



Нелинейные фотохимические осцилляции и волны в атмосфере Земли

Куликов М.Ю., Фейгин А.М.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Внешние

воздействия :

антропогенные эмиссии,
изменчивость температуры
и давления, потоки
заряженных частиц,
вариации солнечного УФ
излучения)

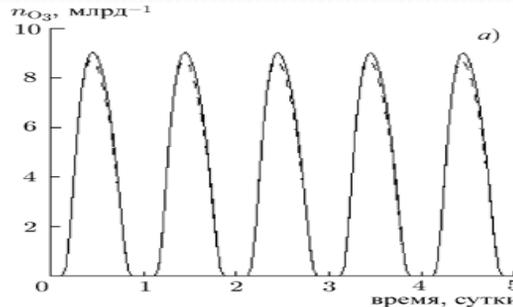
«Врожденная»

нелинейность атмосферной
фотохимии

фотохимические
источники и стоки

ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ

Термическая структура
Радиационный баланс
Глобальная циркуляция
Озоновый слой
Приземный состав воздуха



Пример:
эволюция
концентрации
приземного озона
с периодом
1 сутки

$$\frac{d}{dt}(X_i) = I_i - S_i$$

$$I_i = \dots + \sum_{l,m \neq i} k_i^{lm} \cdot X_l \cdot X_m + \dots$$

Квадратичные слагаемые за
счет бимолекулярных реакций

Нетривиальные нелинейно-динамические свойства атмосферных фотохимических систем:

мультистабильность, автоколебания, нелинейный отклик на внешние периодические воздействия (возникновение широкого спектра субгармонических и хаотических колебаний)

Такие эффекты обнаружены:

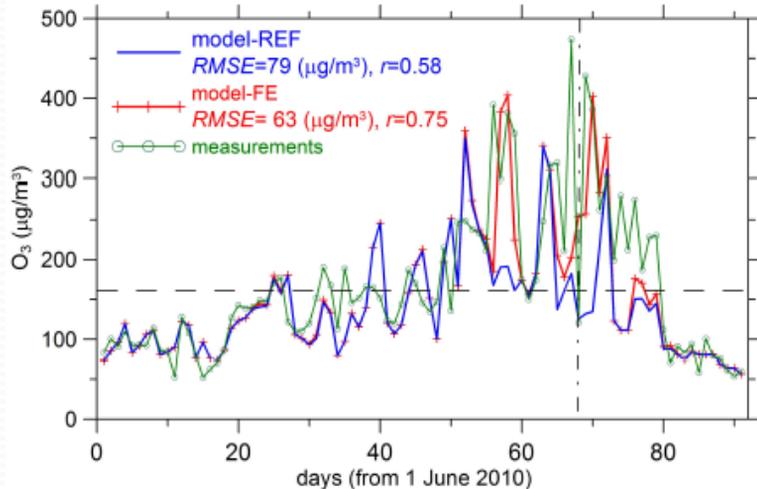
в химии приземного загрязненного воздуха, эволюции антарктической озонной дыры, фотохимии области мезопаузы (80-90 км)

Приземный озон

ВОЗ включила в список пяти основных загрязняющих веществ, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха (WHO, 2006). В России озон относится к веществам первого (наивысшего) класса опасности (ГН, 2003). ПДК: 160 мкг/м³ или 80 ppb (молекул на миллиард молекул воздуха). Вклад повышенных концентраций приземного озона в дополнительную глобальную смертность оценивается в 375 тысяч смертей в год, прежде всего, за счет смертности от сердечно сосудистых и респираторных заболеваний.

Дневные максимумы средних концентраций озона за 1 час, измеренные Мосэкомониторингом летом 2010 в сравнение с различными модельными данными

Konovalov et al., ACP, 2011

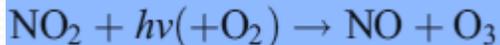


Озон образуется в результате реакции: $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$

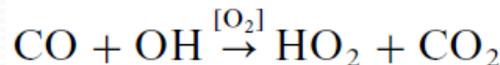
Производство приземного озона в дневное время:

В равновесии

$$P_{O_3} = 0$$



HO₂ образуется в результате окисления CO или углеводородов (VOC):



$$\longrightarrow P_{O_3} \sim OH$$

Равновесные кривые озона в зависимости от скорости эмиссии NO_x при разных эмиссиях VOC (S_{VOC}), Konovalov et al., 2002

Однако, есть еще один канал NO → NO₂

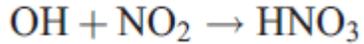
Реакции, лимитирующие концентрацию OH+HO₂

При низком NO_x = NO + NO₂



$$P_{O_3} \sim NO \sim NO_x$$

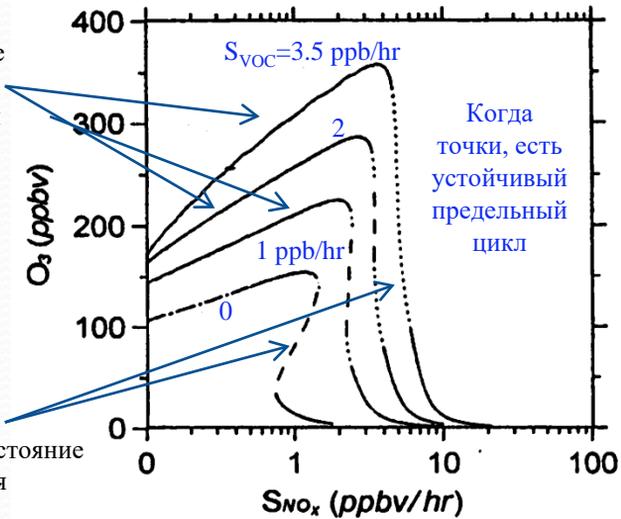
При высоком NO_x = NO + NO₂



$$P_{O_3} \sim NO_2^{-1} \sim NO_x^{-1}$$

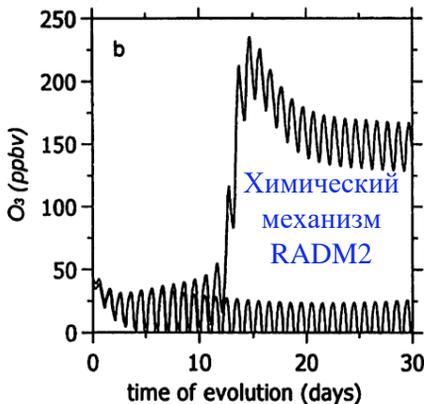
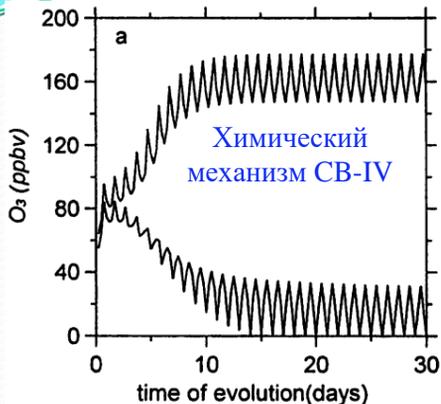
Устойчивое состояние равновесия

Неустойчивое состояние равновесия



Временная эволюция приземного озона с близкими начальными условиями в случае мультистабильности

Konovalov et al., 2002



Химический механизм RADM2 (Regional Acid Deposition Model)

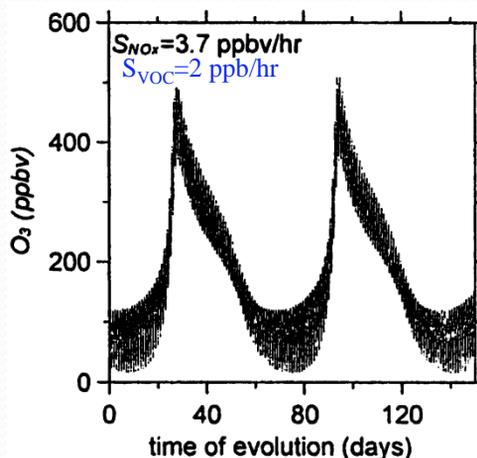
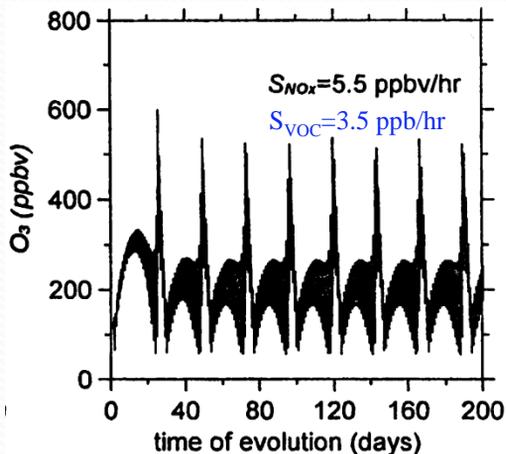
Моделирование качества воздуха на региональных масштабах

Stockwell, et al, 1990

57 переменных (NO_2 , NO , $HONO$, NO_3 , N_2O_5 , HNO_4 , HNO_3 , O_3 , H_2O_2 , SO_2 , $SULF$, CO , ETH , HC_3 , HC_5 , HC_8 , OL_2 , OLT , OLI , ISO , TOL , CSL , XYL , $HCHO$, ALD , KET , GLY , $MGLY$, DCB , PAN , $TPAN$, $ONIT$, OP_1 , OP_2 , PAA , ORA_1 , ORA_2 , MO_2 , $ETHP$, HC_3P , HC_5P , HC_8P , OL_2P , $OLTP$, $OLIP$, $TOLP$, $XYLP$, ACO_3 , $KETP$, TCO_3 , OLN , XNO_2 , XO_2 , HO_2 , O^1D , O^3P , OH),

157 химических реакций

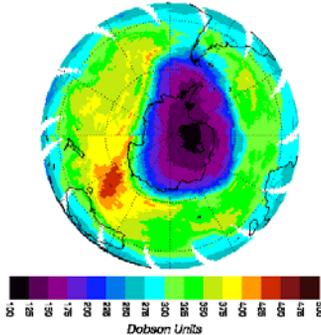
Временная эволюция приземного озона в случае предельного цикла



Химия полярной нижней стратосферы

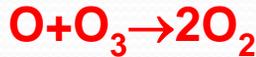
Антарктическая озонная дыра

EP/TOMS Total Ozone for Oct 15, 2001

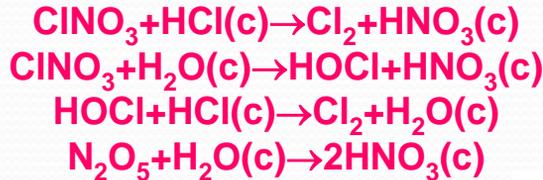


В зимней полярной нижней стратосфере при температуре $<195\text{K}$ возникают полярные стратосферные облака

Именно поэтому интенсивное разрушение озона над Антарктидой начинается в конце августа и заканчивается спустя примерно 2 месяца



$$S_{\text{O}_3} \sim (\text{ClO})^2$$



Динамика озона на 17-18 км по модели и данным измерений из Anderson et al., JGR, 1989 и Komhyr et al., JGR, 1989



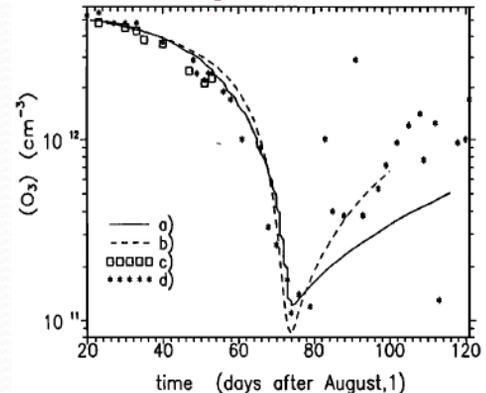
В чисто газофазной химии почти весь хлор находится в резервуарах:

