Воздействие Внезапных Стратосферных Потеплений (SSW) на Верхнюю Атмосферу и Ионосферу Земли

Andrey Mikhailov[1] & Loredana Perrone[2]

(1) Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow, Russia
(2) National Institute of Geophysics and Volcanology, Rome, Italy

Верхняя Атмосфера и Ионосфера Земли – открытая система со многими неконтролируемыми или плохо контролируемыми входами как сверху, так и снизу, что затрудняет ее исследование и моделирование

Upper Atmosphere is an Open Multi-Component System with Many Uncontrolled Inputs

Magnetospheric Electric Fields

Solar EUV

Particles Precipitation

Multi - component neutral medium

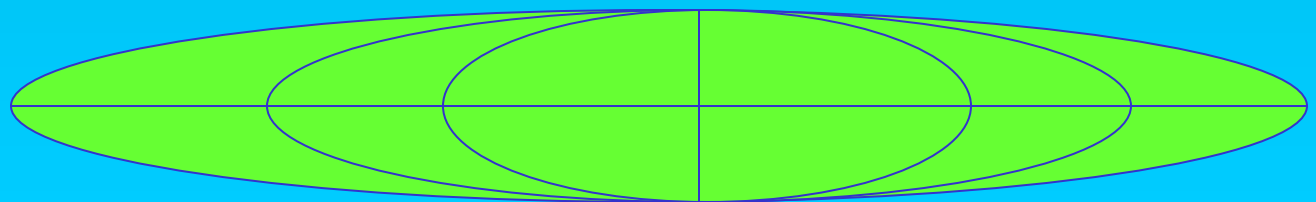
Upper Atmosphere
Thermosphere
Ionosphere

