



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Сравнительный анализ короткопериодной изменчивости температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации

**Медведева И.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск**

Двадцать вторая международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2024 г.



Ранее был проведен анализ усредненных за 2008–2015 гг сезонных вариаций изменчивости температуры мезопаузы и максимума электронной концентрации с периодами ВГВ, который выявил как общие особенности, так и различия в поведении анализируемых параметров (*Medvedeva and Ratovsky, 2015; Медведева и Ратовский, 2017*).

Цель:

Корреляционный анализ проявления активности атмосферных волн с периодами внутренних гравитационных волн (ВГВ, $T < 8$ ч) в области мезопаузы и F2-слое ионосферы по данным спектрометрических и радиофизических измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. В настоящем исследовании для поиска корреляционных связей использованы рассчитанные для каждого дня года значения σT_m и $\sigma N_m F_2$.

Анализируемые данные

- Данные спектрометрических измерений вращательной температуры молекулы гидроксила (834.0 нм, (6-2), ~ 87 км), (51.8°N, 103.1°E, Торы);
- Данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации $N_m F_2$, полученные на иркутском (52.3° N, 104.3° E) дигизонде DPS-4;

Анализируемый период 2013-2018 гг.



Излучение гидроксила (полоса OH(6-2), $\lambda 834.0$ нм, ~ 87 км) в ближней ИК области спектра возникает на высотах области мезопаузы. Спектрометрические наблюдения эмиссии OH(6-2) проводятся в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8°N , 103.1°E , Торы) с 2008 г. К настоящему времени, архив данных включает >2500 ночей наблюдения. Измерения проводятся в ночное время суток, временное разрешение 10 минут. Полученные спектры позволяют определять спектральные характеристики (интенсивность, температура) эмиссии молекулы гидроксила. Вращательная температура молекулы OH отображает температуру атмосферы на высоте излучения (область мезопаузы).

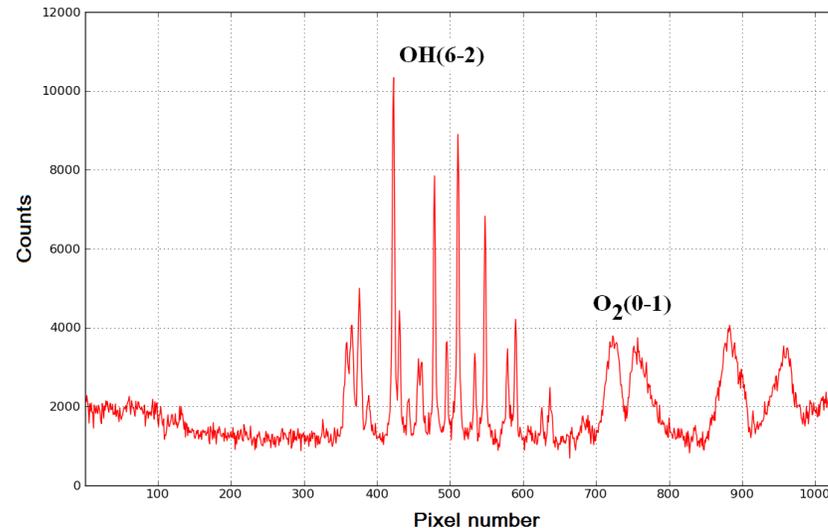


Рис.1. спектра собственного свечения верхней атмосферы в области 780-1030 нм, зарегистрированного 3 января 2013 (15:33:41 UT).



Метод оценки изменчивости температуры области мезопаузы

В качестве характеристики ночной температурной изменчивости использованы стандартные отклонения от ее средненочных значений (σ), которые можно представить как сумму:

$$\sigma^2 = \sigma_{td}^2 + \sigma_{gw}^2 + \sigma_n^2,$$

σ_{td}^2 и σ_{gw}^2 в основном обусловлены активностью приливов и ВГВ, соответственно,
 σ_n^2 - стандартное отклонение, вызванное флуктуациями темнового тока, которые определяются при закрытой входной щели прибора.

Величины σ_{td} и σ_{gw} последовательно оценивались после выделения из ночного температурного ряда методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих 24-, 12- и 8- часовой компонентам суточного прилива.

σ_{gw} - анализируемый параметр, характеризующий коротковолновую изменчивость T_m

(Перминов и др., 2014; Medvedeva and Ratovsky, 2015; Медведева и Ратовский, 2017)

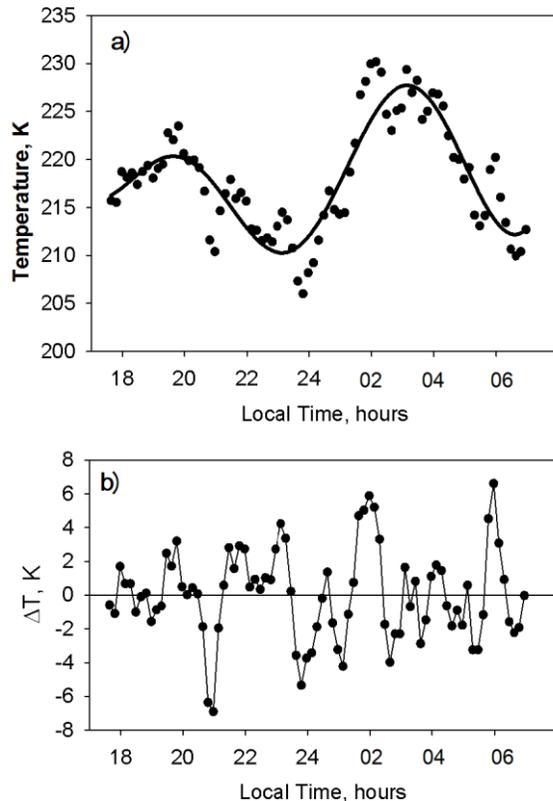


Рис.2. а) Температурные вариации (точки) и реконструкция суточного хода с помощью гармонического анализа (линия), для ночи 2-3 января 2013 г

б) Остаточные вариации температуры после вычитания приливных гармоник с периодами 24, 12 и 8 часов.