HCl, ClONO₂ и HOCl

С начала весны запускается фотодиссоциация



Feigin et al., JGR, 1996

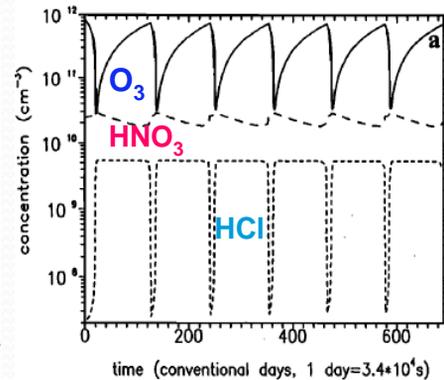
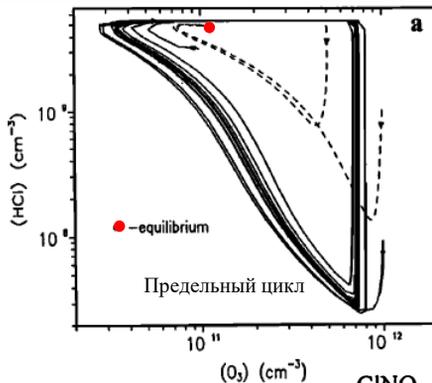
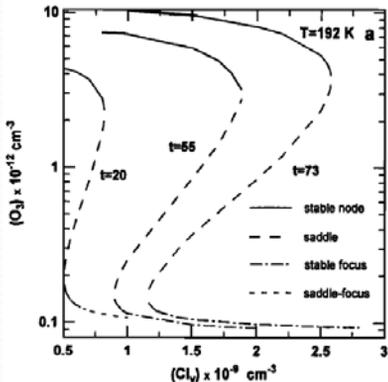


Реакции		Реакции		Реакции	
(R1)	$\text{ClNO}_2 + \text{HCl}(c) \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{HNO}_3(c)$	(R18)	$\text{HO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + 2\text{O}_2$	(R36)	$\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$
(R2)	$\text{ClNO}_2 + \text{H}_2\text{O}(c) \rightarrow \text{HOCl} + \text{HNO}_3(c)$	(R19)	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	(R37)	$\text{ClO} + \text{NO} \rightarrow \text{Cl} + \text{NO}_2$
(R3)	$\text{HOCl} + \text{HCl}(c) \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}(c)$	(R20)	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	(R38)	$\text{Cl} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HOCl} + \text{O}_2$
(R4)	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}(c) \rightarrow 2\text{HNO}_3(c)$	(R21)	$\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$	(R39)	$\text{Cl} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{H}$
(R5)	$\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$	(R22)	$\text{O}(\text{D}) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{OH}$	(R40)	$\text{HCl} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}$
(R6)	$\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow 2\text{O}_2$	(R23)	$\text{NO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$	(R41)	$\text{ClO} + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{ClNO}_2 + \text{M}$
(R7)	$\text{O}(\text{D}) + \text{M} \rightarrow \text{O} + \text{M}$	(R24)	$\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$	(R42)	$\text{ClO} + \text{ClO} + \text{M} \rightarrow \text{ClOOC} + \text{M}$
(R8)	$\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{O}$	(R25)	$\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	(R43)	$\text{Cl} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{HCl} + \text{CH}_3$
(R9)	$\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(\text{D})$	(R26)	$\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{M}$	(R44)	$\text{ClO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HOCl} + \text{O}_2$
(R10)	$\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$	(R27)	$\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$	(R45)	$\text{ClOOC} + h\nu \rightarrow 2\text{Cl} + \text{O}_2$
(R11)	$\text{H}_2\text{O} + \text{O}(\text{D}) \rightarrow 2\text{OH}$	(R28)	$\text{NO}_2 + \text{NO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4 + \text{M}$	(R46)	$\text{Cl}_2 + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{Cl}$
(R12)	$\text{H}_2 + \text{O}(\text{D}) \rightarrow \text{H} + \text{OH}$	(R29)	$\text{HNO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	(R47)	$\text{ClNO}_2 + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{NO}_2$
(R13)	$\text{OH} + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2$	(R30)	$\text{NO} + \text{NO}_3 \rightarrow 2\text{NO}_2$	(R48)	$\text{HOCl} + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{Cl}$
(R14)	$\text{HO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	(R31)	$\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$		
(R15)	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	(R32)	$\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}$		
(R16)	$\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	(R33)	$\text{HNO}_2 + h\nu \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$		
(R17)	$\text{OH} + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$	(R34)	$\text{N}_2\text{O}_5 + h\nu \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_3$		
		(R35)	$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$		

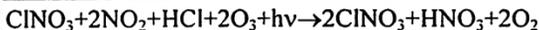
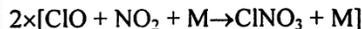
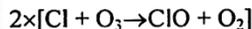
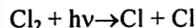
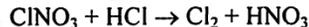
Проведено исследование нелинейно-динамических свойств химии полярной нижней стратосферы в условиях формирования Антарктической озонной дыры.

автоколебания

мультистабильность



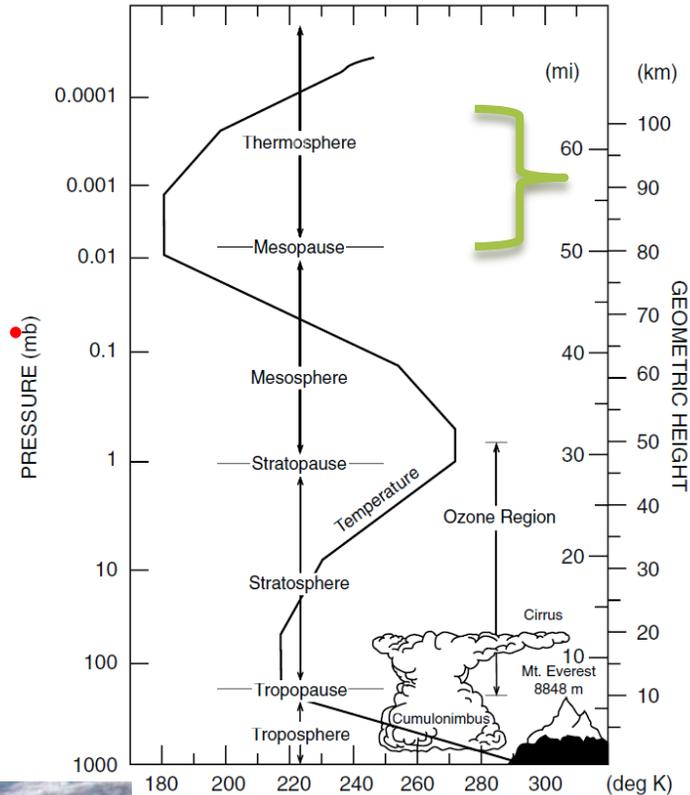
Механизм –
самоускоряющаяся
цепочка реакций



Мезопауза: 80-105 км

Зарегистрирован ряд уникальных явлений и процессов, которые представляют как фундаментальный, так и практический интерес. В частности, на этих высотах температура воздуха может опускаться до самых низких в земных условиях значений (летом вплоть до 100К), что делает эту область особо чувствительной к наблюдаемым климатическим изменениям и антропогенному воздействию на состав атмосферы. В свою очередь, температура зимней мезопаузы существенно (на многие десятки градусов) выше, поэтому только на этих высотах между летним и зимним полушариями существует сильный градиент температуры.

Мезопауза труднодоступна для «прямых» измерений и остается наименее изученной областью атмосферы.

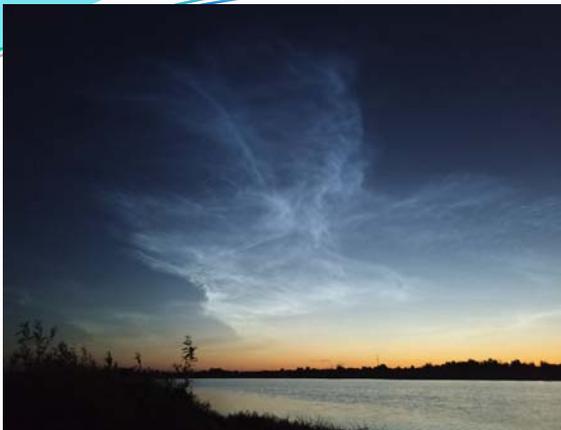


TIMED

A Mission to Explore One of the Last Frontiers in Earth's Atmosphere



Полярные мезосферные облака



Нижегородская обл. 13 июля 2024
локальное время 01:30

Airglows:

Свечения возбужденных ОН, О и O₂



Летнее полярное мезосферное эхо:

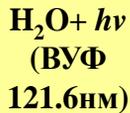
аномальное усиление обратного рассеяния (отражения) радиоволн (нескольких МГц до 1 ГГц) от слоя 80-90 км

Основные свойства:

- Формируются на высотах летней мезопаузы (80-90 км) в диапазоне широт 40-70° обоих полушарий при температурах воздуха ниже 150К.
- Типичный радиус частиц ПМО варьируется в диапазоне 20-100 нм (средний 50-60 нм), концентрация - (20-1000) частиц в см³
- Частицы ПМО преимущественно состоят из льда и образуются в результате конденсации водяного пара [Hervig2001]

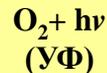


Наиболее важными малыми примесями мезопаузы являются
компоненты семейств нечетных соединений кислорода



Семейство нечетного
водорода HO_x :
Н, ОН, HO_2

Семейство нечетного
кислорода O_x :
 O , $\text{O} (^1\text{D})$, O_3



- | | | | |
|---|---|---|---|
| (1) $\text{O} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$ | (6) $\text{O}_2 + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$ | (11) $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$ | (16) $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}, \text{O} (^1\text{D})$ |
| (2) $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$ | (7) $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{OH}$ | (12) $\text{O}_3 + \text{H} \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ | (17) $\text{OH} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ |
| (3) $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | (8) $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{O}$ | (13) $\text{O}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{HO}_2$ | (18) $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$ |
| (4) $\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$ | (9) $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ | (14) $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow 2\text{OH}$ | (19) $\text{O} (^1\text{D}) + \text{M} \rightarrow \text{O} + \text{M}$ |
| (5) $\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$ | (10) $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow 2\text{O}_2$ | (15) $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$ | (20) $\text{H}_2\text{O} + \text{O} (^1\text{D}) \rightarrow 2\text{OH}$ |

Параметры, определяющие их суточную эволюцию: константы реакций, температура и концентрация воздуха (M), концентрация паров воды

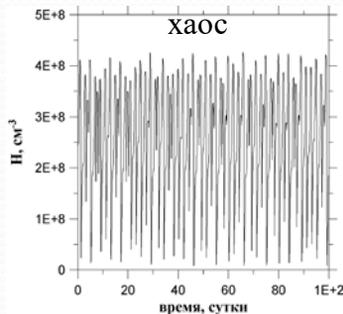
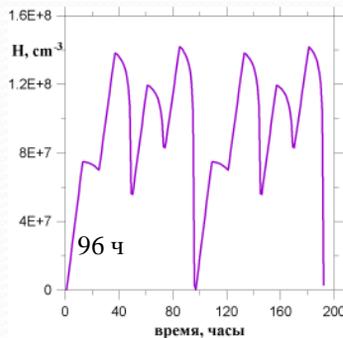
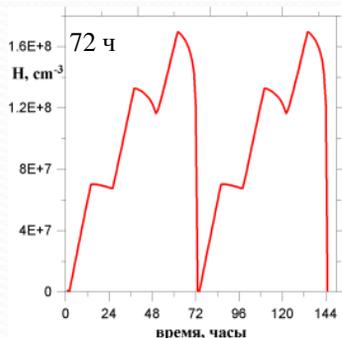
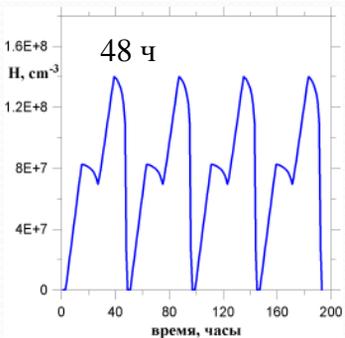
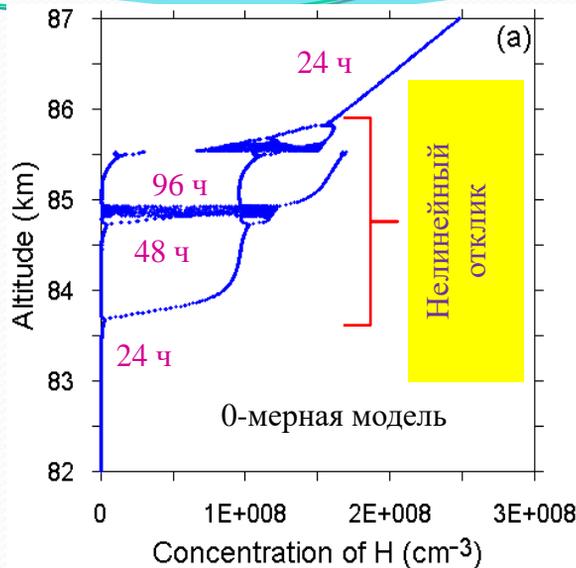
Нелинейный отклик фотохимии мезопазузы (80-90 км) на суточные вариации освещенности

0-мерная модель: Широкий спектр периодических и хаотических осцилляций

Sonnemann and Fichtelmann, Acta Ceod. Geophys., 1987; Fichtelmann and Sonnemann, Ann. Geophys., 1992; Sonnemann and Fichtelmann, JGR, 1997; Feigin et al., JGR, 1998; Scott et al., Chem. Engin. Sci., 2000; Konovalov and Feigin, Nonlinear Proc. Geophys., 2000;

Профили концентрации Н, рассчитанные в последовательные моменты времени, соответствующие концу ночи и разделенные интервалом в 24 часа. Участки бифуркационной диаграммы, где есть только одно значение концентрации Н на каждой высоте, соответствуют тривиальному поведению. Следовательно, два, три, четыре и другие значения концентрации Н на фиксированной высоте указывают на колебания с периодами в 2, 3, 4 дня и т. д. или хаотические колебания.

