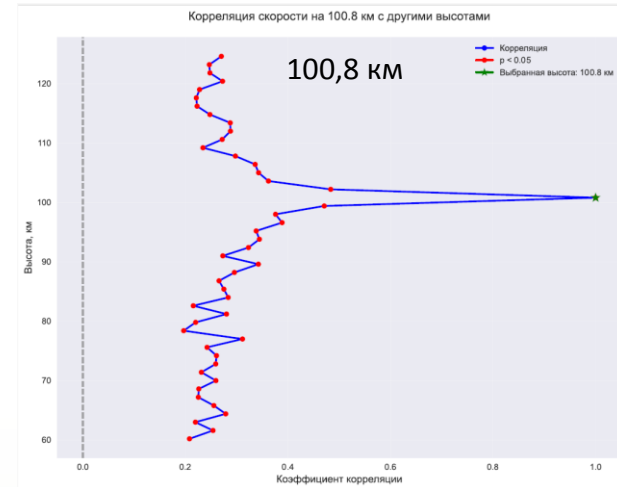
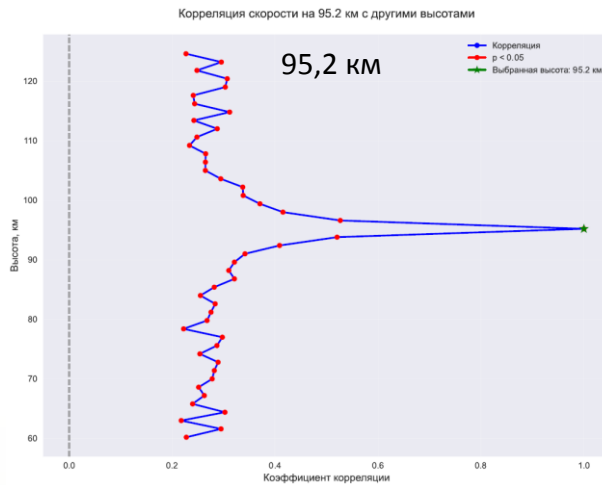
Высотные профили усредненной за день вертикальной скорости для 20.03.2015 (черные точки), 12.08.2015 (зеленые), 13.08.2015 (красные), которые дают представление о среднем характере изменения величины и направления скорости с высотой.

Динамика нижней ионосферы:

Е-область - максимальные средние значения скорости нисходящего потока наблюдались 13.08.2015 (+2,8 м/с), в то время как скорости восходящих движений не превышали -1 м/с. При минутном усреднении скорости достигали 10-12 м/с, до 20 м/с. Значения > 10 м/с не участвовали в усреднении.

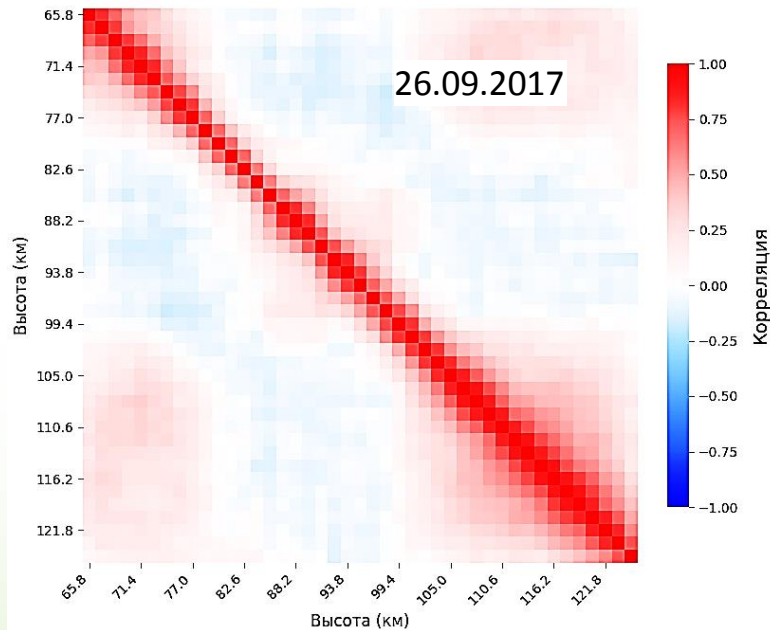
Д-область - максимальные значения скорости нисходящего потока до +2 м/с наблюдались в августе 2015 г., скорости при движении вверх не превышали -0,5 м/с.