Метод оценки ионосферной изменчивости

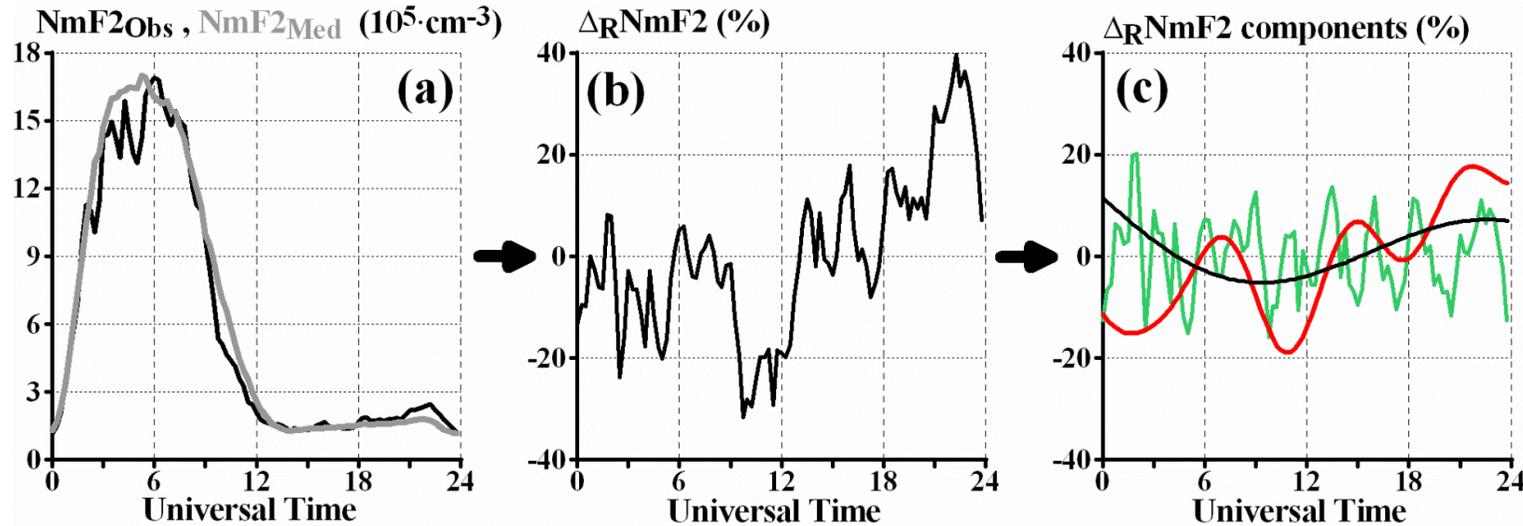


Рис.3. (а) - Экспериментальные данные NmF2 ($NmF2_{OBS}$, черная линия) и скользящая 27-дневная медиана ($NmF2_{MED}$, серая); (b) - относительные возмущения ($\Delta_R NmF2$); (c) - Компоненты $\Delta_R NmF2$: межсуточная (черный, $T > 24$ час), с периодами приливов (красный, $8 \leq T \leq 24$ час), и с периодами ВГВ (зеленый, $T < 8$ час).

Для расчета изменчивости максимума электронной концентрации использовались относительные возмущения NmF2 ($\Delta NmF2$), представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями ($NmF2_{OBS}$) и значениями скользящей 27-дневной медианы ($NmF2_{MED}$):

$$\Delta NmF2 = NmF2_{OBS} - NmF2_{MED}; \quad \Delta_R NmF2(\%) = \Delta NmF2 / NmF2_{MED} \cdot 100\%$$