Бифуркационная диаграмма

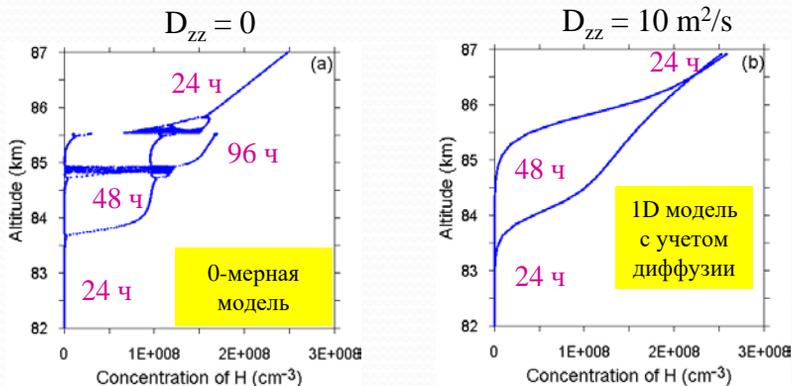


Влияние процессов атмосферного переноса приводит упрощению или усложнению нелинейного отклика

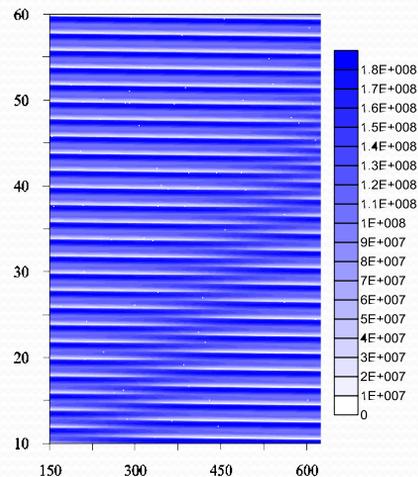
Вертикальная и горизонтальная турбулентная диффузия; зональный, меридиональный и вертикальный ветер, приливы, квазидвухсуточная атмосферная волна, внутренние гравитационные волны

Sonnemann et al., JGR, 1999; Sonnemann and Feigin, Phys. Rev., 1999; Sonnemann, JSTP, 2001; Куликов, ИзВУЗР, 2004; Куликов и Фейгин, ИзРАНСФ, 2004; Kulikov and Feigin, ASR, 2005; Sonnemann and Grygalashvyly, NPG, 2005; Куликов и Гаштури, ИзВУЗР, 2006; Kulikov, JGR, 2007

Бифуркационные диаграммы, демонстрирующие режимы поведения мезосферной фотохимии в зависимости от высоты



При реальных коэффициентах вертикальной турбулентной диффузии могут выживать, по-видимому, только фотохимические осцилляции с периодом 2 суток.



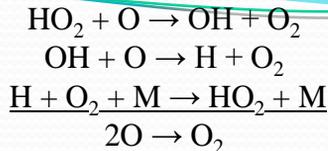
Горизонтальная турбулентная диффузия приводит к возникновению реакционно-диффузионных волн в виде распространяющихся фазовых фронтов 2-суточных осцилляций со скоростью, пропорциональной коэффициенту диффузии.

Куликов и Фейгин, ИзРАНСФ, 2004;
Kulikov and Feigin, ASR, 2005

Свойства двухсуточных фотохимических осцилляций и реакционно-диффузионных волн в области мезопаузы

Химический механизм

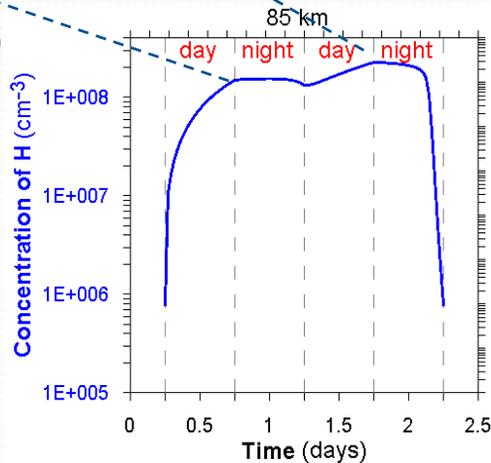
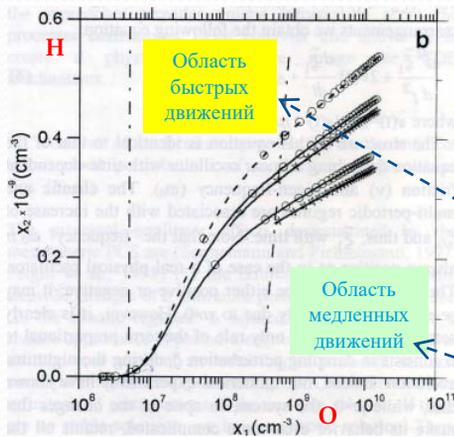
Konovalov and Feigin, NPG 2000



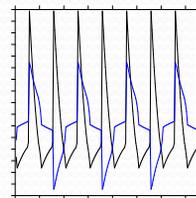
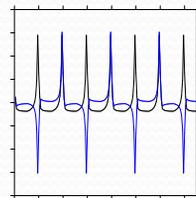
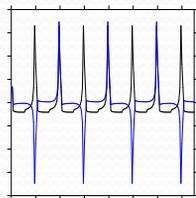
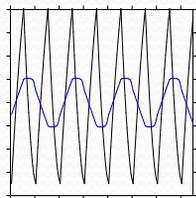
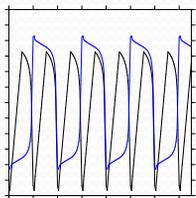
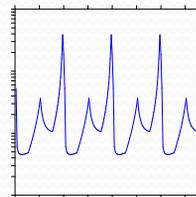
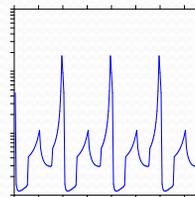
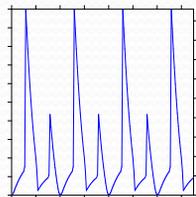
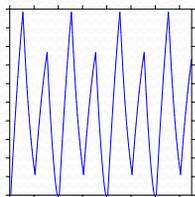
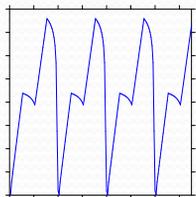
Нелинейно-динамический механизм

Konovalov and Feigin, NPG 2000

Отклик порождается нетривиальной структурой фазового пространства системы в ночное время, когда в нем одновременно присутствуют две разные области с низкой и высокой скоростью изменения переменных. Если на закате система оказывается в области фазового пространства с низкой скоростью движений, то этой ночью она эволюционирует в режиме «высокого Н», и наоборот.



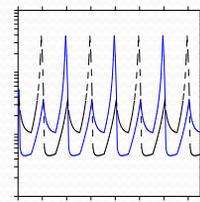
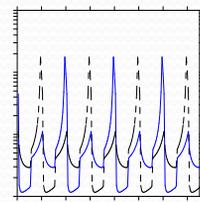
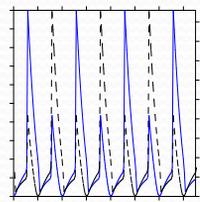
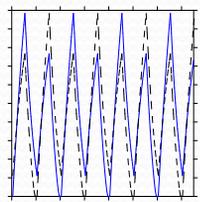
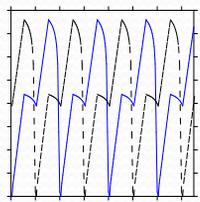
«Чистые» осцилляции с периодом 2 суток (очищенные от суточных осцилляций) наиболее заметны в эволюции всех компонент МФХС (но особенно выражены в Н, O₃, OH и HO₂) с характерными амплитудами существенно большими, чем амплитуды возмущения этих МП за счет воздействия квазидвухсуточной атмосферной волны.



$$\varphi_{ph} = \varphi_0 / 2 + \delta\varphi + const$$

$$\delta\varphi = 0 \text{ или } \pi$$

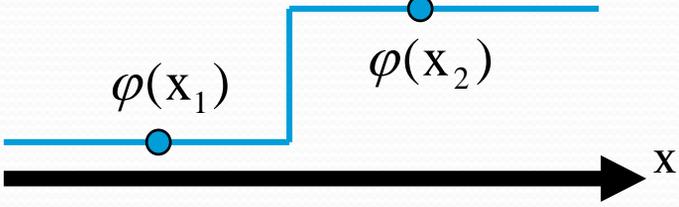
← Фаза внешнего воздействия с периодом 1 сутки



Горизонтальное распределение фазы

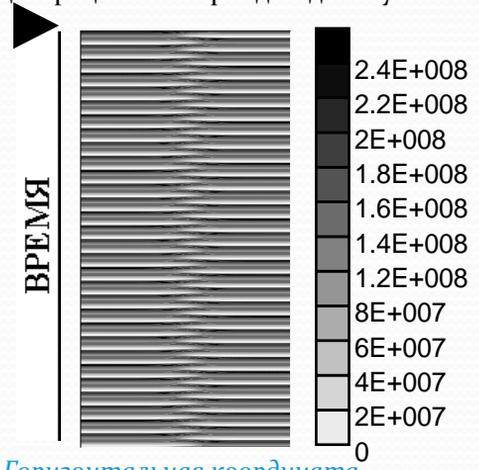
химических осцилляций

$$\varphi(x)$$



$$\Delta\varphi = \varphi(x_2) - \varphi(x_1) = \pi$$

Пространственно-временная эволюция концентрации N с периодом двое суток



Горизонтальная координата



Фаза внешнего воздействия

Зональное распределение фазы
двухсуточных осцилляций

$$\varphi_0(x) = 2\pi x/L, x \in [0, L] \quad \varphi_{ph}(x) = \pi x/L + \delta\varphi(x)$$

L - длина зональной окружности

Зональная
координата

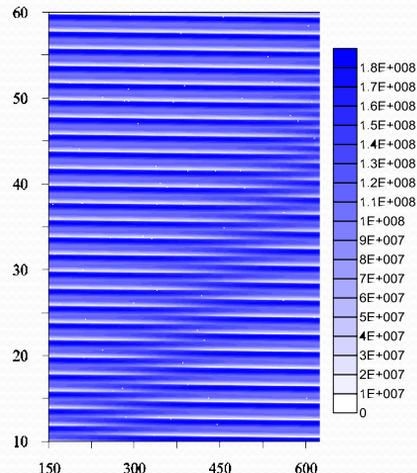
Наличие резких перепадов в распределении концентраций МП делает необходимым учет горизонтальной турбулентной диффузии, которая приводит к «сглаживанию» концентрационных перепадов. Баланс фотохимических и диффузионных процессов показывает, что соответствующий масштаб горизонтальной неоднородности фазы осцилляций и концентраций МП при типичных (для высот 80-90 км) величинах коэффициента горизонтальной диффузии $D_{xx} \sim (10^5 - 3 \cdot 10^6) \text{ м}^2/\text{с}$ должен составлять $L_x \sim (100 - 500) \text{ км}$.