Автокорреляционная функция скорости на нескольких высотах 12.09.2019

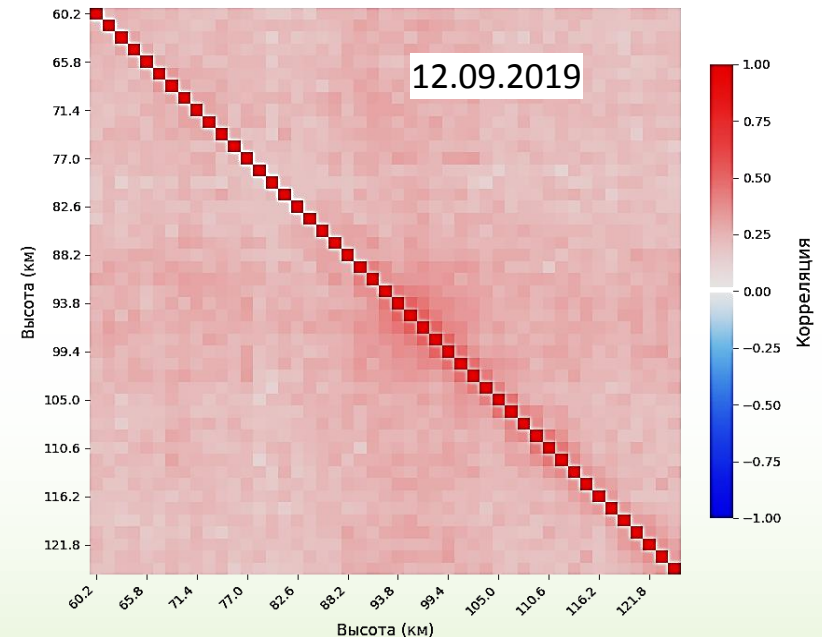


Автокорреляционная функция значений скорости для четырех высот в диапазоне 60-125 км.