$$\sigma_R NmF2 = \sqrt{\langle \Delta_R NmF2^2 \rangle}$$

- анализируемый параметр, характеризующий изменчивость NmF2



Результаты и обсуждение

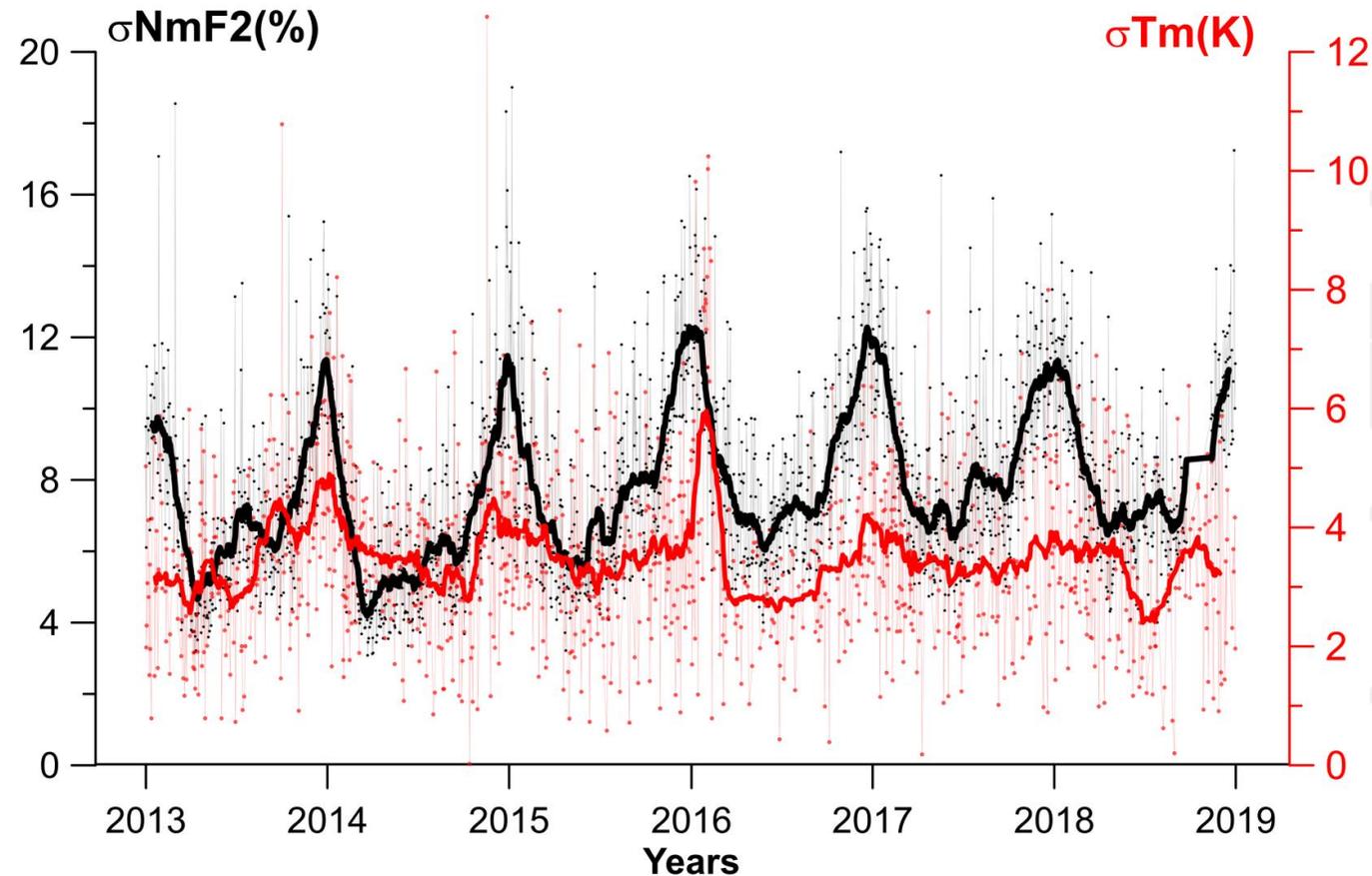


Рис.4. Вариации короткопериодных изменчивостей температуры мезопаузы σTm (тонкие линии, кружки, красный) и максимума электронной концентрации $\sigma NmF2$ (тонкие линии, кружки, черный) и сглаженные по 27 дням методом скользящего среднего (толстые кривые) в 2013-2018 гг.