Multi - component ion medium

Internal Gravity Waves

Dynamo and Tropospheric Electric Fields

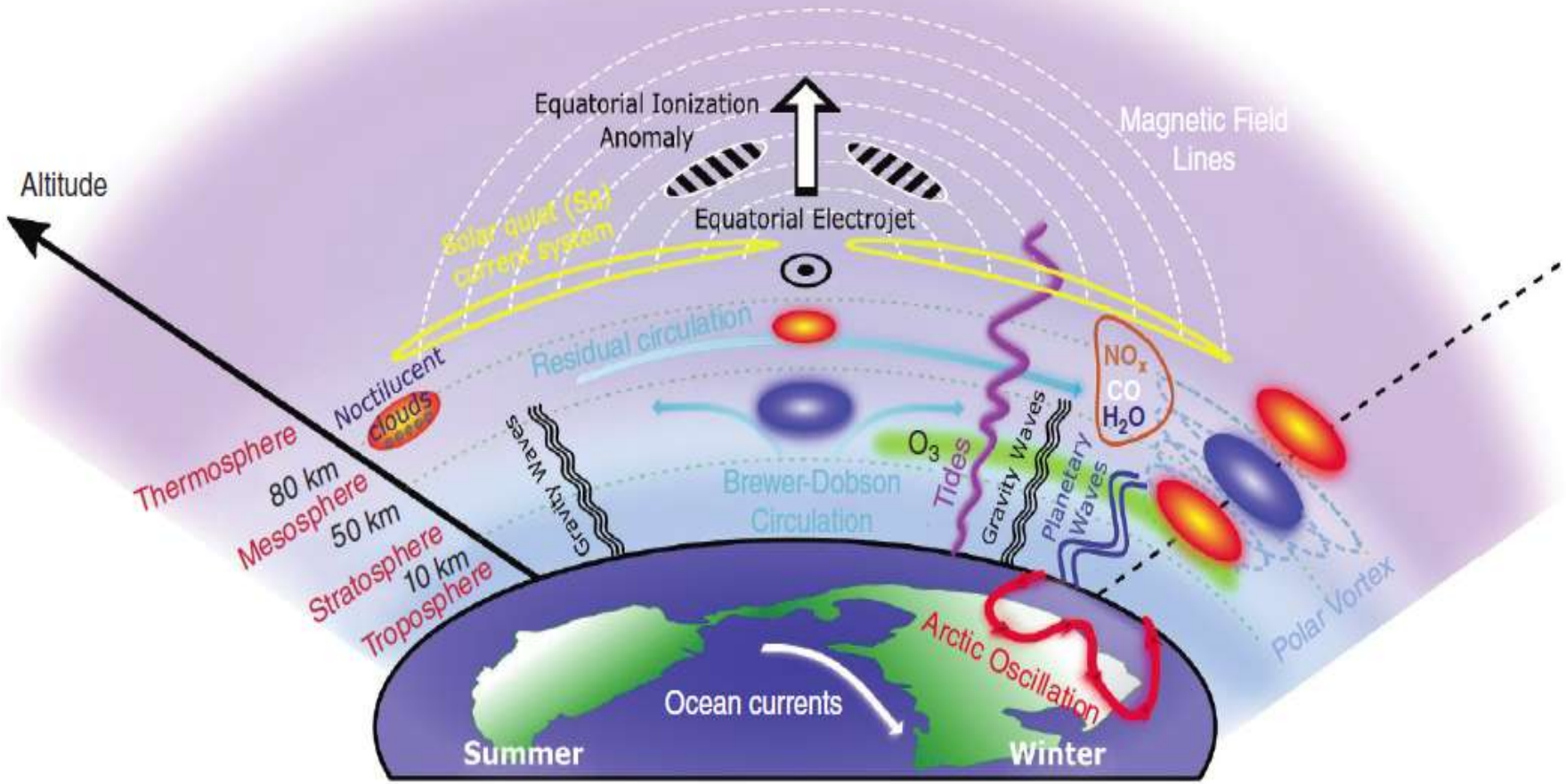
Planetary Waves



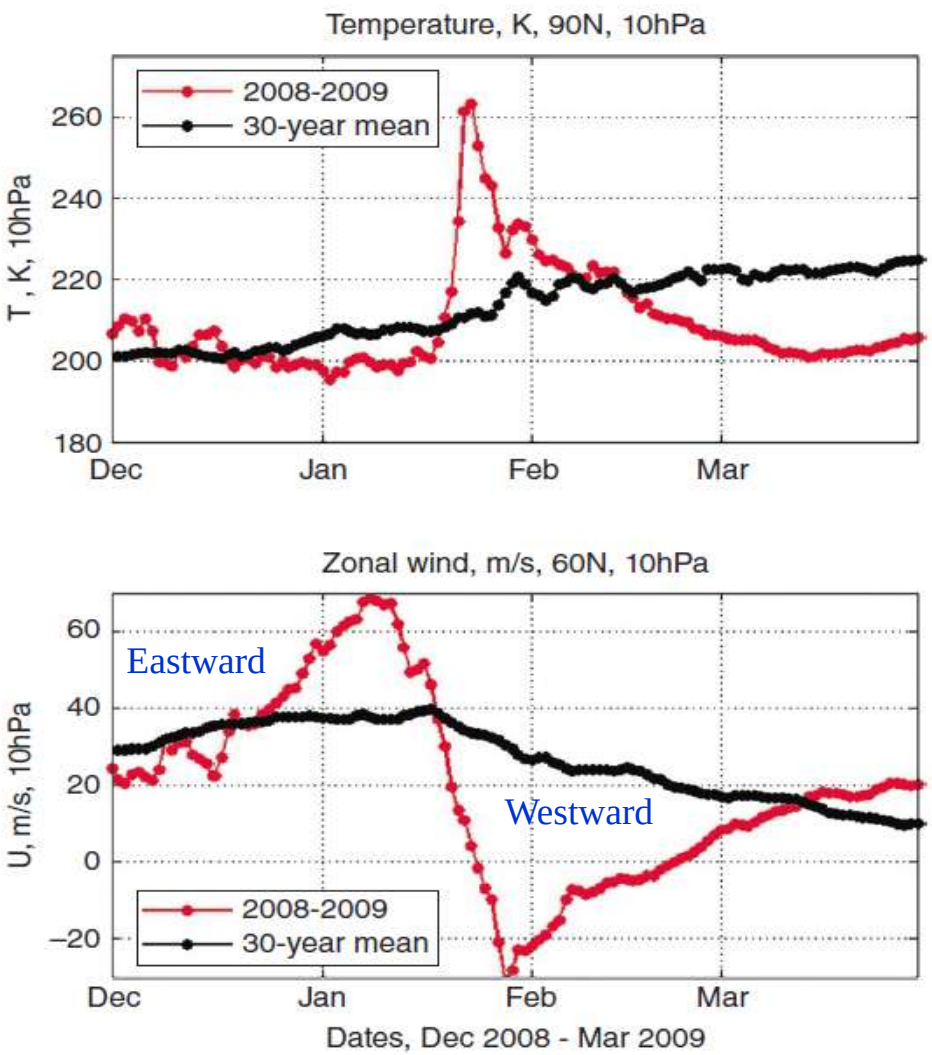
Проблема воздействия снизу (метеорологический контроль) обсуждается десятилетиями на уровне спекуляций , но лишь в последнее время были получены результаты, прямо указывающие на такое воздействие.

В качестве агента воздействия выступили

Внезапные Стратосферные Потепления (SSW)



Schematic of the coupling processes and atmospheric variability that occur during SSW events. Red and blue circles denote regions of warming and cooling, respectively.



Variations in stratospheric temperature (top) at 90°N, 10hPa (~32 km) and stratospheric wind (bottom) at 60°N, 10hPa during a major SSW of January 2009 in a comparison with 30-year mean values

Наблюдения Ионосферы и Термосферы в периоды SSWs

Наиболее заметные эффекты выявлены в экваториальной и низкоширотной ионосфере, связанные с вариациями ExB дрейфов, однако эффекты проявляются и в глобальном масштабе. Несколько примеров.

1. Анализ дынных наблюдений COSMIC (Pancheva & Mukhtarov, 2011) во время SSW 2008 и 2009 показало в среднем по земному шару уменьшение foF2 на (0.7-0.8) MHz и высоты hmF2 на (10-12) km с задержкой в 2-3 дня относительно пика температуры в стратосфере.

2. Сильное уменьшение общей плотности по данным спутников CHAMP и GRACE обнаружено в экваториальной области (январь 2009), что было связано с охлаждением термосферы на ~ 50K. Синхронно наблюдалось уменьшение электронной концентрации на 325 км (Liu et al., 2011).

3. Оптические наблюдения Oberheide et al., (2020) на GOLD впервые показали уменьшение O/N_2 в столбе во время SSW в январе 2019, не связанное с геомагнитной активностью.