Примеры корреляционных матриц вертикальной скорости для 26.09.2017 и 12.09.2019

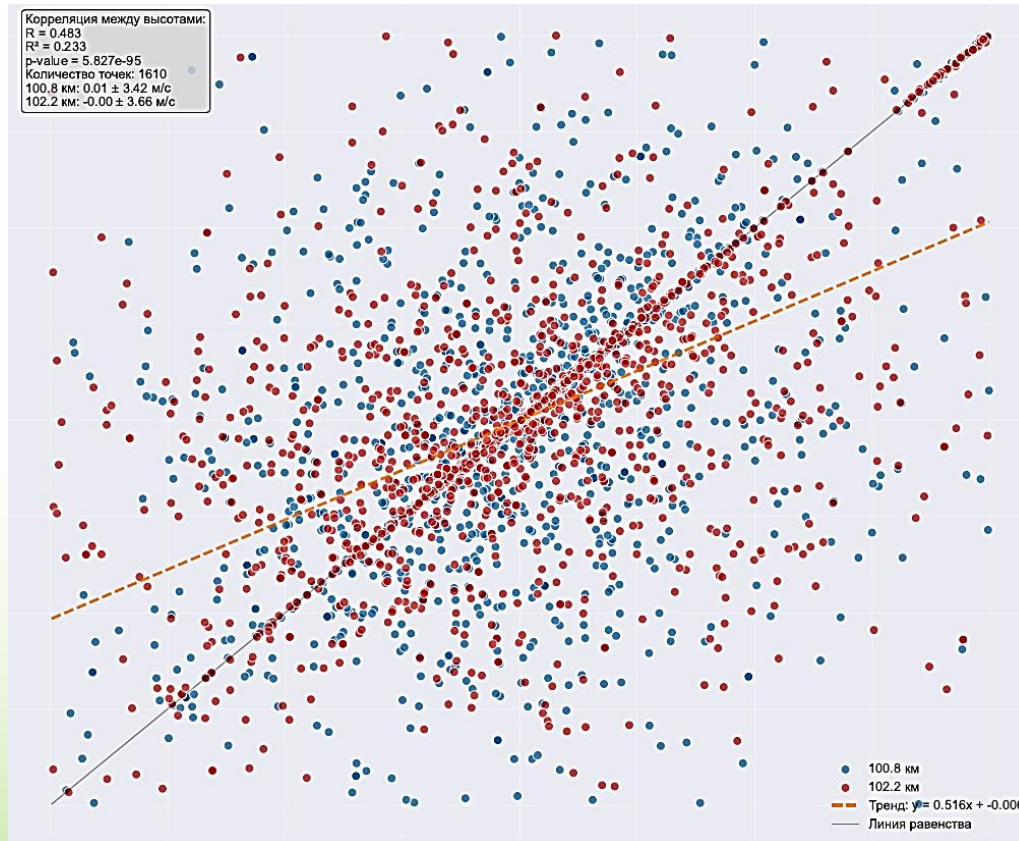


Высокий уровень корреляции ($r > 0.5$) получен для скоростей на высотах 107.8 км – 121.8 км. Менее коррелированы значения скорости на высотах 84.0 км – 95.2 км. Матрица демонстрирует уменьшение уровня корреляции с ростом разности высот и показывает некоторые выделенные высоты с более согласованным поведением скорости.



Выделяются три области высот: 60-85 км - умеренная корреляция; 85-105 км - наиболее сильные связи; 105-125 км - умеренная корреляция. Большинство значений коэффициента корреляции находятся в диапазоне 0.15-0.35, что указывает на слабые и умеренные связи между значениями скорости на разных высотах.

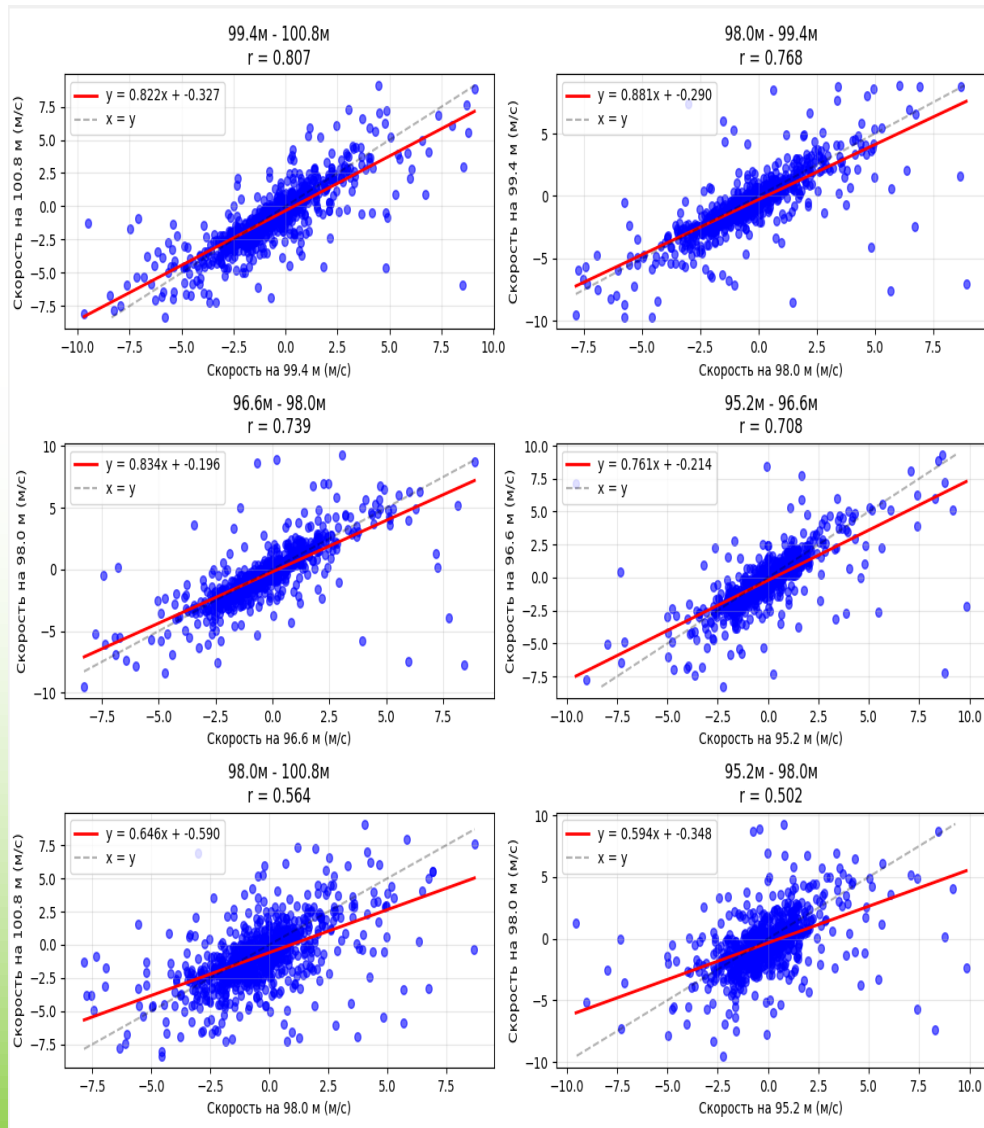
Диаграмма рассеяния скорости на двух высотах 12.09.2019