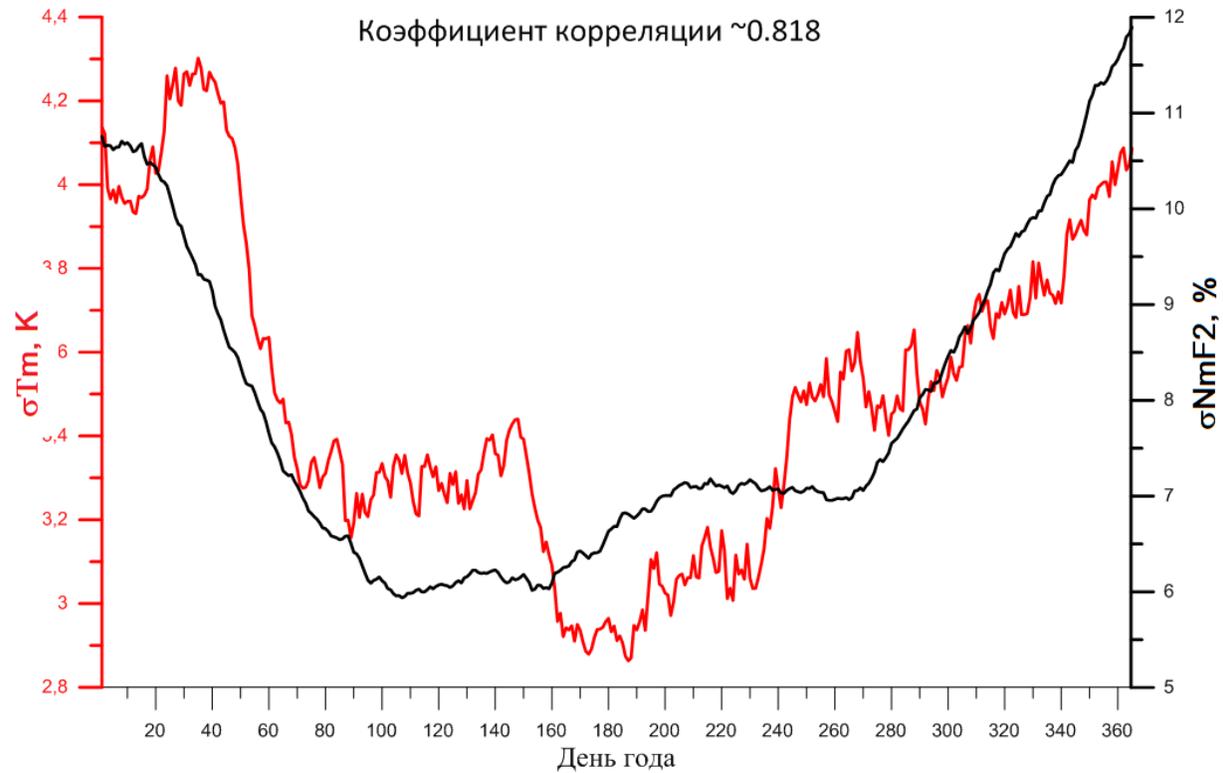
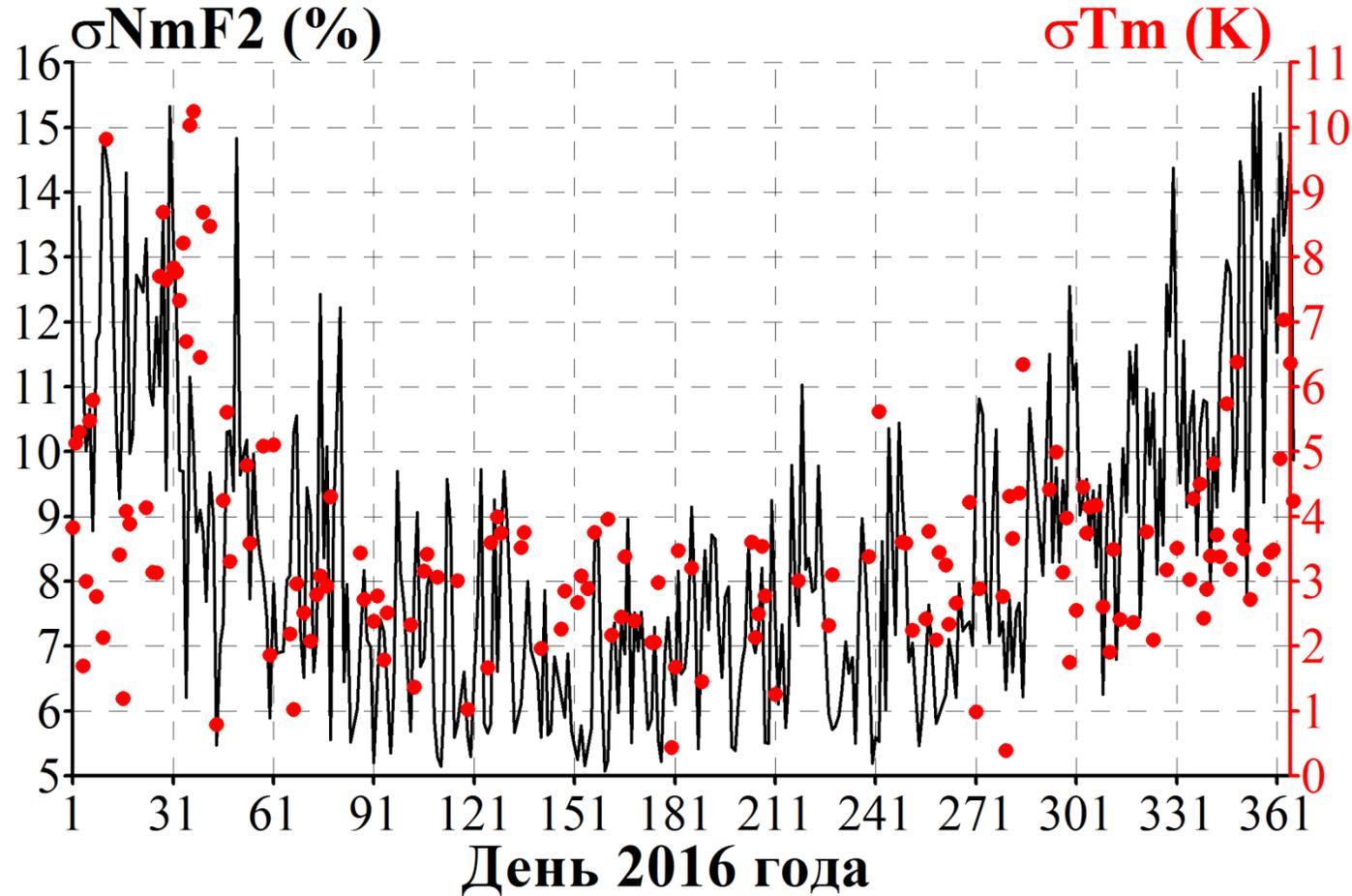


Рис. 5. Сезонный ход изменчивостей σ_{Tm} (красный) и максимума электронной концентрации σ_{NmF2} (черный), усредненный по всем годам (2013-2018 гг). Коэффициент корреляции высокий.



На рисунке 6 в качестве примера приведены вариации анализируемых параметров в 2016 г. Видно, что при рассмотрении без усреднения согласованность вариаций заметно ухудшается по сравнению с усредненным сезонным ходом. Однако существуют отдельные интервалы, когда поведение σTm и $\sigma NmF2$ имеет согласованный характер (Рис. 7).

Рис.6. Вариации короткопериодных изменчивостей температуры мезопаузы σTm (красный) и максимума электронной концентрации $\sigma NmF2$ (черный) в 2016 г.