Включение горизонтальной турбулентной диффузии приводит к возникновению реакционно-диффузионных волн (РДВ) в виде распространяющихся с постоянной скоростью фазовых фронтов 2-суточных осцилляций.

Свойства РДВ:

1. Вызваны зональной неоднородностью фазы суточных вариаций освещенности
2. Направление распространения – на восток (против вращения Солнца)
3. Скорость распространения $V \propto \frac{D_{xx}}{L}$

Механизм возникновения мезосферных РДВ должен быть принципиально иным, чем в классических системах (например, с мультстабильностью), где скорость распространения РДВ обычно пропорциональна \sqrt{D}



Решаемые задачи:

- 1. Аналитическое исследование механизма генерации двухсуточных фотохимических осцилляций в области мезопаузы.
- 2. Аналитическое исследование механизма генерации реакционно-диффузионных волн, инициируемых этими осцилляциями.
- 3. Отыскание основных индикаторов двухсуточных фотохимических осцилляций, необходимых для последующей регистрации этого феномена в данных ракетного и спутникового зондирования.
- 4. Экспериментальная регистрация двухсуточных фотохимических осцилляций в области мезопаузы

Исходная модель:

5 переменных O, H, OH, HO₂ и O₃, k_i – константы реакций, M – концентрация воздуха

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= k_4 \cdot O \cdot OH + k_7 \cdot H_2O - H \cdot ((k_2 + k_{14} + k_{18}) \cdot HO_2 + k_6 \cdot M \cdot O_2 + k_{12} \cdot O_3 + k_{17} \cdot M \cdot OH) \\ \frac{dO}{dt} &= k_{15} \cdot OH^2 + k_{18} \cdot H \cdot HO_2 + k_{16} \cdot O_3 + 2k_8 \cdot O_2 - O \cdot ((k_1 \cdot M + k_4) \cdot OH + k_5 \cdot HO_2 + k_9 \cdot M \cdot O_2 + k_{10} \cdot O_3 + 2k_{11} \cdot O \cdot M) \\ \frac{dO_3}{dt} &= k_9 \cdot M \cdot O_2 \cdot O - O_3 \cdot (k_{10} \cdot O + k_{12} \cdot H + k_{13} \cdot OH + k_{16}) \\ \frac{dOH}{dt} &= k_5 \cdot O \cdot HO_2 + k_{12} \cdot O_3 \cdot H + 2k_{14} \cdot H \cdot HO_2 + k_7 \cdot H_2O - OH \cdot ((k_1 \cdot M + k_4) \cdot O + k_3 \cdot HO_2 + k_{13} \cdot O_3 + k_{17} \cdot M \cdot H + 2k_{15} \cdot OH) \\ \frac{dHO_2}{dt} &= k_1 \cdot M \cdot O \cdot OH + k_6 \cdot H \cdot M \cdot O_2 + k_{13} \cdot O_3 \cdot OH - HO_2 \cdot ((k_2 + k_{14} + k_{18}) \cdot H + k_3 \cdot OH + k_5 \cdot O) \end{aligned}$$

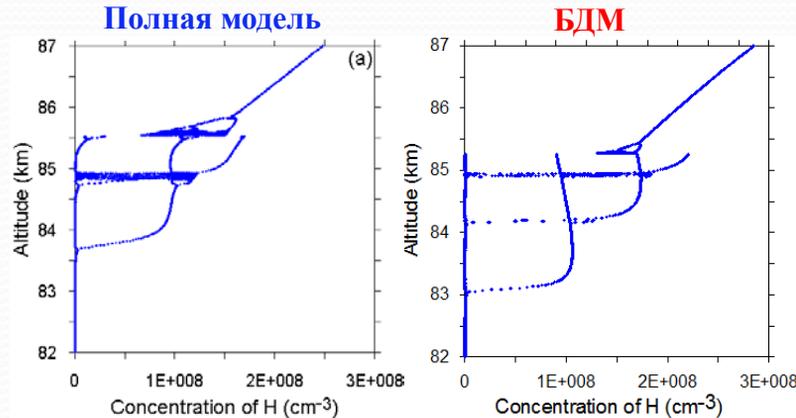
Базовая динамическая модель (БДМ) мезосферной фотохимии (*Feigin et al., JGR, 1998*)

$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha \cdot H - (1 - s(t)) \mu \cdot O + \delta \cdot s(t) \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \gamma \cdot s(t) \end{cases} \quad \alpha, \mu, \delta, \beta, \sigma, \gamma - \text{параметры, комбинации констант реакций}$$

Внешнее периодическое воздействие
(меандр)

$$s(t) = \begin{cases} 1, & t \in [\tau n; \tau n + \tau / 2] \\ 0, & t \in [\tau n + \tau / 2; \tau(n+1)] \end{cases}, n = 1, 2, \dots$$

$$O_3 = \begin{cases} \frac{k_9 \cdot O}{k_{16}} - \text{днем} \\ \text{constнучью} \end{cases} \quad OH = \frac{k_6 \cdot H}{k_4 \cdot O} \quad HO_2 = \frac{k_6 \cdot H}{k_5 \cdot O}$$



Общая концепция построения БДМ

-математически корректно упрощенных моделей

(Feigin and Konovalov, J. Geophys. Res., 1996)

Разделение переменных ФХС

Фотохимическое
время жизни

Временной масштаб изучаемого явления

$$\tau \gg \tau_0 : n_i^{\text{param}} = \text{const}$$

параметры

$$\tau \ll \tau_0 : \frac{d}{dt}(n_i^{\text{fast}}) = I_i^{\text{fast}} - S_i^{\text{fast}} = 0$$

быстрые

они находятся в
состоянии мгновенного
устойчивого равновесия

$$\tau \approx \tau_0 : \frac{d}{dt}(n_i^{\text{slow}}) = I_i^{\text{slow}} - S_i^{\text{slow}}$$

медленные

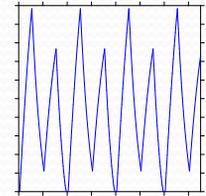
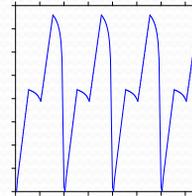
Дифф. уравн.
БДМ

I и S – являются функциями от $n_i^{\text{fast}}, n_i^{\text{slow}}, n_i^{\text{param}}, t$

Выделение медленных семейств быстрых переменных

**Сложности применения данной системы в исходном виде
для аналитического исследования механизма генерации двухсуточных осцилляций:**

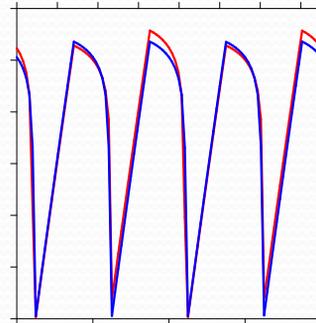
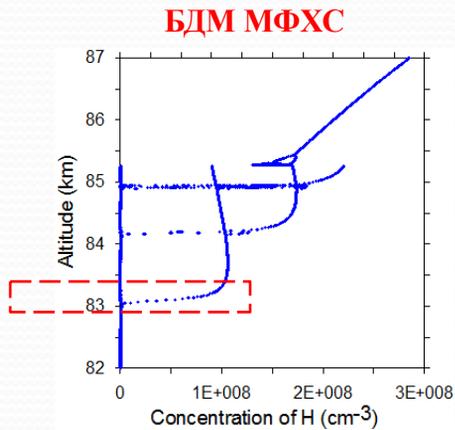
$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha \cdot H - (1 - s(t)) \mu \cdot O + \delta \cdot s(t) \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \gamma \cdot s(t) \end{cases}$$



1. Внешнее периодическое воздействие является сильным, так что за одни сутки величины переменных МФХС могут варьироваться в диапазоне нескольких порядков. Другими словами, временная эволюция этих переменных существенно промодулирована периодом 1 сутки
2. Внешнее периодическое воздействие существенно негармоническое (меандр), что приводит к генерации широкого спектра высших гармоник с периодами 1/2, 1/4 и т.д. суток, чьи амплитуды сравнительно медленно спадают в зависимости от их номера.
3. Дробно - степенная нелинейность во втором уравнении системы существенно затрудняет проведение гармонического разложения

Стратегия анализа:

1. Проведен численный анализ отдельных членов уравнений данной системы с целью выделения наиболее важных, которые определяют нелинейный отклик на внешнее периодическое воздействие. Такое упрощение приводит как к количественным, так и к качественным изменениям: меняются границы области нелинейного отклика, типы бифуркаций и их последовательность. Однако, для последующего анализа нам было важно, что «урезанная» система по-прежнему демонстрирует осцилляции с периодом двое суток.
2. На втором этапе мы провели разложение полученной системы уравнений вблизи порога удвоения периода. Возбуждение двухсуточного режима вблизи порога происходит "мягко", решение слабо отличается от односуточных осцилляций. Это означает, что в окрестности этого порога решение можно представить в виде суммы основного решения с периодом 1 сутки и малой добавки, отвечающей новому периоду, уравнения для которой можно найти путем линеаризации упрощенной системы уравнений.



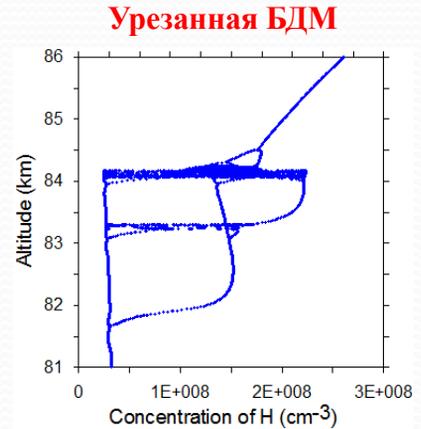
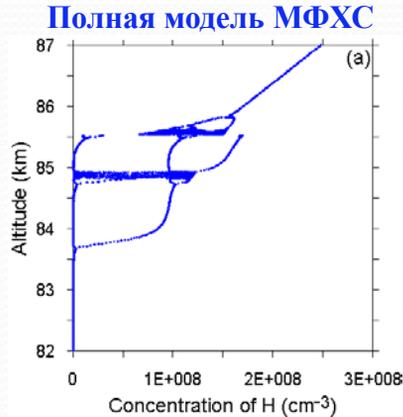
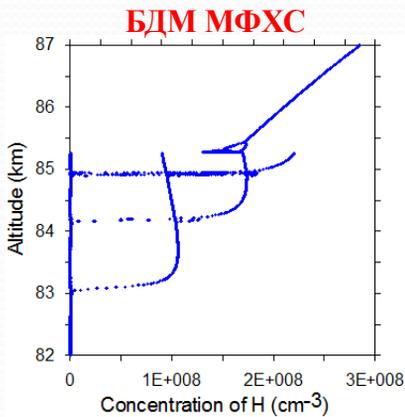
1. Аналитическое исследование механизмов генерации двухсуточных фотохимических осцилляций в области мезопазузы

система двух нелинейных уравнений первого порядка по времени с синусоидальным внешним воздействием, содержащей минимально необходимое количество членов для возникновения двухсуточных осцилляций

$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha \cdot H - (1 - s(t)) \mu \cdot O + \delta \cdot s(t) \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \gamma \cdot s(t) \end{cases}$$



$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha \cdot H + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} \sin \omega_0 t \\ \frac{dH}{dt} = -\sigma \frac{H^2}{O} + \frac{\gamma}{2} \end{cases}$$



1 этап. Упрощение базовой динамической модели

1.1. Заменяем функцию $s(t)$ на сумму двух гармоник, отвечающих нулевой и основной частоте внешнего воздействия, чтобы в спектре осцилляций переменных МФХС существенно сократить амплитуды высших гармоник внешнего периодического воздействия (с периодами 1/2, 1/4 и т.д. суток).