Проведенный анализ включает

1. Наблюдения foF2 на Мировой сети станций ионосферного зондирования

2. Спутниковые (CHAMP, GOCE, Swarm) наблюдения общей плотности

3. Minor (2008, in September 2019) & Major SSW (2006, 2009, 2013)

4. Оригинальный метод по восстановлению термосферных параметров из ионосферных наблюдений и спутниковых измерений общей плотности термосферы

5. Анализ возможного механизма формирования наблюдаемых аномалий в термосфере и ионосфере Земли во время SSWs

Inverse Problem of Aeronomy

at Middle Latitudes, Noontime hours

(Multiparametric Optimization)

INPUT

Observed

foF1, foF2

Neutral gas density

→

F-layer Theoretical Model

→

OUTPUT

A Self-Consistent Set of Thermosphere Parameters

Tex

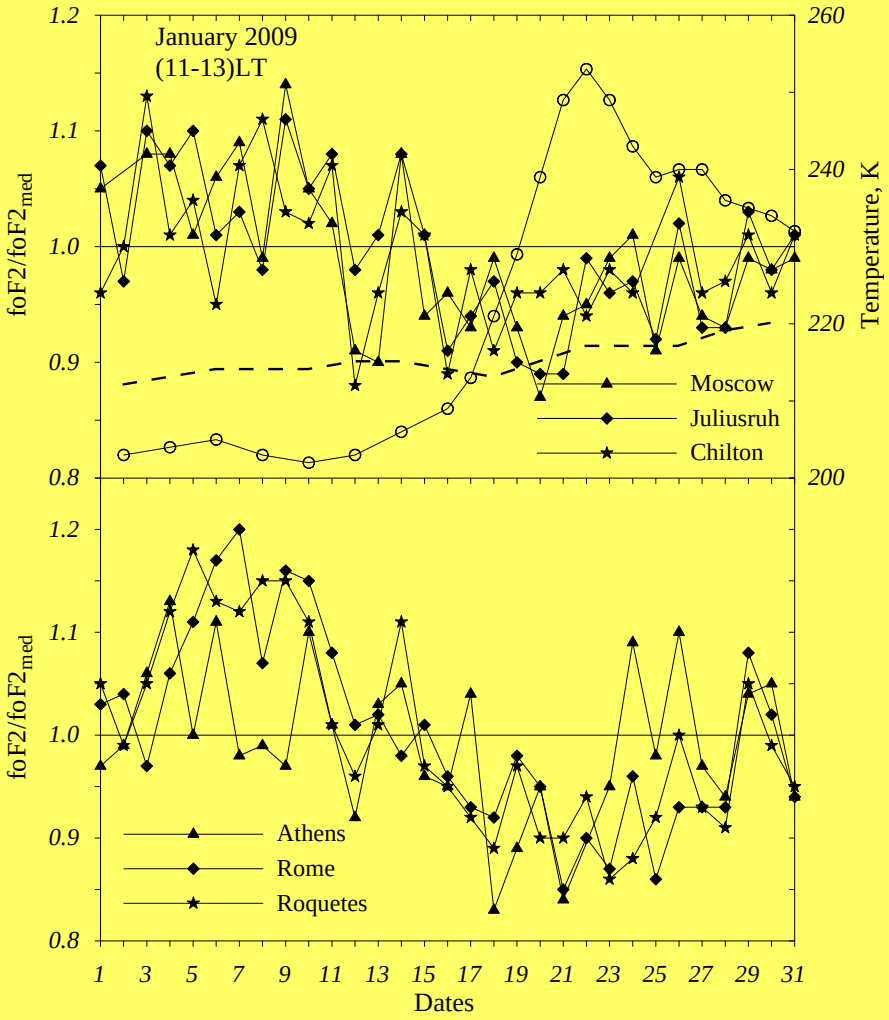
[O], [O_2], [N_2]

