

УДК 550.385

## ВОСЬМОЙ СИМПОЗИУМ ПО ТРЕНДАМ В АТМОСФЕРЕ

А.Д. Данилов

Кратко описаны наиболее интересные результаты, обсуждавшиеся на 8-м Симпозиуме «Долговременные изменения и тренды в атмосфере» (Кембридж, Англия, 27–31 июля 2014 г.). Подчеркивается, что существование охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения количества  $\text{CO}_2$  стало очевидным фактом. В настоящее время основное обсуждение проблемы идет по линии сравнения прогнозов изменения термосферных параметров в различных теоретических моделях и реальных изменений этих параметров, наблюдаемых экспериментально.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТРЕНД, ИОНОСФЕРА, ТЕРМОСФЕРА

### ВВЕДЕНИЕ

8-й Симпозиум по Трендам в Атмосфере походил в Кембридже (Англия) с 27 по 31 июля 2014 г. Основной лейтмотив Симпозиума был следующим. Если на предыдущем симпозиуме (2012 г.) приводились доказательства в пользу концепции охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы, то в Кембридже эта концепция считалась очевидной, и выяснялись основные особенности трендов с акцентом на сравнение эксперимента и моделей.

Симпозиум был организован Международной Рабочей Группой по долговременным изменениям и трендам в атмосфере. Спонсорами этой группы являются Международная Ассоциация Геомагнетизма и Аэронауки (MAGA), Международная Комиссия по Средней Атмосфере (ICMA), Международная Комиссия «Климат и Погода в Системе Солнце-Земля» (CAWSES-II) и Научный Комитет по Солнечно-Земной Физике (SCOSTEP).

В работе Симпозиума приняло участие около 50 ученых из 20 стран. Было представлено 13 докладных и 26 обычных устных докладов, а также 6 постерных сообщений. От РФ принимал участие только автор настоящей статьи, который сделал заказной 40-минутный доклад «Морфология трендов  $\text{foF}_2$ ».

Данный отчет должен рассматриваться, как продолжение отчета автора о предыдущем 7-м Симпозиуме, который проходил в Буэнос-Айресе (Аргентина) в 2012 г. По материалам отчета о том симпозиуме автором была опубликована статья в электронном журнале ИПГ [1] с более подробным описанием текущей ситуации и наиболее важных результатов исследования долговременных трендов параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы.

### СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА

Продолжается анализ трендов температуры в средней атмосфере. Обнаружено, что величина отрицательного тренда  $T$  в стратосфере и мезосфере уменьшается, если ее относить не к геометрической высоте, как это делалось до сих пор, а к уровню постоянного давления (так называемая геопотенциальная высота). Последний, как показал анализ, меняется в процессе оседания и охлаждения средней атмосферы. Изменение магнитуды тренда  $T$  существенно: на высоте 70 км тренд при использовании геометрических высот равен минус 1.8 К за десятилетие, а при использовании геопотенциальных высот – минус 0.95 К за десятилетие.

Изменение характера высотного профиля тренда  $T$  и его максимальных значений иллюстрирует рис. 1, взятый из [2]. На этом рисунке важна красная кривая, которая показывает, что профиль тренда  $T$  в последние десятилетия существенно изменяется при переходе от геометрических высот (левая панель) к геопотенциальным (правая панель).

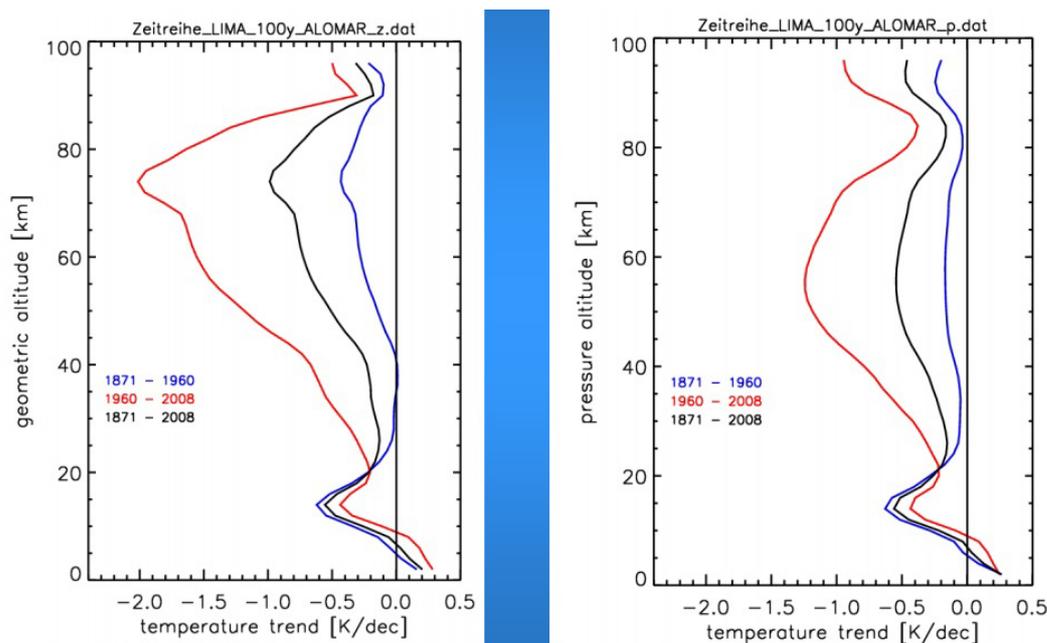


Рис. 1. Тренды температуры средней атмосферы, отнесенные к геометрической (слева) и геопотенциальной высоте (справа) согласно [2].