Диаграммы рассеяния используются для демонстрации наличия или отсутствия корреляции между двумя переменными. Она показывает взаимосвязь между двумя переменными (в данном случае – значениями вертикальной скорости на двух разных высотах) через расположение точек на плоскости. Показаны линейный тренд (пунктир) и линия регрессии (сплошная линия), построенные на основе 1610 значений.

Скорость на высоте 100,8 км (синие точки) и 102,2 км (красные точки).
Коэффициент корреляции $R=0.48$.

Диаграммы рассеяния 27.09.2016

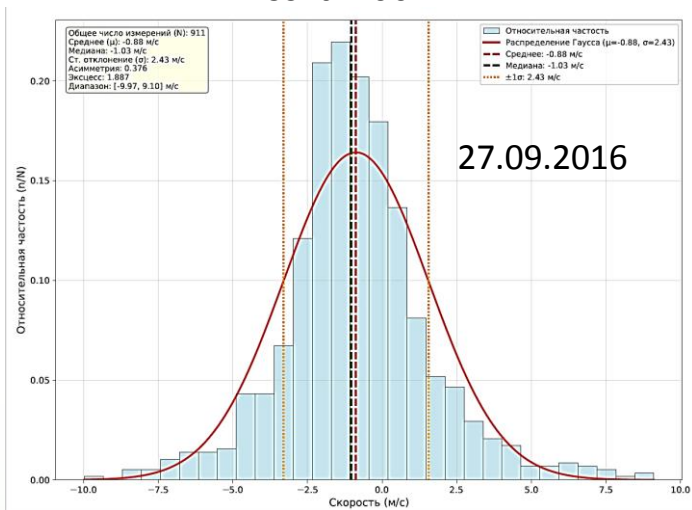


высоты от 95,2 км до 100,8 км

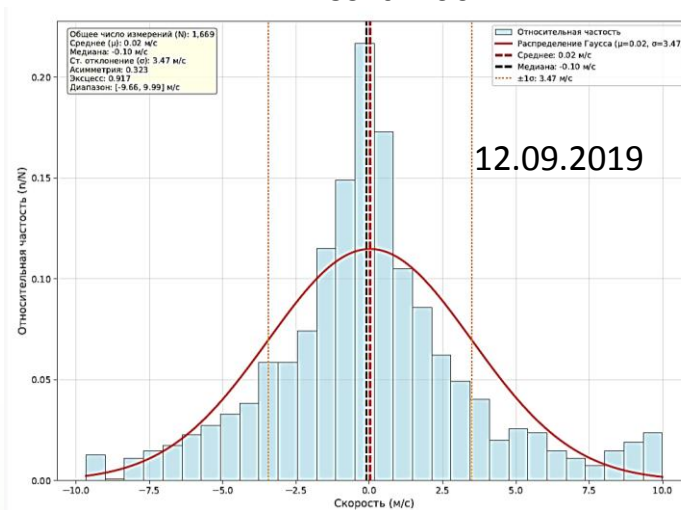
Диаграммы рассеяния скорости (синие точки) для шести пар высот в диапазоне 84 км – 88,2 км, расположенных по убыванию значения коэффициента корреляции r . Показаны линейный тренд (красная сплошная линия) и линия регрессии (пунктир). Степень связи между значениями скорости на разных высотах характеризуется формой облака точек и отличием линейного тренда от линии регрессии. Плотное облако точек, вытянутое вдоль линии регрессии, и небольшое отличие линии тренда от последней свидетельствует о значительной положительной корреляции, то есть процессы на этих высотах сильно линейно связаны.