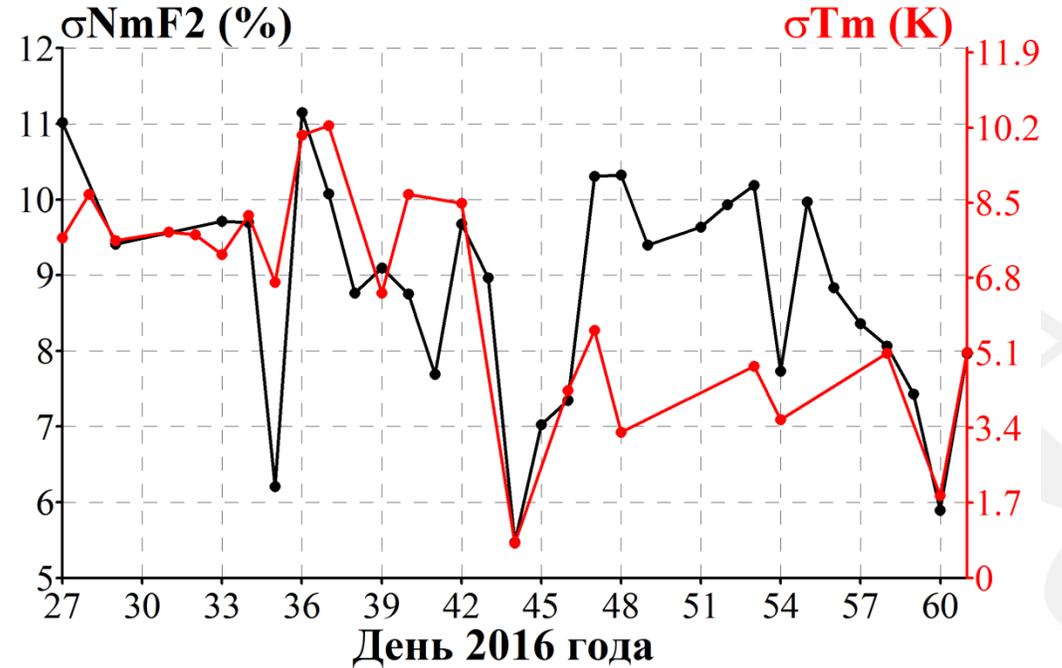
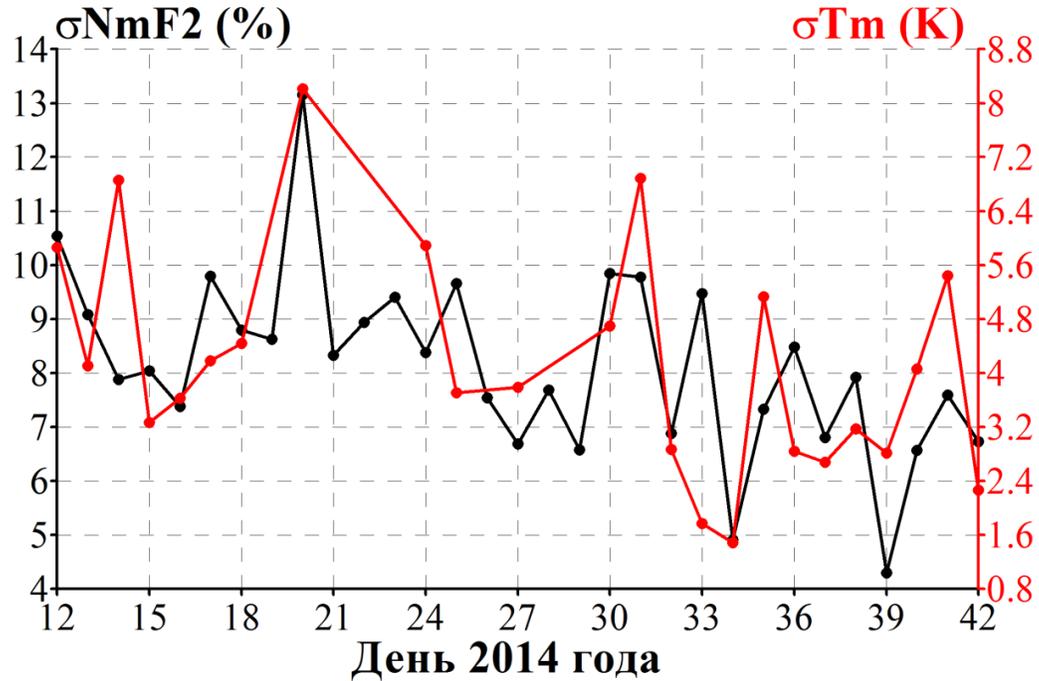


Рис.7. Вариации короткопериодных изменчивостей температуры мезопаузы σTm (красный) и максимума электронной концентрации $\sigma NmF2$ (черный) в январе-феврале 2014 г (слева) и январе-феврале 2016 г (справа).

Анализ выявил временные интервалы, преимущественно в зимний период, на которых поведение σTm и $\sigma NmF2$ носит согласованный характер.