EUV with λ<1050Å

W → Vnx, hmF2

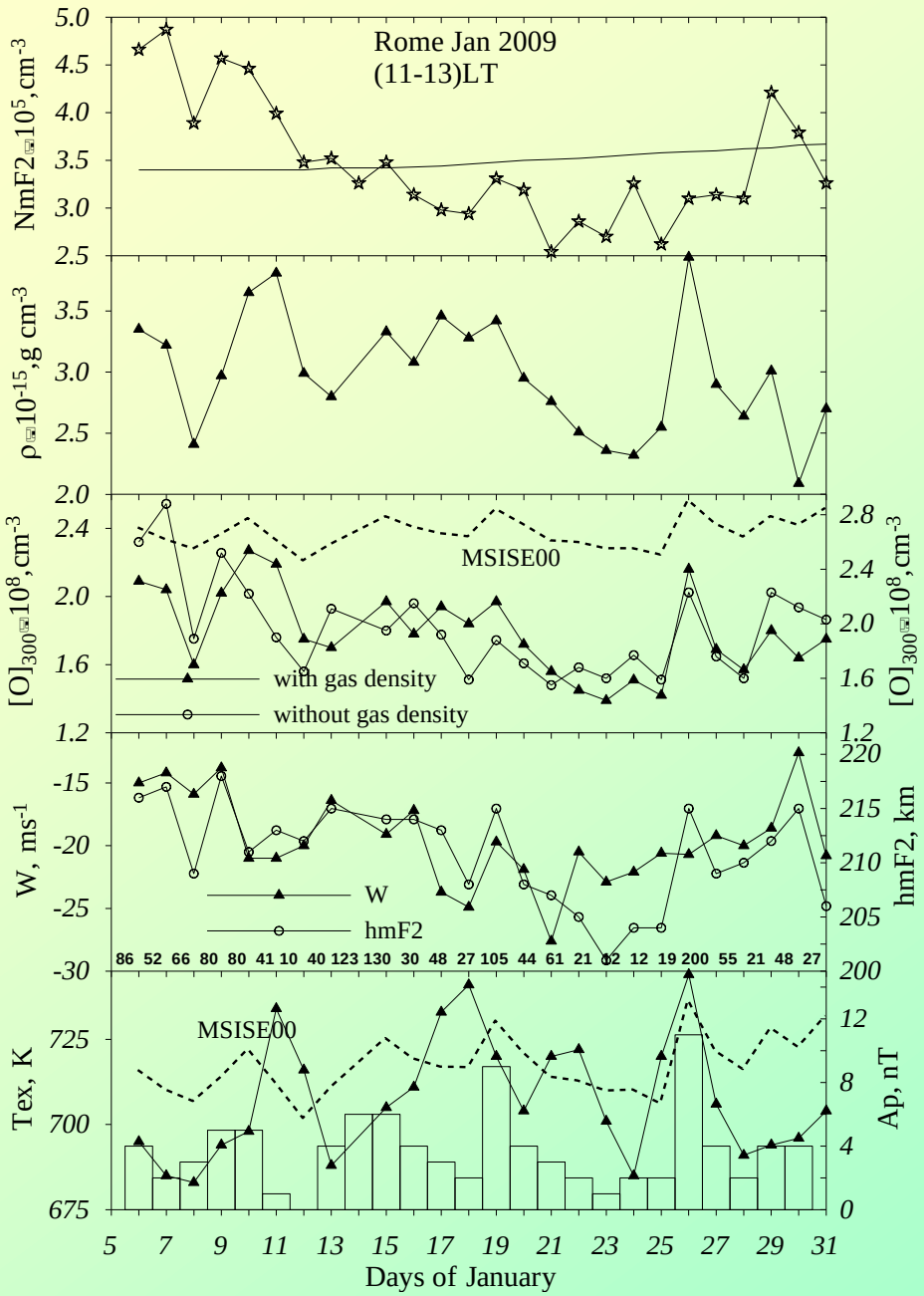
Ion Composition

Отношение foF2/foF2$_{med}$ для двух групп станций во время Major SSW в январе 2009 (Идеальный случай в глубоком минимуме СА с минимальным авроральным водействием)



Кружки - стратосферная температура на 32 км (60^0-90^0)N

Пунктир - 30-летние средние значения



Наблюдаемые (NmF2, ρ) и восстановленные ([O], W, Tex, hmF_2) параметры для Рима в январе 2009 в сравнении с термосферной моделью MSISE00 (пунктир)

Отметьте низкий уровень геомагнитной активности

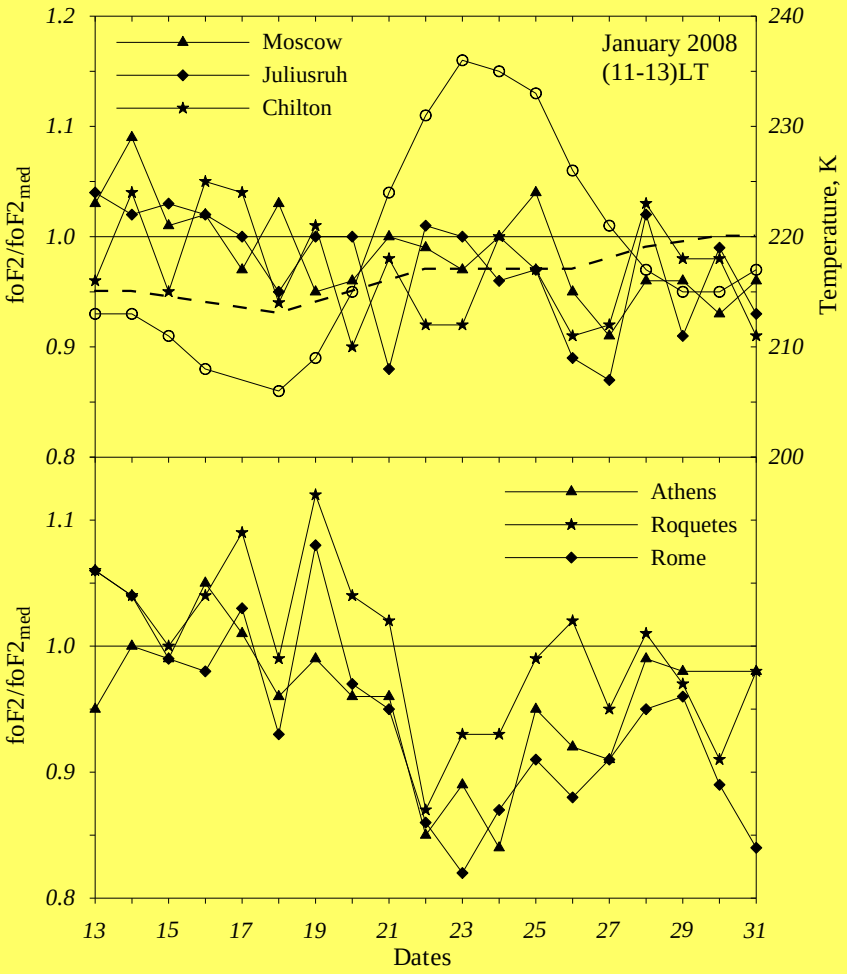
Анализ результатов по станции Рим

1. Оба метода дают уменьшение $[O]_{300}$ с минимумом вблизи максимума SSW 24 января, т.е. эта депрессия $[O]_{300}$ не связана с минимумом в ρ, но отражает наблюдаемое уменьшение NmF_2.
2. Коэффициент корреляции NmF_2 с $[O]_{300}$ составляет 0.840 ± 0.193 (R^2 = 0.71) (99.9% уровень значимости) т.е. ~ 70% изменчивости NmF2 связан с вариациями [O].
3. Коэффициент корреляции $[O]_{300}$ с наблюдаемой ρ составляет 0.892 ± 0.134 (R^2 ~ 0.8) (99.9% уровень значимости), т.е. 80% изменчивости ρ связаны с с вариациями [O], остальное можно отнести за счет изменений температуры.
4. MSISE00, которая контролируется индексами $F_{10.7}$ и Ap предсказывает очень малые вариации $[O]_{300}$ без к-л уменьшения в окрестностях пика SSW (23-24 января).
5. Восстановленные вариации hmF2 указывают на явную депрессию вблизи 23 января, что связано в основном с вариациями W

$$h_m F2 = \frac{H}{3}\left[\ln(\beta_1 \cdot [O]_1) + \ln(H^2/(0.54d))\right] + f(W)$$

Падение hmF2 составляет 10-15 км, что совпадает с оценками, полученными из данных COSMIC для SSW 2009 (Pancheva & Mukhtarov).