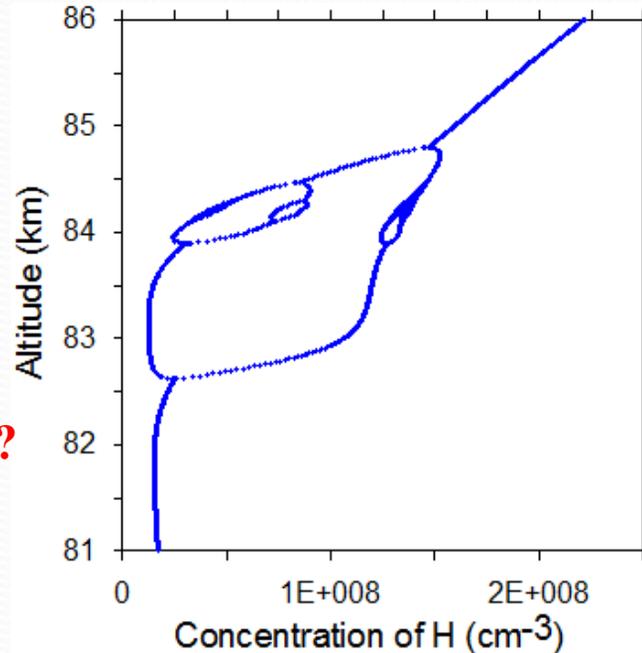
$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha H - \frac{\mu}{2} \left(1 - \sin \frac{2\pi t}{T} \right) O + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \end{cases}$$

$T=1$ сутки

Какие слагаемые можно отбросить?

Нельзя исключать:

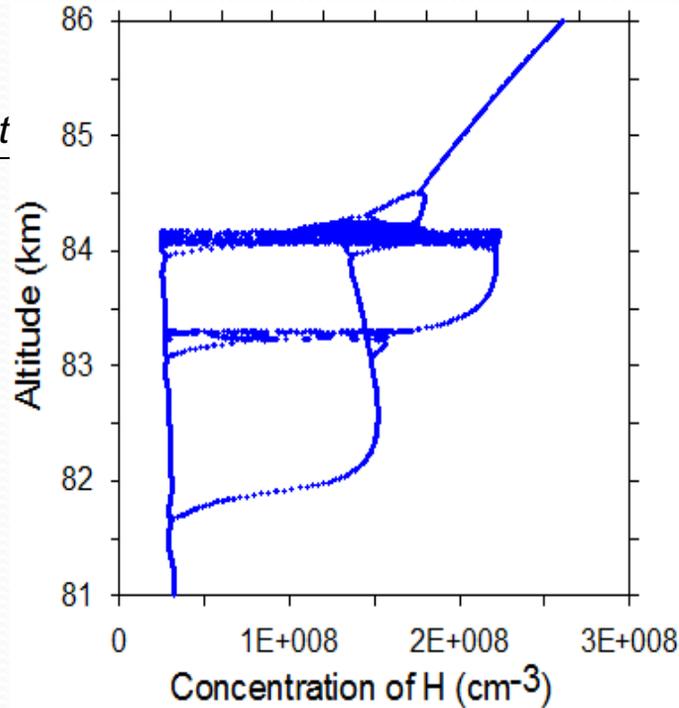
1. постоянные члены в правых частях: они обеспечивают неотрицательность переменных
2. $-\alpha H$ в первом уравнении



1 этап. Упрощение базовой динамической модели

1.2. Отбросим слагаемое, отвечающее за линейную периодическую диссипацию переменной x_1 (концентрация атомарного кислорода)

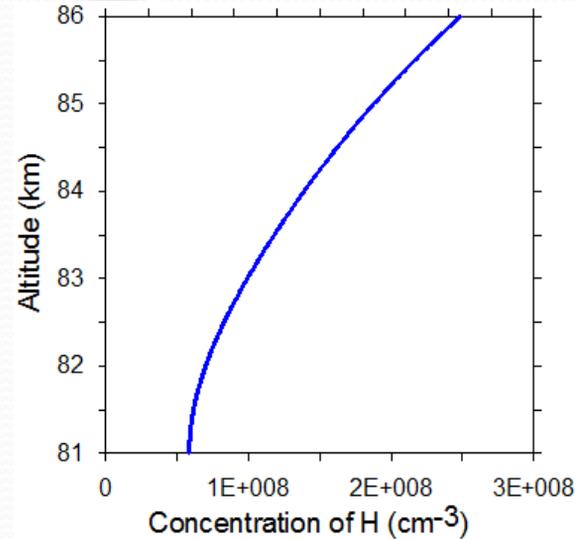
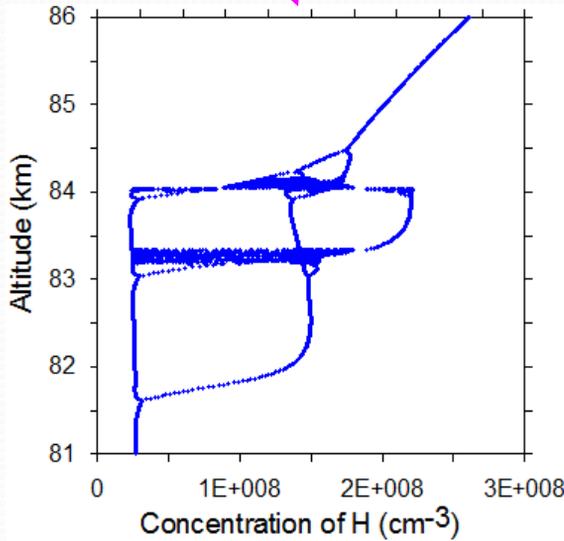
$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha H - \frac{\mu}{2} \left(1 - \sin \frac{2\pi t}{T} \right) O + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \end{cases}$$



1 этап. Упрощение базовой динамической модели

1.3. Исследуем важность одновременного учета внешнего периодического воздействия в обеих частях системы

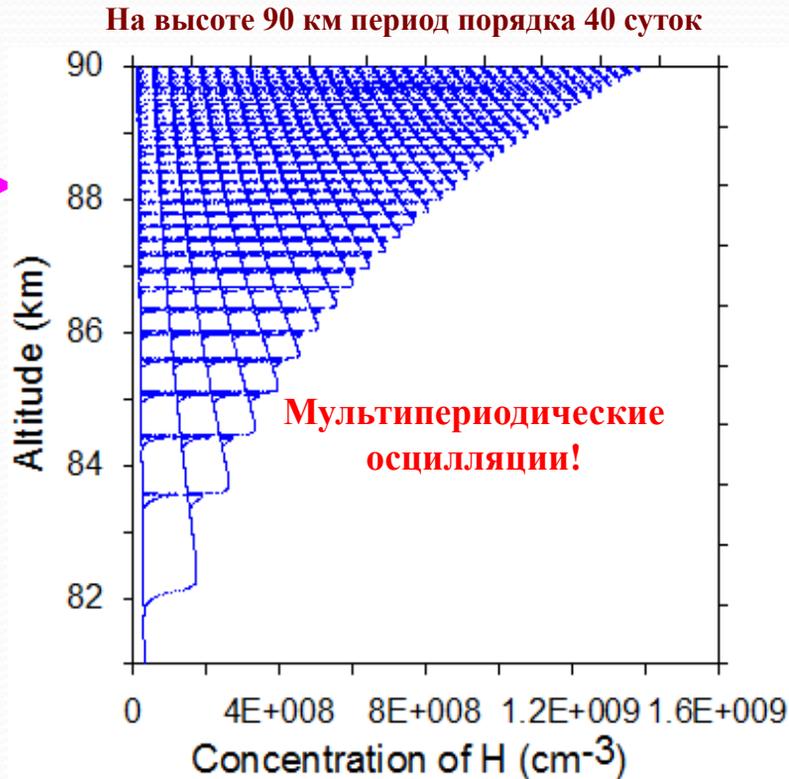
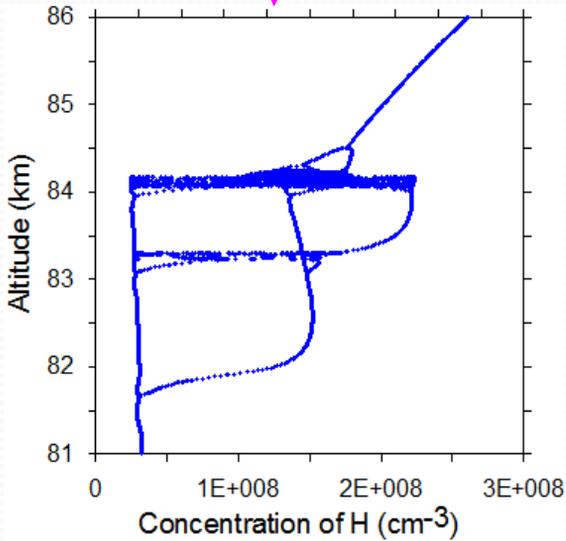
$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha H + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta \sin \frac{2\pi t}{T}}{2} \\ \frac{dH}{dt} = -\beta \frac{H^2}{O^2} - \sigma \frac{H^2}{O} + \frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma \sin \frac{2\pi t}{T}}{2} \end{cases}$$



1 этап. Упрощение базовой динамической модели

1.4. Исследуем важность одновременного учета обоих типов нелинейности в уравнении для переменной x_2

$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha H \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \\ \frac{dH}{dt} = -\sigma \frac{H^2}{O} - \beta \frac{H^2}{O^2} + \frac{\gamma}{2} \end{cases}$$



1 этап. Упрощение базовой динамической модели

1.5. Перейдем к безразмерным переменным в полученной системе

$$\begin{cases} \frac{dO}{dt} = -\alpha H \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \\ \frac{dH}{dt} = -\sigma \frac{H^2}{O} + \frac{\gamma}{2} \end{cases}$$



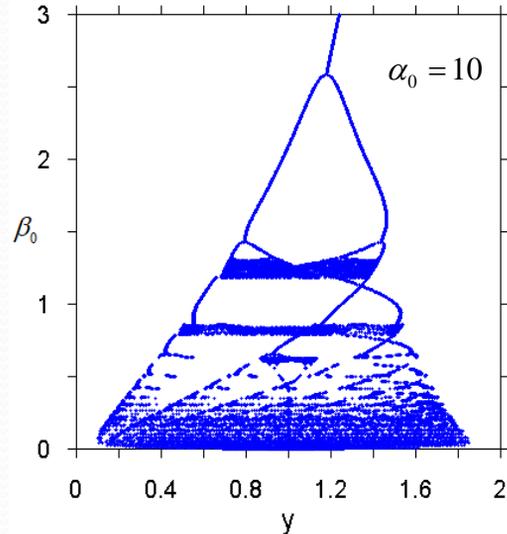
$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha_0 \left(1 + \sin(2\pi\tau) - y \right) \\ \frac{dy}{d\tau} = \beta_0 \left(1 - \frac{y^2}{x} \right) \end{cases}$$



Замена переменных

$$x = \frac{2 \cdot \alpha}{\delta} O, \quad y = \frac{2\gamma \cdot \alpha^2}{\sigma \cdot \delta^2} H, \quad \tau = \frac{\omega_0 t}{2\pi},$$

$$\alpha_0 = \frac{2\pi \cdot \gamma \cdot \alpha^2}{\sigma \cdot \delta \cdot \omega_0}, \quad \beta_0 = \frac{2\pi \cdot \gamma \cdot \alpha}{\delta \cdot \omega_0}$$



2 этап. Разложение вблизи порога удвоения периода

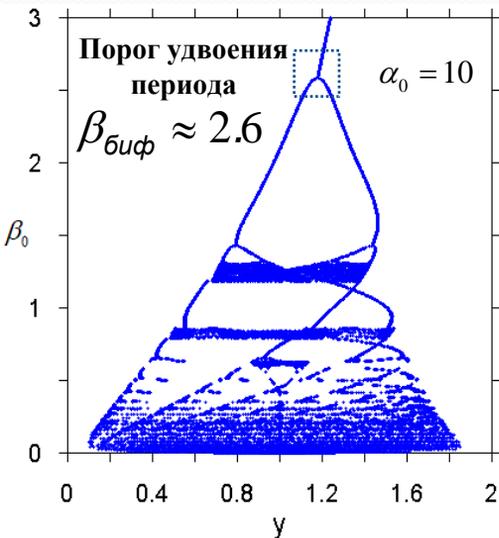
$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha_0 (1 + \sin(2\pi\tau) - y) \\ \frac{dy}{d\tau} = \beta_0 \left(1 - \frac{y^2}{x} \right) \end{cases}$$