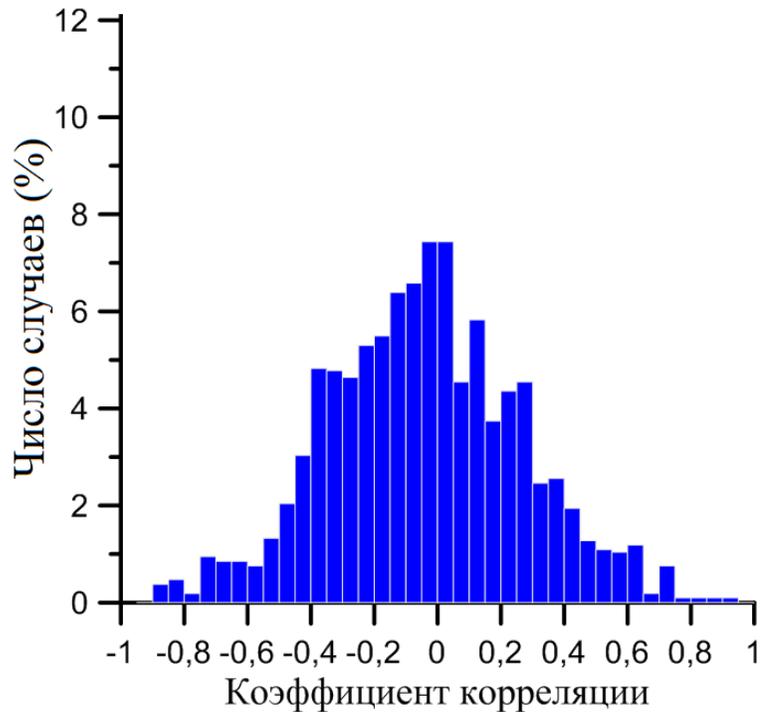
Коэффициент корреляции без сдвига

Число случаев: 2112

Среднее -0.042

Стандартное квадратичное отклонение: 0.313

А



Поскольку как σT_m , так и $\sigma NmF2$ являются функцией дня года, корреляционный анализ выявляет согласованность их вариаций ото дня ко дню. Первоначально было сделано предположение, что ВГВ распространяются непосредственно из нижележащей атмосферы в мезосферу и ионосферу, вызывая тем самым как возмущения T_m , так и возмущения $NmF2$. Усиление/ослабление активности ВГВ должны таким образом вызывать соответствующий рост и уменьшение как σT_m , так и $\sigma NmF2$, и в таком случае значения коэффициента корреляции σT_m и $\sigma NmF2$ должны были быть достаточно высокие. Результаты расчетов скользящих коэффициентов корреляции σT_m и $\sigma NmF2$ на 27-дневном интервале представлены на Рисунке 8а.

Рис. 8. а - Скользящие коэффициенты корреляции σT_m и $\sigma NmF2$ на 27-дневном интервале: а – без сдвига



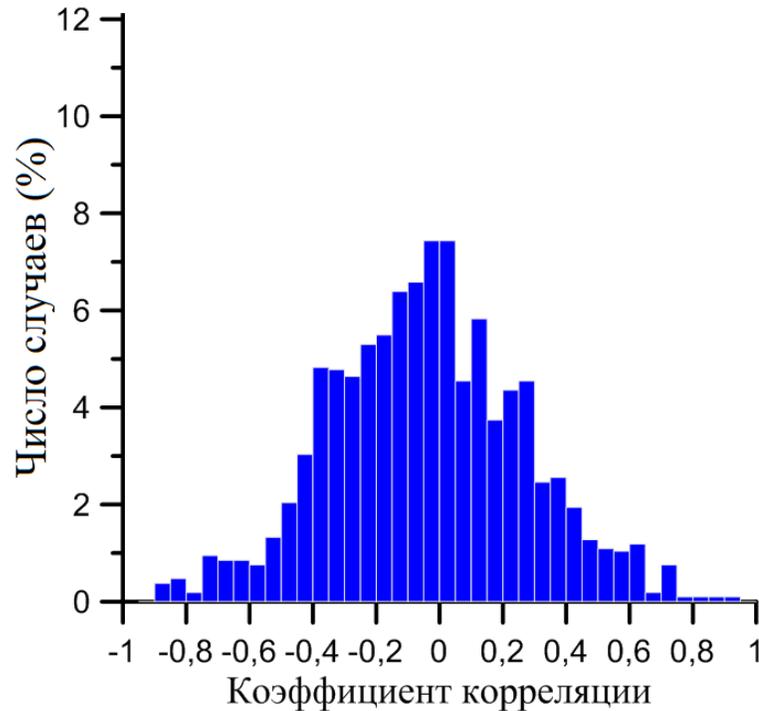
Коэффициент корреляции без сдвига

Число случаев: 2112

Среднее -0.042

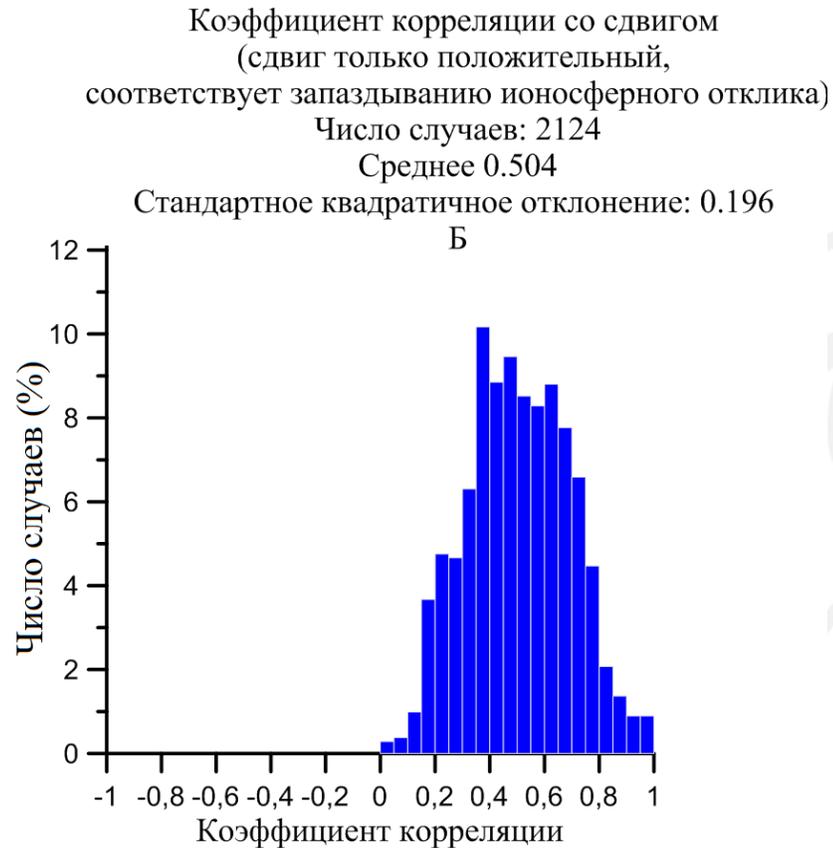
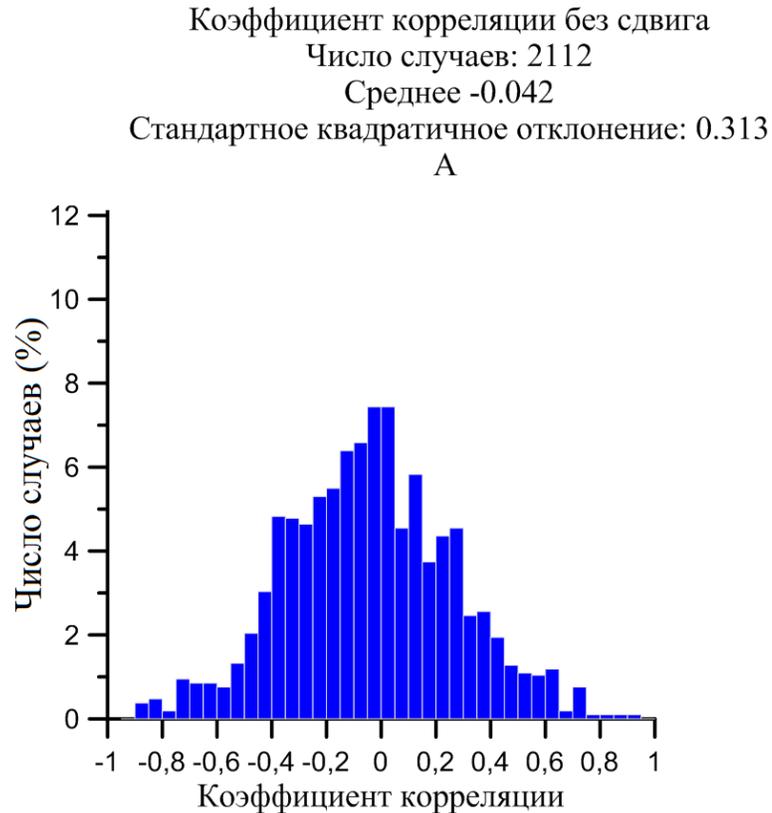
Стандартное квадратичное отклонение: 0.313