Гистограммы распределения вертикальной скорости

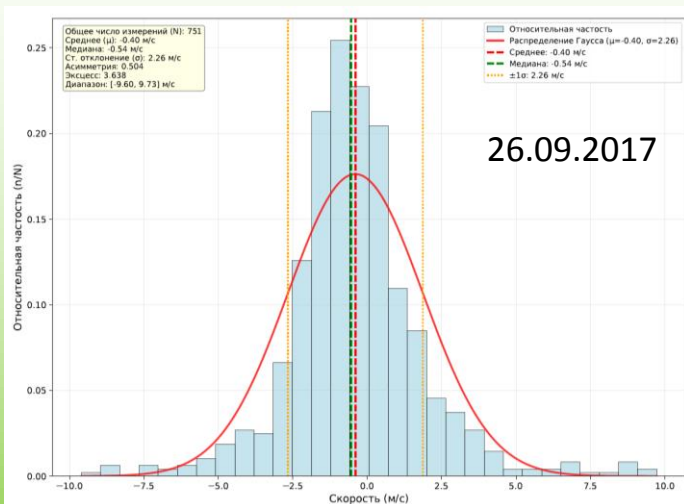
высота 100 км



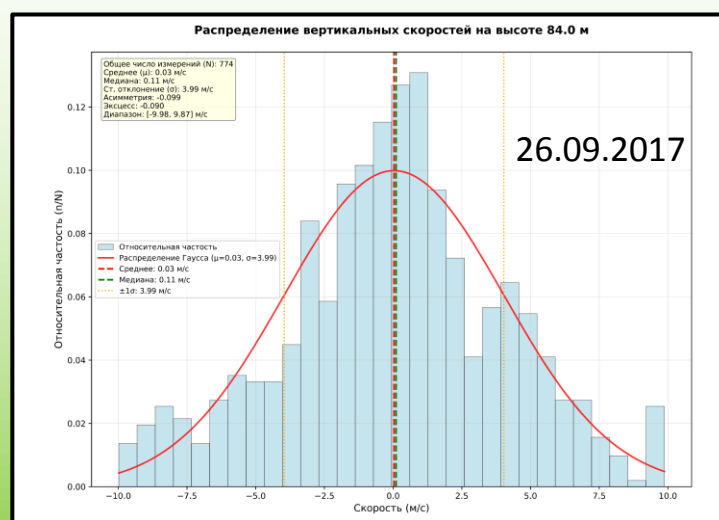
высота 100 км



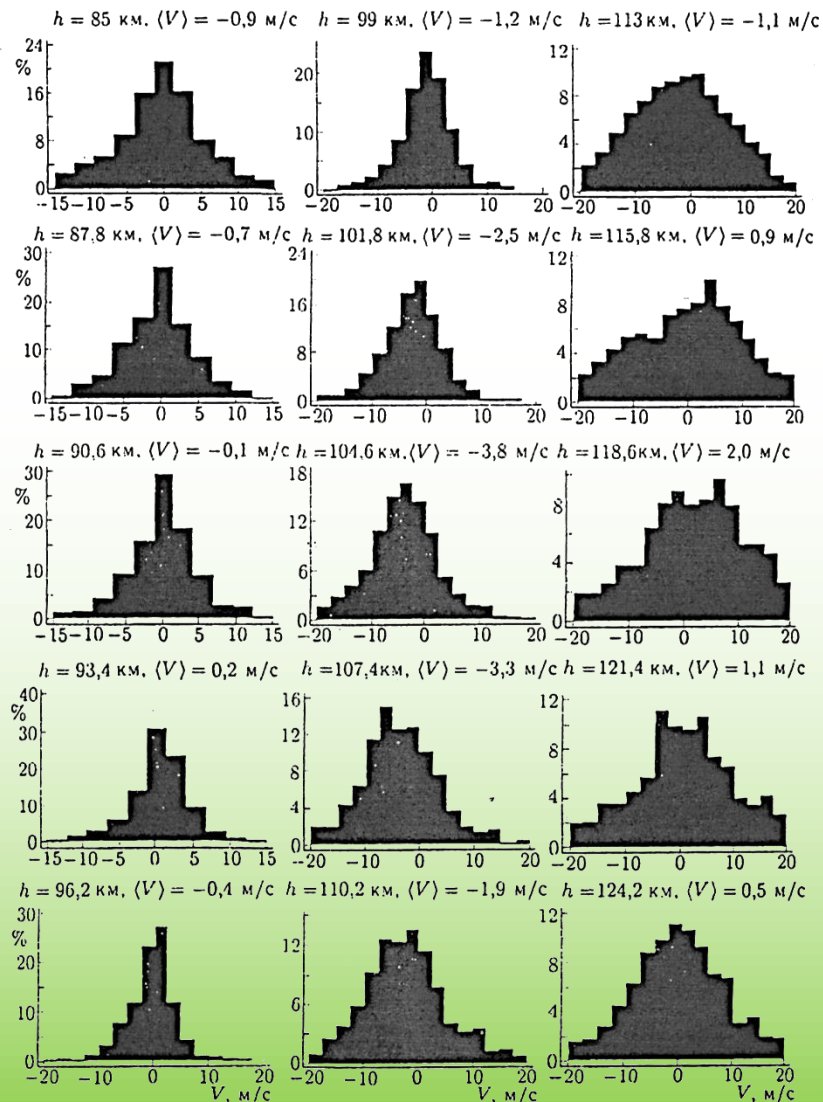
высота 100 км



диапазон высот 84 - 119 км



Гистограммы распределения вертикальной скорости в вечерние и ночные часы 15.06.2001



Гистограммы распределений скорости вертикального движения плазмы на высотах 85.0–124.2 км с интервалом по высоте 2.8 км. Для каждой гистограммы указаны высота и среднее значение скорости V на данной высоте. Средние величина и направление скорости существенно изменялись с высотой. На высотах $h \approx 92$ и 114 км скорость меняла знак, то есть могло происходить образование спорадического слоя E (E_s) за счет механизма ветрового сдвига. Появление слоя E_s в этот период времени было подтверждено ионограммами вертикального зондирования. Отрицательные значения скорости отвечают движению вверх. С увеличением высоты возрастает доля сравнительно больших значений скорости, превышающих 10 м/с, а также растет дисперсия распределения. Этот результат является косвенным подтверждением распространения атмосферных волн в период измерений и роста их вклада в вертикальную скорость в о время захода Солнца в ионосфере.

Н. В. Бахметьева, И. Н. Жемяков. Вертикальные движения плазмы в динамике мезосферы и нижней термосферы Земли. Химическая физика, 2022, Т. 41, № 10, стр. 65-83.

Заключение

1. Проанализированы результаты измерений вертикальной скорости плазмы на высотах 60-130 км в периоды летне-осенних измерений в июне 2023 г., августе 2015, 2017, 2018 гг., сентябре 2016, 2017, 2018, 2019, 2024 гг., октябре 2018 и 2014 гг. Скорость имела переменное направление, её значения изменялись в диапазоне от -10 м/с (движение вверх) до $+10$ м/с (движение вниз). Средние значения вертикальной скорости за длительные интервалы времени (час, сутки и более) в основном изменялись от -3 м/с (направление вверх) до $+5$ м/с (направление вниз). Большие по сравнению с моделями атмосферной циркуляции значения скорости свидетельствуют о существенном вкладе внутренних гравитационных волн в динамику нижней ионосферы.