1. Представим решение в виде:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 & |x_1|, |y_1| &\gg |x_2|, |y_2| \\ y &= y_1 + y_2 \end{aligned}$$

(x_1, y_1) – решение системы до бифуркации
 $\beta > \beta_{\text{биф}}$

(x, y) – решение системы после бифуркации
 $\beta < \beta_{\text{биф}}$



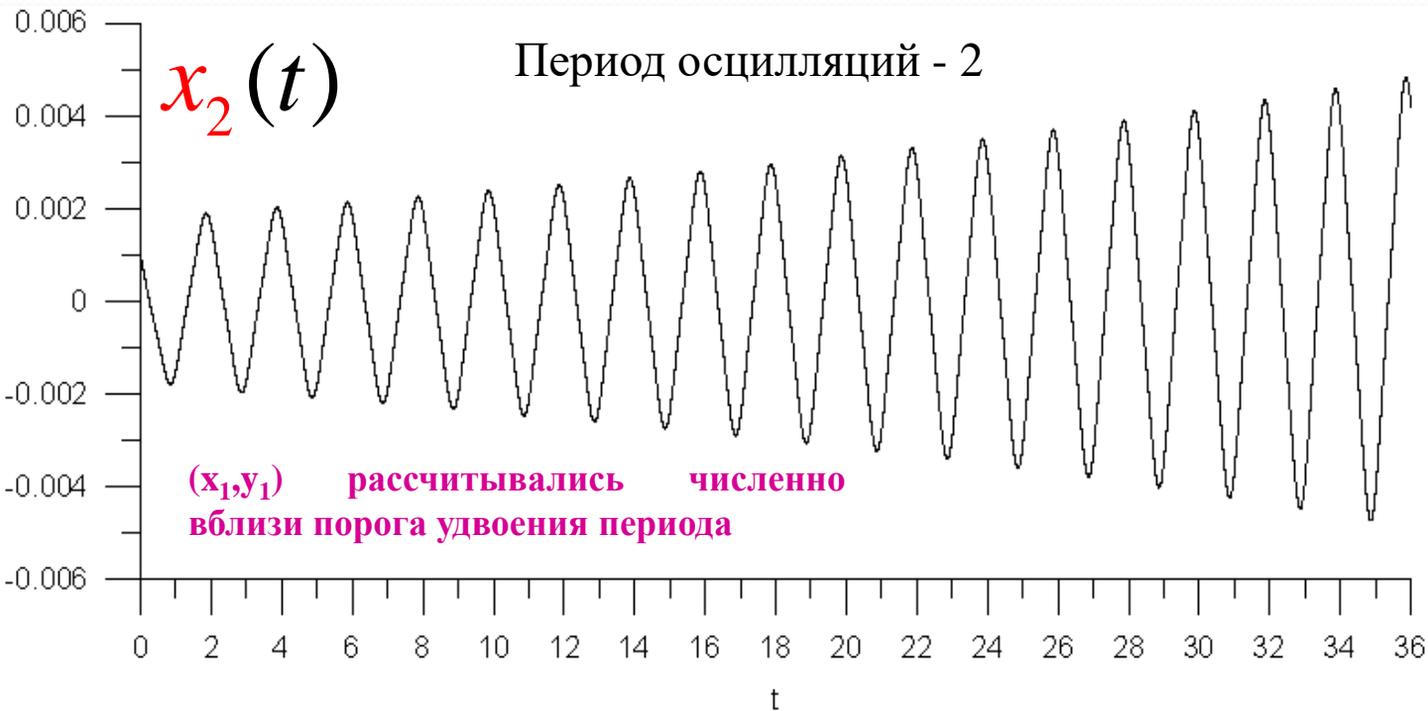
2. Разложим систему в ряд до первого порядка по малым параметрам $x_2 / x_1, y_2 / y_1$

$$\frac{dx_1}{d\tau} + \frac{dx_2}{d\tau} = \alpha_0 (1 + \sin(2\pi\tau) - y_1 - y_2)$$

$$\frac{dy_1}{d\tau} + \frac{dy_2}{d\tau} = \beta_0 \left(1 - \frac{y_1^2}{x_1} + \frac{y_1^2}{x_1^2} x_2 - 2 \frac{y_1}{x_1} y_2 \right)$$

2 этап. Разложение вблизи порога удвоения периода

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{d\tau} = -\alpha_0 y_2 \\ \frac{dy_2}{d\tau} = \beta_0 \left(\frac{y_1^2}{x_1^2} x_2 - 2 \frac{y_1}{x_1} y_2 \right) \end{cases}$$



2 этап. Разложение вблизи порога удвоения периода

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{d\tau} = -\alpha_0 y_2 \\ \frac{dy_2}{d\tau} = \beta_0 \left(\frac{y_1^2}{x_1^2} x_2 - 2 \frac{y_1}{x_1} y_2 \right) \end{cases}$$

(x_1, y_1) – решение системы до бифуркации, периодически с периодом внешнего воздействия

$$\frac{y_1^2}{x_1^2} = \left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_0 + \left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_1 \sin(2\pi\tau + \varphi) + \sum \dots$$

$$\frac{y_1}{x_1} = \left(\frac{y_1}{x_1} \right)_0 + \left(\frac{y_1}{x_1} \right)_1 \sin(2\pi\tau + \varphi) + \sum \dots$$

$\left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_0$, $\left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_1$, $\left(\frac{y_1}{x_1} \right)_0$, $\left(\frac{y_1}{x_1} \right)_1$ – константы, определяемые численным образом

Уравнение линейного осциллятора с параметрическим воздействием и периодической диссипацией

**Квадрат
собственной
периодическая диссипация
частоты**

$$\frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + 2\beta_0 \left(\left(\frac{y_1}{x_1} \right)_0 + \left(\frac{y_1}{x_1} \right)_1 \sin(2\pi\tau + \varphi) \right) \frac{dx_2}{d\tau} + \alpha_0 \beta_0 \left(\left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_0 + \left(\frac{y_1^2}{x_1^2} \right)_1 \sin(2\pi\tau + \varphi) \right) x_2 = 0$$

2 этап. Разложение вблизи порога удвоения периода

Частный случай уравнения Матье

$$\frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + a \cdot \sin(\omega\tau + \varphi) x_2 = 0 \quad a \propto \left(\frac{O^2}{H^2} \right)_1$$

Амплитуда гармонических осцилляций функции O^2/H^2 с частотой внешнего воздействия ω

Двухсуточные осцилляции есть результат неустойчивости вынужденных фотохимических осцилляций с периодом 1 сутки!

Его решение

$$x_2 = A \exp\left(i \frac{\omega}{2} \tau + \tau \sqrt{\frac{a}{2} - \frac{\omega^2}{4} + i \frac{\varphi}{2}}\right) + B \exp\left(i \frac{\omega}{2} \tau - \tau \sqrt{\frac{a}{2} - \frac{\omega^2}{4} + i \frac{\varphi}{2}}\right) + k.c.$$

Условие для возникновения инкремента колебаний на половинной частоте

$$a > \frac{\omega^2}{2}$$

Фаза осцилляций с удвоенным периодом линейно связана с фазой внешнего воздействия

$$\bar{\varphi} = \varphi / 2 + const$$

$$\varphi \rightarrow \varphi + 2\pi \quad \bar{\varphi}_{1,2} = \varphi / 2 + 0, \pi$$

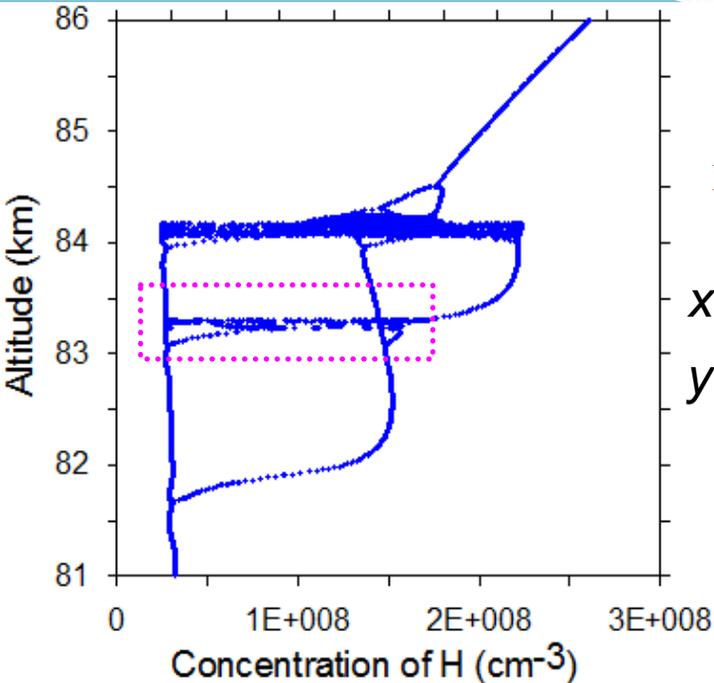
Исследование механизма генерации осцилляций

с периодом 4 суток:

Проводим линейризацию вблизи порога возникновения осцилляций

$x = x_1 + x_2 + x_4$ $(x_1 + x_2, y_1 + y_2)$ – решение системы до бифуркации (содержит гармоники с периодами 1 и 2 суток)

$y = y_1 + y_2 + y_4$



$$\frac{d^2 x_4}{d\tau^2} + \tilde{a} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2}\tau + \frac{\varphi_0}{2} + const\right) x_4 = 0$$

Основные условия для возникновения нелинейного отклика на внешнее периодическое воздействие в фотохимии других областей атмосферы

1. Для возникновения неустойчивости внешнее воздействие должно быть сильным, при этом оптимальный период воздействия должен быть порядка времени эволюции системы.

2. Наличие каталитического цикла разрушения некой химической компоненты x , приводящего к возникновению в уравнении баланса для этой компоненты линейного слагаемого, независящего от концентрации x , не является необходимым условием.

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha_0 (1 + \sin(2\pi\tau) - y) \\ \frac{dy}{d\tau} = \beta_0 \left(1 - \frac{y^2}{x}\right) \end{cases}$$

3 этап. Построение системы двух максимально простых дифференциальных уравнений со степенной нелинейностью, стабилизирующей экспоненциальный рост решения уравнения Матье

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha_0 (1 + \sin(2\pi\tau) - y) \\ \frac{dy}{d\tau} = \beta_0 \left(1 - \frac{y^2}{x}\right) \end{cases}$$

Разложим нелинейность в ряд до второго и третьего порядков малости

$$\frac{y^2}{x} = \frac{(y_1 + y_2)^2 (x_1 - x_2)(x_1^2 + x_2^2)}{x_1^4 - x_2^4} : \quad y_2^2 \quad x_2^2 \quad -x_2 y_2 \quad -x_2^3 \quad -x_2^2 y_2$$

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{d\tau} = -y_2 \\ \frac{dy_2}{d\tau} = a \cdot (\sin(\omega\tau + \varphi) + b) \cdot x_2 - x_2^2 y_2 \end{cases}$$

$$a = \gamma^2 \cdot \alpha^3 / (\sigma \cdot \delta^2 \cdot \omega_0^2) \cdot (y_1^2 / x_1^2)_1 > 0$$

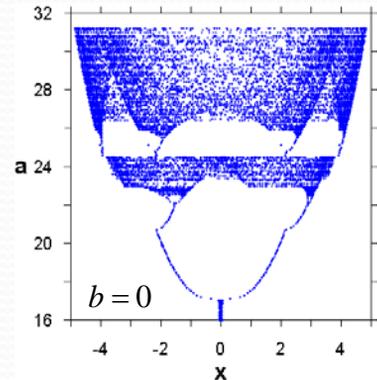
$$b = \gamma^2 \cdot \alpha^3 / (\sigma \cdot \delta^2 \cdot \omega_0^2) \cdot (y_1^2 / x_1^2)_0 > 0$$

1. Представим решение в виде:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 \\ y &= y_1 + y_2 \end{aligned} \quad |x_1|, |y_1| \gg |x_2|, |y_2|$$