А



Из Рисунка 8а видно, что значения коэффициентов корреляции σTm и $\sigma NmF2$ группируются вблизи нулевого значения (-0.042 ± 0.313), высокие положительные и отрицательные значения являются редкими случаями. Потенциальной причиной низкой корреляции σTm и $\sigma NmF2$ может являться запаздывание вариаций $\sigma NmF2$ относительно σTm . Для учета этого эффекта был осуществлен расчет коэффициентов корреляции с учетом сдвига σTm и $\sigma NmF2$.

Рис. 8. а - Скользящие коэффициенты корреляции σTm и $\sigma NmF2$ на 27-дневном интервале: а – без сдвига

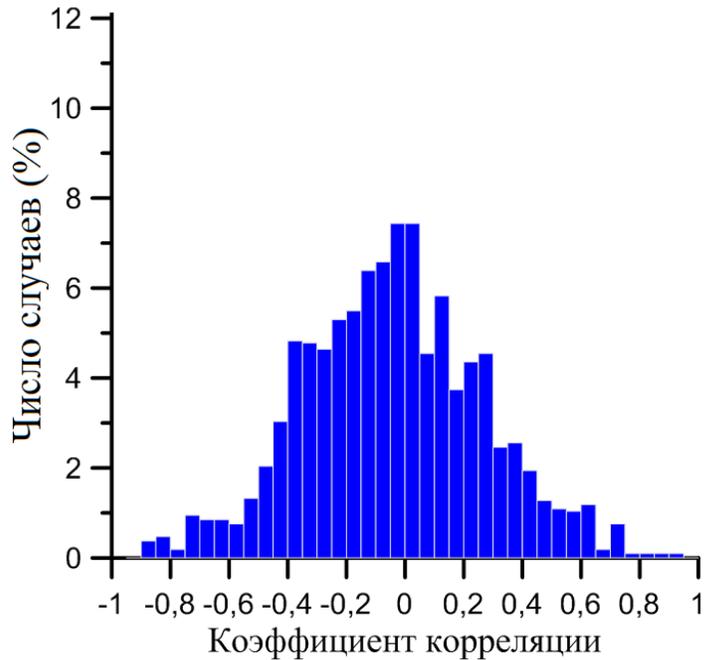


**Учет сдвига приводит к
существенному росту
корреляции, значения
коэффициентов
корреляции группируются
вблизи $\sim 0.5(0.504 \pm 0.196)$.**

Рис. 8. а - Скользящие коэффициенты корреляции σ_{Tm} и σ_{NmF2} на 27-дневном интервале: а – без сдвига, б – со сдвигом



Коэффициент корреляции без сдвига
Число случаев: 2112
Среднее -0.042
Стандартное квадратичное отклонение: 0.313
А



Коэффициент корреляции со сдвигом
(сдвиг только положительный,
соответствует запаздыванию ионосферного отклика)
Число случаев: 2124
Среднее 0.504
Стандартное квадратичное отклонение: 0.196
Б