Отношение $foF2/foF2_{med}$ для двух групп станций во время Minor SSW в январе 2008.



Кружки - стратосферная температура на 32 км (60^0-90^0)N

Пунктир - 30-летние средние значения

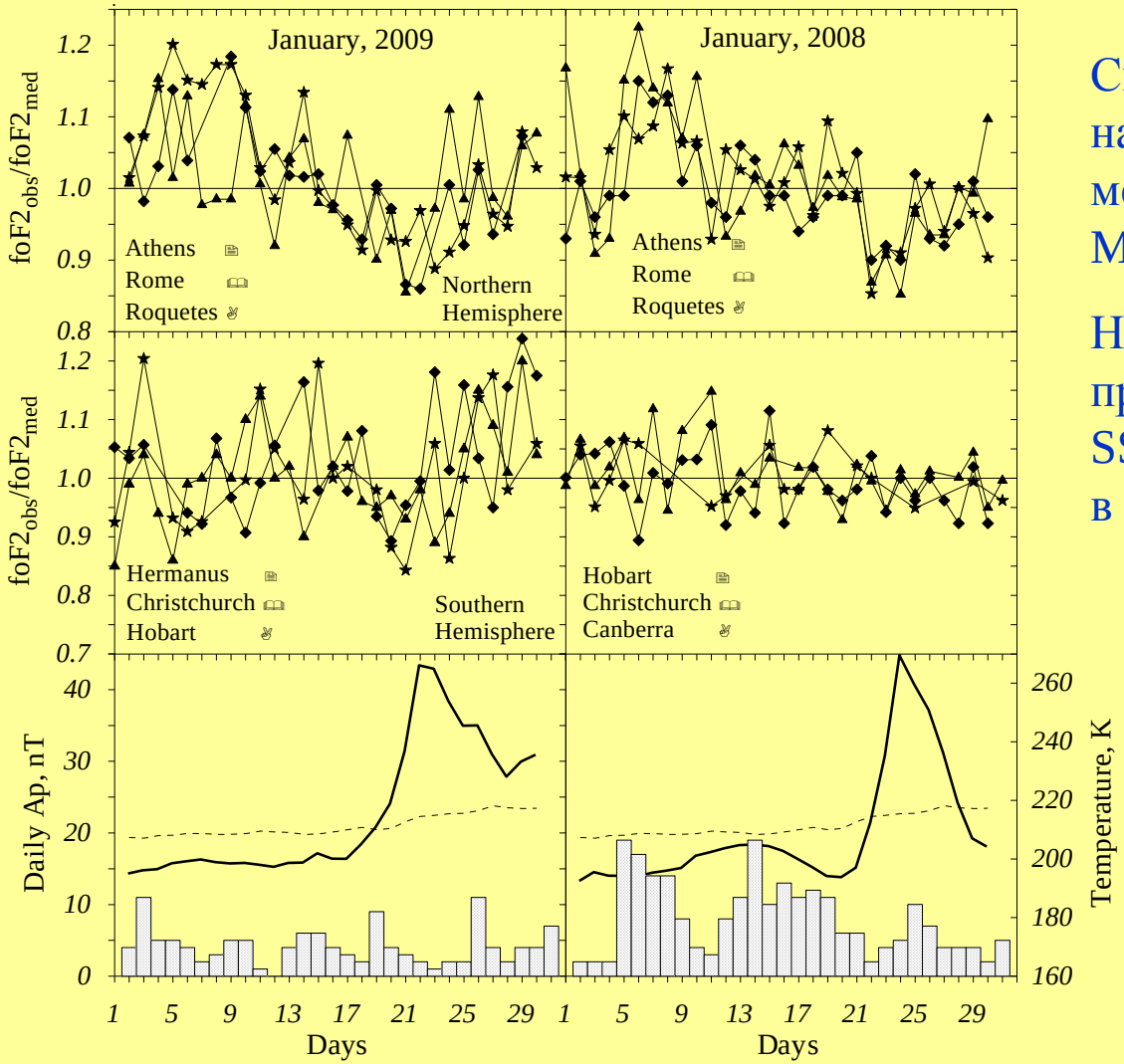
Восстановленные термосферные параметры для Minor SSW показали аналогичные вариации как и в случае Major SSW 2009

Носят ли эффекты SSW глобальный характер?

Список станций, использованных для анализа

Station	Geographic coordinates	Station	Geographic coordinates
Rome	41.9N, 12.5E	Hermanus	34.4S, 19.2E
Athens	38.0N, 23.5E	Grahamstown	33.3S, 26.5E
Roquetes	40.8N, 0.5E	Christchurch	43.6S, 172.8E
Millstone Hill	42.6N, 288.5E	Canberra	35.3S, 149.0E
Point Arguello	34.8N, 239.5E	Hobart	42.9S, 147.3E
Boulder	40.0N, 254.7E		

Полуденные foF2/foF2med по станциям Северного и Южного п.ш. для Major (январь 2009) и Minor (январь 2008) SSWs.