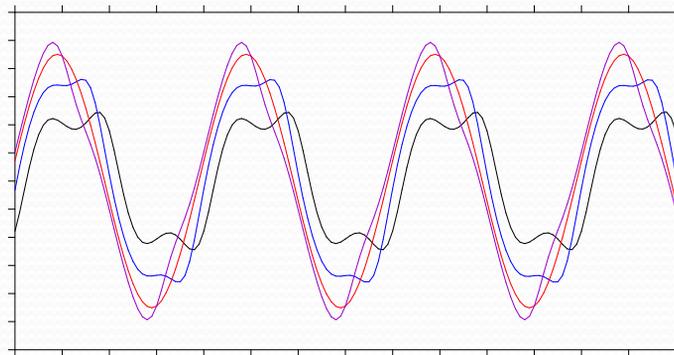
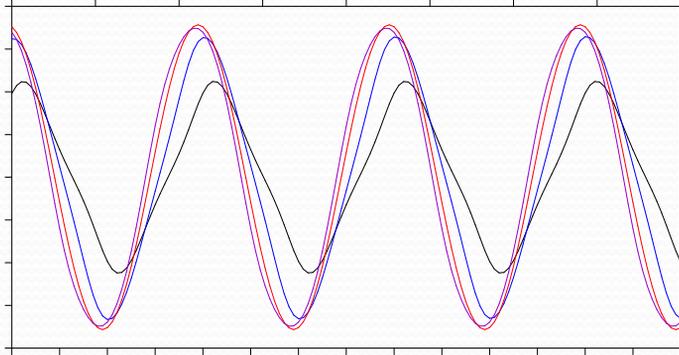
(x_1, y_1) – решение системы до бифуркации
 $\beta > \beta_{\text{биф}}$

(x, y) – решение системы после бифуркации
 $\beta < \beta_{\text{биф}}$

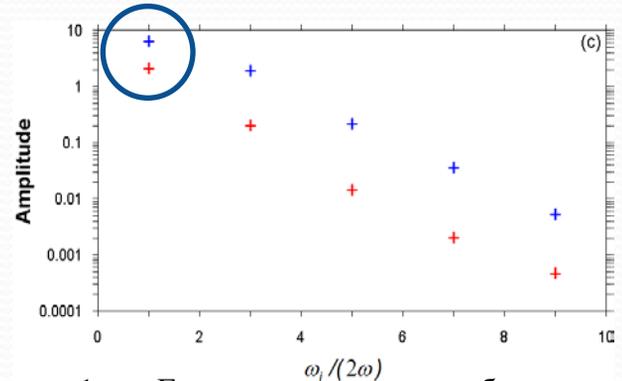


3 этап. Построение системы двух максимально простых дифференциальных уравнений со степенной нелинейностью, стабилизирующей экспоненциальный рост решения уравнения Матье

Временная эволюция переменных системы при разных значениях параметра b при $\omega = 2\pi, a = 20$



Спектры гармонических колебаний



1. Гармонические колебания с половинной частотой обладают наибольшей амплитудой, тогда как амплитуды кратных ей гармоник быстро спадают с их номером, поэтому при последующем анализе их влиянием в первом порядке малости можно пренебрегать.
2. Полное отсутствие частоты внешнего периодического воздействия и ее гармоник.

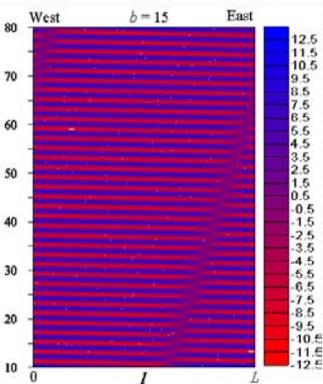
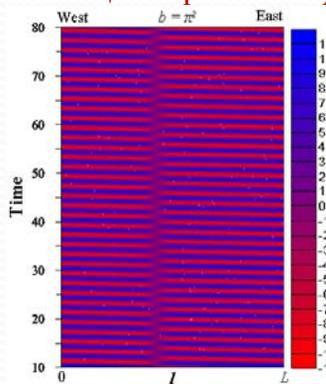
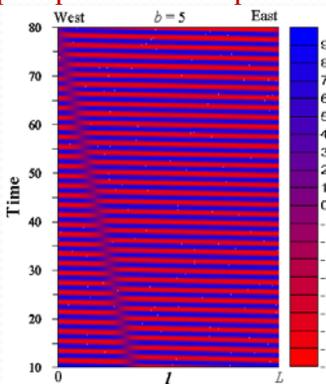
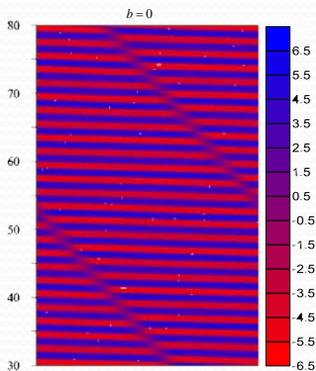
2. Аналитическое исследование механизма генерации реакционно-диффузионных волн

Учтем горизонтальную диффузию и рассмотрим замкнутую цепочку нелинейных осцилляторов с линейной пространственной неоднородностью фазы внешнего воздействия:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{d\tau} = -y_2 + D \frac{\partial^2 x_2}{\partial l^2} \\ \frac{dy_2}{d\tau} = a \cdot \left(\sin \left(\omega\tau + \frac{2\pi}{L} l \right) + b \right) \cdot x_2 - x_2^2 y_2 + D \frac{\partial^2 y_2}{\partial l^2} \end{cases}$$

l – горизонтальная координата, D – коэффициент диффузии, L – длина окружности, которую образуют пространственно разнесенные осцилляторы

Пространственно-временная эволюция переменной y_2



Амплитудно-фазовое разложение решения системы

$$\begin{cases} x_2 = A_x(l, \tau) e^{i(\frac{\omega}{2}\tau + \frac{\pi}{L}l)} + c. . \\ y_2 = A_y(l, \tau) e^{i(\frac{\omega}{2}\tau + \frac{\pi}{L}l)} + c. . \end{cases}$$

уравнения для комплексных амплитуд

$$\begin{cases} \frac{\partial A_x}{\partial \tau} + i \frac{\omega}{2} \cdot A_x = -A_y + D \frac{\partial^2 A_x}{\partial l^2} + iD \frac{\pi}{L} \frac{\partial A_x}{\partial l} - D \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot A_x \\ \frac{\partial A_y}{\partial \tau} + i \frac{\omega}{2} \cdot A_y = \frac{a}{2} \cdot A_x^* + b \cdot A_x - 2 \cdot |A_x|^2 \cdot A_y - A_x^2 \cdot A_y^* + D \frac{\partial^2 A_y}{\partial l^2} + iD \frac{\pi}{L} \frac{\partial A_y}{\partial l} - D \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot A_y \end{cases}$$

перенос «ветрового» типа



Связи при D=0:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} A_x = -2/\omega \cdot \operatorname{Im} A_y \\ \operatorname{Im} A_x = 2/\omega \cdot \operatorname{Re} A_y \\ \operatorname{Re} A_y / \operatorname{Im} A_y = -\sqrt{\lambda_1/\lambda_2} \\ \operatorname{Re} A_x / \operatorname{Im} A_x = \sqrt{\lambda_2/\lambda_1} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{a}{\omega} + \frac{2b}{\omega} - \frac{\omega}{2} \\ \lambda_2 &= \frac{a}{\omega} + \frac{\omega}{2} - \frac{2b}{\omega} \end{aligned}$$



замена переменных:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} A_x = \sqrt{\lambda_2/\lambda_1} \cdot 2/\omega \cdot (Z + \delta A_x) \\ \operatorname{Im} A_x = 2/\omega \cdot (Z - \delta A_x) \\ \operatorname{Re} A_y = Z + \delta A_y \\ \operatorname{Im} A_y = -\sqrt{\lambda_2/\lambda_1} \cdot (Z - \delta A_y) \end{cases}$$

$$|Z| \gg |\delta A_x|, |\delta A_y| \quad \left| \frac{\partial Z}{\partial t} \right| \gg \left| \frac{\partial \delta A_x}{\partial t} \right|, \left| \frac{\partial \delta A_y}{\partial t} \right|$$

Исходная система сведена к одному уравнению, описывающему распространение фронта:

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = \frac{\sqrt{a^2 - (2b - \omega^2/2)^2}}{2\omega} \cdot Z - \frac{2a}{\omega^2(a + 2b - \omega^2/2)} Z^3 + D \frac{\partial^2 Z}{\partial l^2} + D \frac{\pi}{2L} \frac{\omega^2 - 4b}{\sqrt{a^2 - (2b - \omega^2/2)^2}} \frac{\partial Z}{\partial l}$$

Скоростью фронта: $V = D \frac{\pi}{2L} \frac{4b - \omega^2}{\sqrt{a^2 - (2b - \omega^2/2)^2}}$

пропорциональна коэффициенту диффузии и градиенту фазы внешнего воздействия

Направление распространения фронта определяется фазовыми соотношениями:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} A_x / \operatorname{Im} A_x = \operatorname{tg}(\varphi_x - \frac{\varphi}{2}) = \sqrt{\lambda_2/\lambda_1} \\ \operatorname{Re} A_y / \operatorname{Im} A_y = \operatorname{tg}(\varphi_y - \frac{\varphi}{2}) = -\sqrt{\lambda_1/\lambda_2} \end{cases}$$

Руководствуясь логикой и последовательностью проведенного анализа, найдена формула для знака скорости фазового фронта в исходной системе МФХС с учетом горизонтальной турбулентной диффузии

$$V \sim \operatorname{ctg}(2 \cdot \varphi_O - \varphi_1) + \operatorname{ctg}(2 \cdot \varphi_H - \varphi_1) > 0$$

φ_H, φ_O - фазы гармонических колебаний H и O с периодом 2 суток

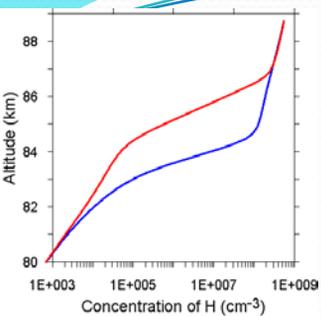
φ_1 - фаза осциллирующей функции H^2/O^2 с частотой внешнего воздействия

Направление распространения РДВ определяется не только градиентом фазы внешнего воздействия, но и специфическими фазовыми соотношениями и зависит от внутренних параметров мезосферной фотохимии!

3. Определение основных индикаторов двухсуточных фотохимических осцилляций, необходимых для их экспериментальной регистрации

Сложности регистрации данного феномена: узкая локализация по высоте, труднодоступность измерений малых примесей в области мезопазузы.

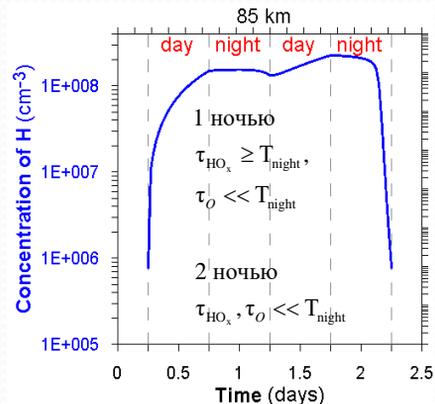
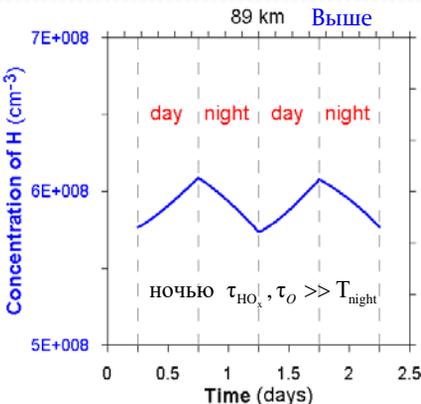
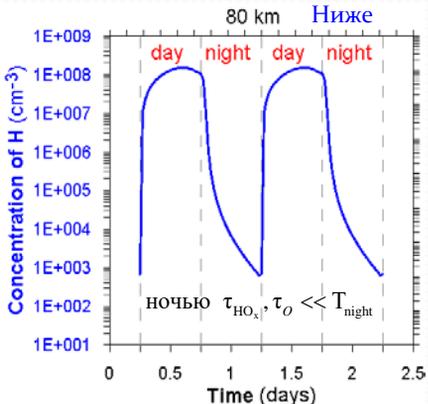
Лучший метод - измерения посредством ракет, пока - по данным спутникового зондирования



Наиболее выраженной особенностью этих осцилляций является значительная (на несколько порядков величины) разница между двумя возможными значениями концентрации Н в конце ночи, т.е. этот феномен следует искать в ночное время по профилям Н вблизи начала рассвета.