2. Получены гистограммы распределения, изучены корреляционные связи значений скорости на разных высотах. Для каждого распределения рассчитаны коэффициенты асимметрии и эксцесса, в первом приближении характеризующие его отклонение от нормального. Среднее значение и медиана распределения, например, для 27 сентября 2016 г. и 26 сентября 2017 г. на высотах 84–110.6 км отличались не более, чем на 0.07 м/с, а среднеквадратичное отклонение от среднего значения увеличивалось с высотой, что означает рост вклада разного рода динамических явлений, в том числе, атмосферных волн в вариации вертикальной скорости.
3. Выделены два высотных интервала значимых корреляционных связей. Так, для 27 сентября 2016 г. сравнительно высокий уровень корреляции ($r > 0.5$) получен для рядов данных на высотах 107.8–121.8 км. Для некоторых пар высот (с разностью между ними 1.4 км) коэффициент корреляции достигал 0.9. Менее коррелированы были скорости на высотах 84.0–95.2 км.

Публикации

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН. – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999, 156 с.
2. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva. N.V. Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities. –Copernicus GmbH. Katlenburg-Lindau, Germany. 2002, 160 pp.
3. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 233.
4. Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н. // Химическая физика. 2022. Т. 41, №. 10. С. 65-83.
5. Bakhmetieva, N.V.;Grigoriev, G.I. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma. Atmosphere, 2022, 13, 1346.

Спасибо за внимание!