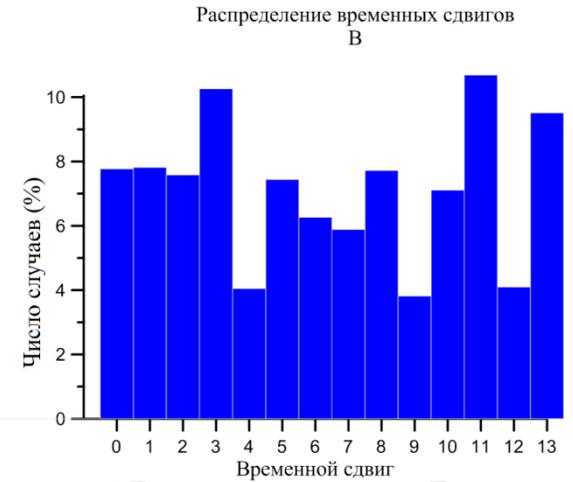
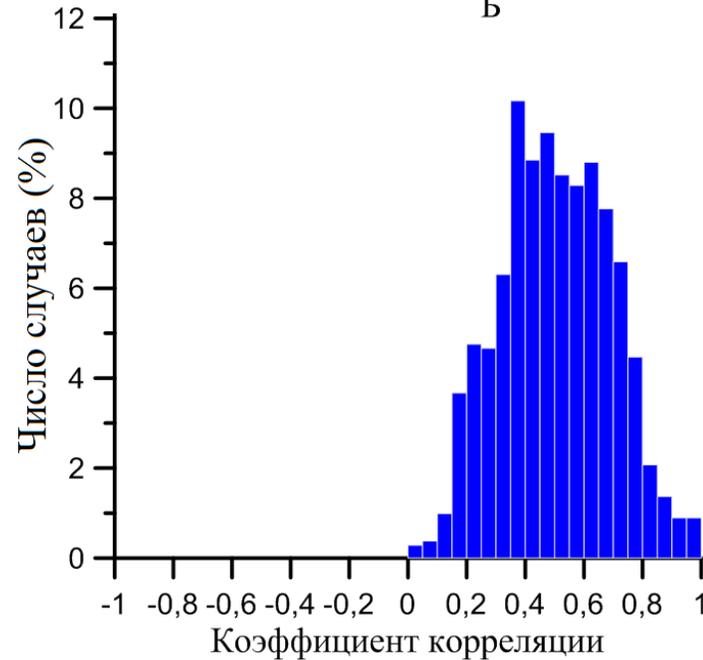


Рис. 8. а - Скользящие коэффициенты корреляции σT_m и $\sigma N_m F_2$ на 27-дневном интервале: а – без сдвига, б – со сдвигом; в – распределение временных сдвигов. Временной сдвиг приобретает все возможные значения (0-13 дней).



Возможные причины наблюдаемых эффектов

Не подтвердилась версия, что мы наблюдаем одни и те же ВГВ, распространяющиеся снизу вверх от мезосферы в ионосферу. Также не подтвердилась версия, что волновая активности в мезосфере, находящейся непосредственно под ионосферой, является источником волновой активности в ионосфере. В противном случае мы бы наблюдали высокую без сдвиговую корреляцию.

Сдвиговая корреляция может быть объяснена тем, что ВГВ активность моделируется планетарными волнами, распространяющимися снизу вверх. В этом случае задержки могут объясняться запаздыванием волны в ионосфере относительно мезосферы.

Сдвиговая корреляция также может быть объяснена тем, что источник наблюдаемой ВГВ возмущенности в ионосфере находится в удалении от станции наблюдения, и ВГВ распространяются не вертикально вверх, а по наклонной траектории.

Согласованные вариации ВГВ возмущений температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации в отдельные временные интервалы могут быть проявлением сильных возмущений в нижележащей атмосфере, имеющих большой пространственный охват, которые могут вызывать значительное усиление волновой активности в широком диапазоне высот верхней атмосферы.



Заключение:

По данным спектрометрических и радиофизических измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН проведен анализ изменчивости температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации с периодами ВГВ ($T < 8$ ч).

В результате корреляционного анализа обнаружено следующее.

Сезонный ход σT_m и $\sigma N_m F_2$, усредненный по всем годам, показал высокую корреляцию ВГВ изменчивости в мезосфере и ионосфере с максимумом в зимний период.

Значения скользящих коэффициенты корреляции σT_m и $\sigma N_m F_2$ на 27-дневном интервале без сдвига являются низкими и группируются вблизи нулевого значения (-0.042 ± 0.313).

Учет сдвига приводит к существенному росту корреляции, значения коэффициентов корреляции группируются вблизи ~ 0.5 (0.504 ± 0.196).

Сдвиговая корреляция может быть объяснена тем, что ВГВ активность моделируется планетарными волнами, распространяющимися снизу вверх. В этом случае задержки могут объясняться запаздыванием волны в ионосфере относительно мезосферы.

Сдвиговая корреляция также может быть объяснена тем, что источник наблюдаемой ВГВ возмущенности в ионосфере находится в удалении от станции наблюдения, и ВГВ распространяются не вертикально вверх, а по наклонной траектории.

Согласованные вариации ВГВ возмущений температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации в отдельные временные интервалы могут быть проявлением сильных возмущений в нижележащей атмосфере, имеющих большой пространственный охват, которые могут вызывать значительное усиление волновой активности в широком диапазоне высот верхней атмосферы.



Литература:

- **Медведева И. В., Ратовский К. Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 2. С. 236–248. DOI: 10.7868/S0016794017020109.**
- **Medvedeva, I., and K. Ratovsky (2015), Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, Issue 6, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 5151–5159, doi:10.1002/2015JA021289.**
- **Перминов В. И., Семенов А. И., Медведева И. В., Перцев Н. Н. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Том: 54 , №: 2. 2014. С. 246-256. DOI: 10.7868/S0016794014020151.**
- **Толстикова М.В., Ратовский К.Г., Медведева И.В., Хабитуев Д.С. Оценка влияния стратосферной активности на ионосферу по данным измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 4. С. 84–90. DOI: 10.12737/szf-74202108.**
- **Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 105. P. 350-357.**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 22-17-00146).



ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Спасибо за внимание!