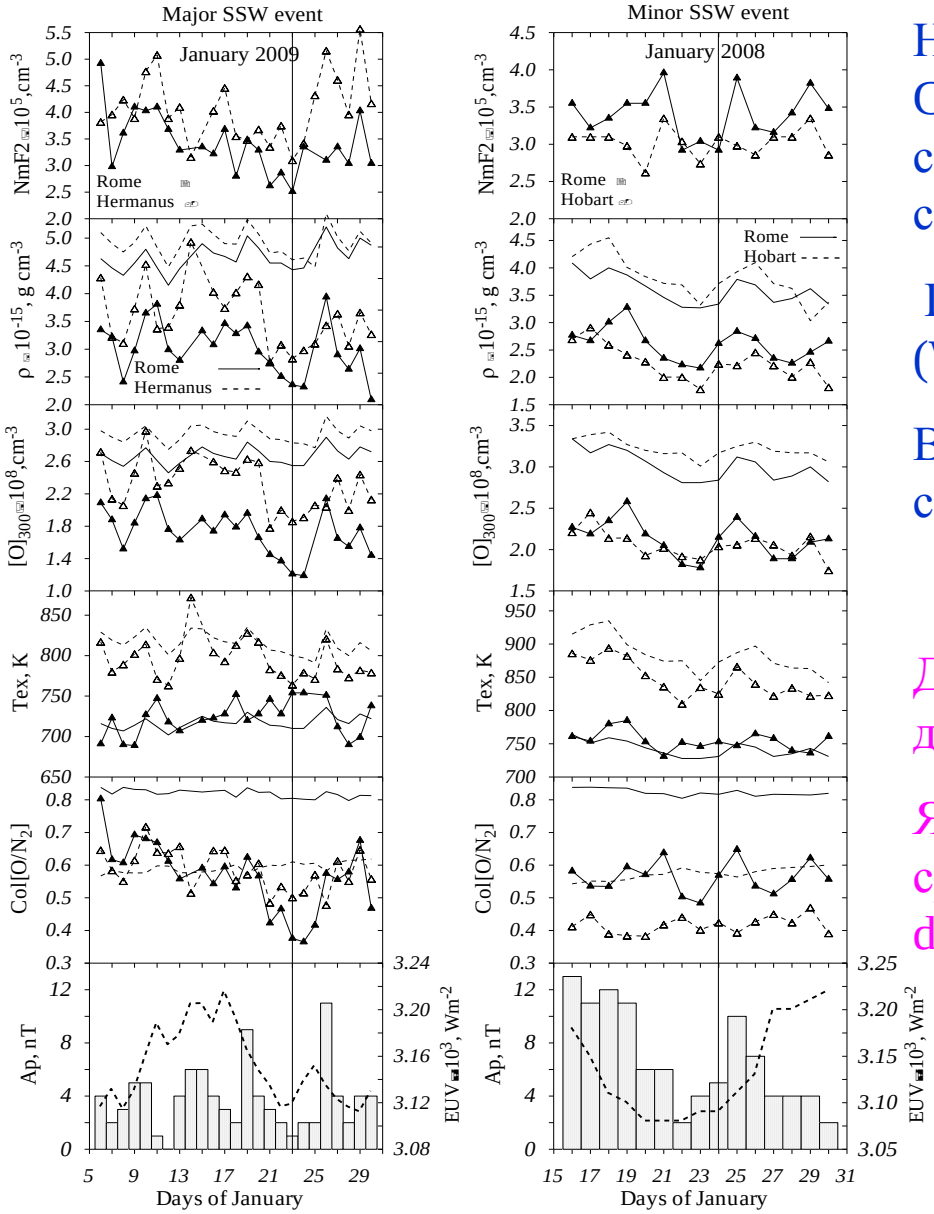


Синхронное уменьшение foF2 на ст. Северного п.ш. имеет место как для Major, так и для Minor SSW.

Но в Южном п.ш. это происходит только для Major SSW (2009) и никакой реакции в случае Minor SSW.

Rome-Hermanus

Rome-Hobart



Наблюдаемые полуденные NmF2, CHAMP/STAR общая плотность вместе с восстановленными $[O]_{300}$, Tex и O/N_2 в столбе атмосферы.

Полный поток EUV (100–1200) Å (Woods et al., 2018) и Ap индексы.

Вертикальные линии – максимум T в стратосфере (пик SSW).

Для дальнейшего анализа были взяты даты с Ap < 2 nT:

Январь 23, 2009 (вблизи пика SSW) сравнении с Январь 11, 2009 (reference day)

Retrieved ρ, [O], [N_2] at 300 km along with Tex and column O/N_2 ratio are given for the Major SSW (Jan 23, 2009 the first line) and reference (Jan 11, 2009 italic, second line) days at Rome and Hermanus. The ratio for reference/selected days in % - third line.

Station	$\rho_{300} \times 10^{-15}$ g cm^{-3}	Tex K	$[O]_{300} \times 10^{8}$ cm^{-3}	$[N_2]_{300} \times 10^{7}$ cm^{-3}	Col (O/N_2)
Rome	4.32 *6.88* 59%	754 *747* < 1%	1.21 *2.18* 80%	2.29 *2.28* < 1%	0.38 *0.68* 79%
Hermanus	6.67 *7.85* 18%	764 *771* < 1%	1.86 *2.31* 24%	3.60 *3.62* < 1%	0.50 *0.64* 28%

1. Отсутствие видимых вариаций Тех и соответсвенно [N_2]. Процессы во время SSW не влияют на Тех и N_2

2. Атомный кислород демонстрирует сильное (~ 80%) уменьшение вблизи максимума SSW, тогда как ρ ~ 59% поскольку [N_2] не меняется. Эти же (~ 80%) видны и в col(O/N_2)

3. В южном п.ш. видны те же вариации, но с меньшей магнитудой

Retrieved ρ, [O], [N_2] at 300 km along with Tex and column O/N_2 ratio are given for the Minor SSW (Jan 22, 2008 the first line and reference Jan 30, 2008 italic, second line) days at Rome and Hermanus. The ratio for reference/selected days in % - third line.