Если на закате система оказывается в области фазового пространства с низкой скоростью движений, то этой ночью она эволюционирует в режиме «высокого Н», и наоборот (Konovalov and Feigin, NPG 2000).

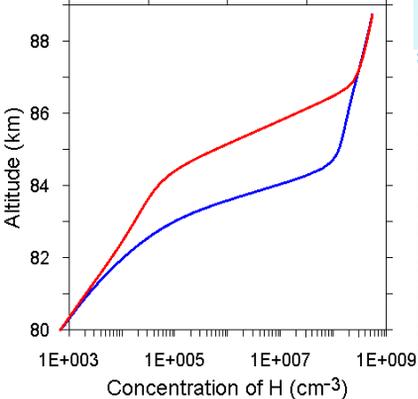
Осцилляции Н на разных высотах:



$$\tau_{HO_x} = \frac{HO_x}{\frac{dHO_x}{dt}} = \frac{HO_x}{\frac{H + OH + HO_2}{2 \cdot HO_2 \cdot ((k_2 + k_{18}) \cdot H + k_3 \cdot OH) + 2 \cdot OH \cdot (k_{15} \cdot OH + k_{17} \cdot H \cdot M)}}$$

$$\tau_O = \frac{O}{\frac{dO}{dt}} = \frac{O}{(k_1 \cdot M + k_4) \cdot OH + k_5 \cdot HO_2 + k_9 \cdot M \cdot O_2 + k_{10} \cdot O_3 + 2k_{11} \cdot O \cdot M}$$

$$\begin{cases} OH^{eq} = \frac{k_5 \cdot O \cdot HO_2^{eq} + k_{12} \cdot O_3 \cdot H + 2k_{14} \cdot H \cdot HO_2^{eq}}{k_4 \cdot O + k_{13} \cdot O_3} \\ HO_2^{eq} = \frac{k_6 \cdot H \cdot M \cdot O_2 + k_{13} \cdot O_3 \cdot OH^{eq}}{k_4 \cdot O + (k_2 + k_{14} + k_{18}) \cdot H} \end{cases}$$

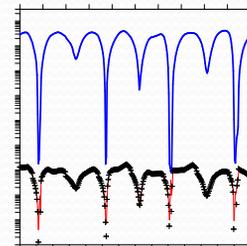
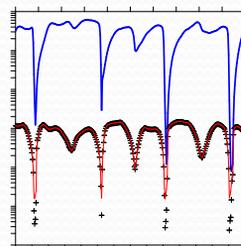
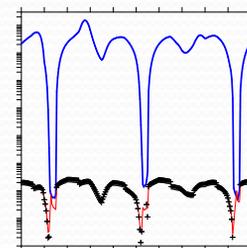
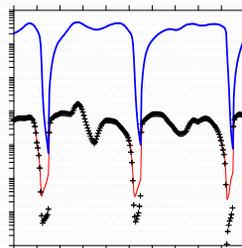


Индикаторы присутствия 2-суточных осцилляций в данных N и O:

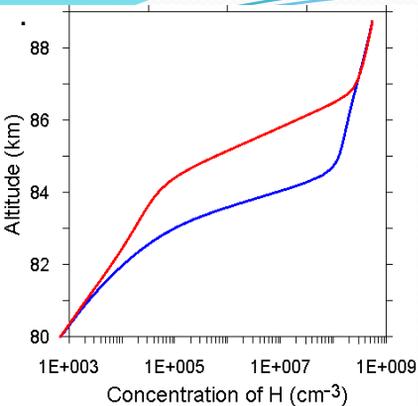
1. 2 профиля N, измеренных в конце ночи примерно в одной и той же географической точке (с горизонтальным отклонением между профилями <100 км), но с интервалом 1 сутки
2. В определенной области высот (> 1 км) у 1 профиля N > $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ (высокий N) у 2 профиля N << $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ (низкий N).
Профили образуют структуру типа «петли гистерезиса»!
3. У профиля с высоким N должны выполняться следующие соотношения:

$$\tau_{\text{HO}_x} \geq 0.8 \cdot T_{\text{night}}, \tau_O < 0.3 \cdot T_{\text{night}}$$

Результаты расчета глобальной трехмерной химико-транспортной модели средней атмосферы, изначально разработанной Leibniz Institute of Atmospheric Physics. Динамическая часть модели (трехмерные поля температуры и ветра) инкорпорированы из Канадской модели средней атмосферы (СМАМ). Основные характеристики модели: 354 высотных уровня (привязанных к давлению) в диапазоне высот 0-135 км, 32 точки по широте и 64 точки по долготе. Химический блок модели включает 19 реагирующих компонент, 49 химических реакций и 14 процессов фотодиссоциации.



4. Экспериментальная регистрация двухсуточных фотохимических осцилляций в области мезопаузы



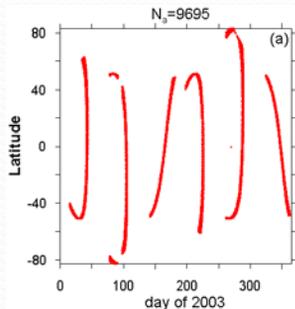
Индикаторы присутствия 2-суточных осцилляций в данных N и O:

1. 2 профиля N, измеренных в конце ночи примерно в одной и той же географической точке (с горизонтальным отклонением между профилями < 100 км), но с интервалом 1 сутки
2. В определенной области высот (> 1 км) у 1 профиля $N > 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ (высокий N) у 2 профиля $N \ll 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ (низкий N).
Профили образуют структуру типа «петли гистерезиса»!
3. У профиля с высоким N должны выполняться следующие соотношения: $\tau_{\text{HO}_x} \geq 0.8 \cdot T_{\text{night}}$, $\tau_{\text{O}} < 0.3 \cdot T_{\text{night}}$

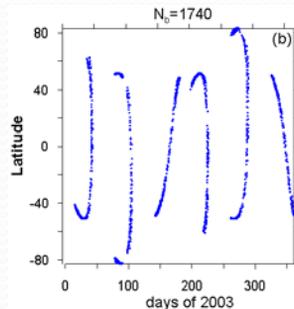
Рассмотрена годовая (за 2003 г) база данных SABER/TIMED:

~320 тысяч ансамблей профилей N, O, O₃, T, VER_2mkm, M и O₂
в широких диапазонах высот (80-105 км), широт (82°S, 82°N) и локального времени.

Широта и день года профилей N в конце ночи



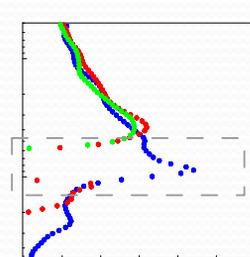
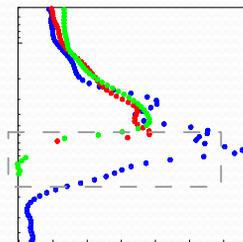
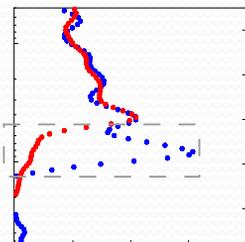
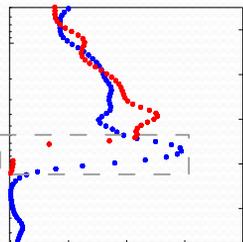
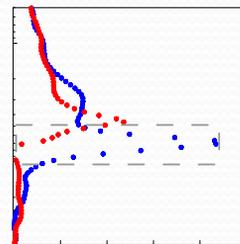
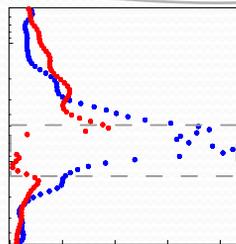
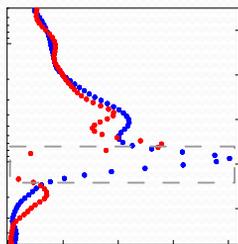
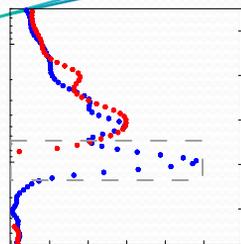
Широта и день года профилей с высоким N



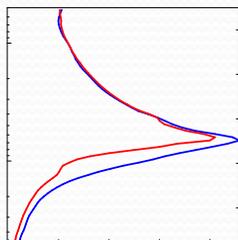
В результате обработки данных SABER/TIMED за 2003 г около 200 пар N профилей, удовлетворяющих указанному индикаторам, локализованных по широте и дням года

Ансамбль	Число пар профилей N	Широта	Дни года
1	24	49-51°S	27-33, 263-276
2	38	50-51°N	79-87, 210-216
3	59	80-82.5°S	79-91
4	86	80-83°N	262-275

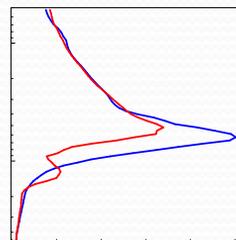
Первое экспериментальное подтверждение нелинейного отклика фотохимии мезопаузы на суточные вариации солнечной освещенности по данным SABER/TIMED



Результаты усреднения по 86 парам профилей



Результаты усреднения по 59 парам профилей



1. Feigin, A. M., and I. B. Konovalov, On the possibility of complicated dynamic behavior of atmospheric photochemical systems: Instability of the Antarctic photochemistry during the ozone hole formation Journal of Geophysical Research, v. 101, p. 26023-26038, 1996.
2. Konovalov I.B., Feigin A.M., Mukhina A.Y., Toward an understanding of the nonlinear nature of atmospheric photochemistry: Multiple equilibrium states in the high-latitude lower stratospheric photochemical system, Journal of Geophysical Research, v. 104, p. 8669-8689, 1999.
3. Feigin A.M., Konovalov I.B., Molkov Y.I., Toward an understanding of the nonlinear nature of atmospheric photochemistry: Essential dynamic model of the mesospheric photochemical system, Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 25447-25460, 1998.
4. Konovalov I.B., Feigin A.M., Towards an understanding of the non-linear nature of atmospheric photochemistry: origin of the complicated dynamic behavior of the mesospheric photochemical system, Nonlinear Processes in Geophysics, v. 7, p. 87-104, 2000.
5. Куликов М.Ю. Формирование когерентных пространственных структур в реакционно-диффузионной атмосферной системе под действием планетарной волны // Известия ВУЗов: Радиофизика – 2004. – Т. 47 – № 9 – С.739–752.
6. Куликов М.Ю., Фейгин А.М Реакционно-диффузионные волны в мезосферной фотохимической системе с учетом горизонтальной турбулентной диффузии // Известия РАН. Серия физическая – 2004. – Т. 68 – № 12 – С.1796–1803.
7. Kulikov M.Y., Feigin A.M Reactive-diffusion waves in the mesospheric photochemical system // Advances in Space Research – 2005. – Т. 35 – № 11 – С.1992–1998.
8. Куликов М.Ю., Гаштури А.П. Влияние вертикальной адвекции на нелинейно-динамические свойства фотохимии верхней мезосферы // Известия ВУЗов: Радиофизика – 2006. – Т. 49 – № 12 – С.1043–1050.
9. Kulikov M.Y. Theoretical investigation of the influence of a quasi-2-day wave on nonlinear photochemical oscillations in the mesopause region // Journal of Geophysical Research – 2007. – V. 112 – № D2 – P.D02305.
10. Kulikov M.Y. , Vadimova O.L., Ignatov S.K., Feigin A.M .The mechanism of non-linear photochemical oscillations in the mesopause region // Nonlinear Processes in Geophysics – 2012. – V. 19 – № 5 – P.501–512.
11. Kulikov M.Y., Belikovich M. V., Feigin A.M . Analytical Investigation of the Reaction-Diffusion Waves in the Mesopause Photochemistry // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 2020. – V. 125 – № 22.
12. Kulikov M.Y., Belikovich M. V., Feigin A.M. The 2-day photochemical oscillations in the mesopause region: the first experimental evidence? // Geophysical Research Letters – 2021. – V. 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL092795>.