Station	$\rho_{300} \times 10^{-15}$ g cm^{-3}	Tex K	$[O]_{300} \times 10^{8}$ cm^{-3}	$[N_2]_{300} \times 10^{7}$ cm^{-3}	Col (O/N_2)
Rome	6.17 *7.18* 16%	752 *761* 1%	1.82 *2.13* 17%	2.80 *3.17* 13%	0.50 *0.56* 12%
Hobart	7.54 *7.18* -5%	810 *823* < 2%	1.92 *1.75* -9%	5.09 *5.28* < 4%	0.44 *0.39* -11%

1. Результаты аналогичны январю 2009, но с гораздо меньшей магнитудой

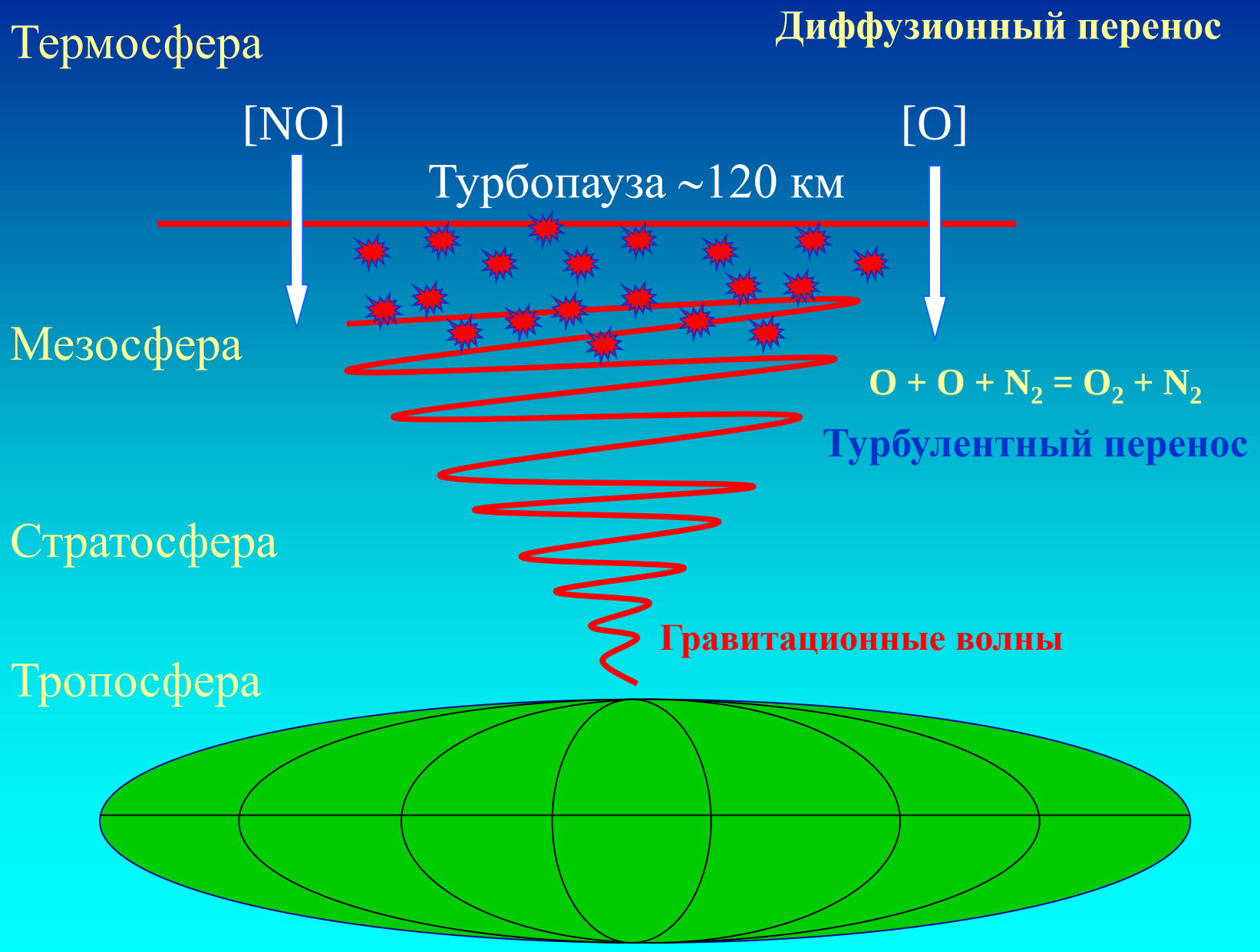
2. Южное п.ш. демонстрирует малые и нерегулярные изменения термосферных параметров, что объясняет нерегулярные вариации foF2 для января 2008

3. Заметные эффекты в южном полушарии видны лишь для Major SSWs

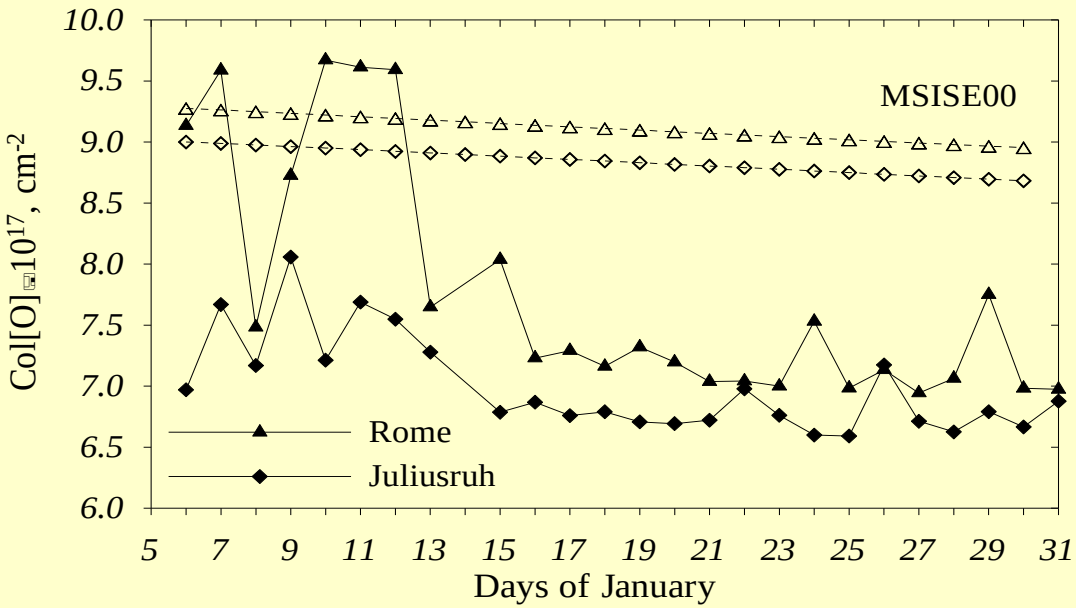
Механизм уменьшения содержания атомного кислорода в термосфере во время SSWs

1. Усиление полусуточного солнечного прилива (SW2) во время SSWs меняет зональную циркуляцию в нижней термосфере, что ведет к уменьшению содержания [O]. Механизм чисто спекулятивный, основанный на модельных расчетах и ничем не подкрепленный.

2. Интенсивность гравитационных волн возрастает во время SSWs (есть данные). Их диссипация ведет к усилению турбулентной диффузии в нижней термосфере, что создает усиленный сток атомного кислорода вниз в область его сильной ассоциации.


Термосфера
Диффузионный перенос
[NO]
[O]
Турбопауза ~120 км
Мезосфера
O + O + N2 = O2 + N2
Турбулентный перенос
Стратосфера
Гравитационные волны
Тропосфера

Теоретически было показано
[Gordiets et al., Numerical Modelling of the Thermospheric Heat Budget. *J. Geophys. Res.* **1982**, *87*, 4504-4514],
что усредненный коэффициент турбулентной диффузии (Kedd) в термосфере не может превышать $3x10^6$ cm^2/s и это было подтверждено наблюдениями [Liu, Estimate eddy diffusion coefficients from gravity wave vertical momentum and heat fluxes. *Geophys. Res. Lett.* **2009**, *36*, L08806]
Kedd ~ $4x10^6$ cm^2/s на 85–100 km



Можно думать, что был достигнут максимально возможный уровень турбулентности.

Retrieved column atomic oxygen abundance at Rome and Juliusruh in January 2009.

Model MSISE00 variations are given with open symbols.

Независимое подтверждение механизма усиления турбулентной диффузии во время SSWs.

Наблюдения за распространением (VLF/LF) в дневное время в северном п.ш во время SSW (2009) показало увеличение амплитуды радио-сигналов по сравнению с нормальными днями.
Pal, S.; Hobara, Y.; Chakrabarti, S.K.; Schnoor, P.W. Effects of the major sudden stratospheric warming event of 2009 on the subionospheric very low frequency/low frequency radio signals, *J. Geophys. Res.*, 2017, *122*, 7555-7566

Может быть дано простое объяснение этим наблюдениям.

При усилении турбулентной диффузии усиливается сток NO из нижней термосферы вниз на высоты D-области. NO ионизуется HLy излучением. Увеличение концентрации NO ведет к увеличению электронной концентрации и соответственно, к увеличению амплитуды (VLF/LF) сигналов.

Основные Результаты

1. Основной термосферный эффект SSWs состоит в уменьшение содержания [O] наблюдаемое также в общей плотности термосферы ρ и в атмосферном столбе отношения O/N_2.

2. Противоположно общепринятому представлению экзосферная температура Tex не демонстрирует заметных вариаций как во время мажорных, так и минорных SSWs.

3. Меньшая магнитуда вариаций foF_2 в южном п.ш. по сравнению с северным видна и в термосферных параметрах для мажорного SSW в январе 2009:
   18% по сравнению с 59% для ρ_{300},
   24% по сравнению с 80% для $[O]_{300}$,
   28% по сравнению с79% для O/N_2 в столбе атмосферы

4. В случае минорного SSW в январе 2008 в соответствии с меньшими вариациями foF_2 в серном п.ш. и нерегулярными вариациями foF_2 в южном п.ш. термосферные параметры демонстрируют аналогичные отличия двух полушарий.

Основные Результаты

5. Общий вывод по результатам анализа всех рассмотренных SSWs: хорошо выраженные термосферные эффекты в противоположном (южном) п.ш. наблюдаются лишь для сильных мажорных арктических SSWs.

6. Продолжительность уменьшения foF_2 и [O] во время SSWs составдяет 3-5 дней вблизи пика SSW. Это согласуется с данными наблюдений Shepherd & Shepherd (2011) объемной эмиссии $O(^1S)$ в периоды SSWs.
   Данный результат противоречит широко распространенному представлению о долговременных изменениях в термосфере, связанных с SSWs.