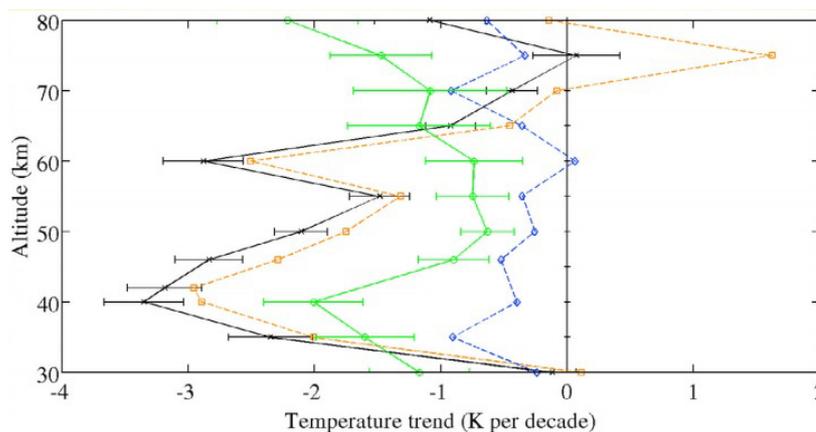


Рис. 2. Тренды температуры мезосферы согласно лидарным измерениям в обсерватории Верхний Прованс [3]. Черная и красная кривые относятся к лету, синяя – к зиме при учете всех дней, зеленая – к зиме при исключении дней СП.

Обнаружено также, что на средний тренд температуры в средней атмосфере влияет учет, или не учет дней стратосферных потеплений (СП). В дни последних тренд положителен, поэтому исключение подобных дней из анализа дает для зимы более высокие тренды  $T$ .

Анализ большого массива лидарных измерений  $T$  в обсерватории Верхний Прованс (Франция) дал значительное различие трендов  $T$  зимой и летом. Летом максимальный отрицательный тренд  $T$  наблюдается на высотах 40 и 60 км и составляет 3 К за десятилетие, тогда как зимой даже с удалением дней СП получается тренд, не превосходящий 2 К за десятилетие.

Тренды  $T$  для высот 40–80 км при использовании всех дней и при исключении дней внезапных стратосферных потеплений согласно указанным лидарным измерениям приведен на рис. 2 из [3]. Видно, что тренд летом (красная и черная кривые) выше, чем зимой, причем зимой при исключении дней СП (зеленая кривая) тренд выше, чем при использовании всех дней (синяя кривая).

Продолжается исследование роли различных факторов в трендах температуры. Разработанная в Институте физики атмосферы (Кулунсборн, Германия) модель LIMA (Leibniz-Institute Middle Atmosphere) позволяет вести расчеты параметров средней атмосферы, вводя текущие вариации количества

CO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> со временем согласно наблюдениям. Это выгодно отличает эту модель от многих моделей, где заранее задается некоторое увеличение (в большинстве случаев – удвоение) количества двуокиси углерода. Расчеты по модели LIMA показывают, что 2/3 тренда температуры в средней атмосфере обеспечивается увеличением количества CO<sub>2</sub> и 1/3 – уменьшением количества озона. Расчеты по модели GCR (NCAR, США) согласуются с этим выводом и показывают, что выше 110 км роль изменения концентрации озона пренебрежимо мала и весь эффект уменьшения T за период 1983–2003 гг. (–4.8 K) определяется ростом количества CO<sub>2</sub>.

Расчеты по модели LIMA дают отрицательные тренды температуры, равные  $-1.3 \pm 0.11$  K за десятилетие и  $-1.8 \pm 0.18$  K за десятилетие на высотах 60 и 70 км, соответственно. В целом модель LIMA при учете только роста количества CO<sub>2</sub> дает хорошее согласие изменения температуры в мезосфере с 1970 по 2010 гг. со средним трендом, равным  $-0.91$  K за десятилетие. Тренды T для высоты 70 км за счет CO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> согласно [2] приведены на рис. 3.

Был проведен детальный анализ поведения количества озона в стратосфере в период с 1985 по 2013 гг. по данным измерений аппаратами SAGE II и OSIRIS (спутник Odin). Результаты анализа показали, что данные двух аппаратов в период 2002–2005 гг., когда они функционировали одновременно, очень хорошо согласуются между собой. Основные результаты таковы. До 1997 г. выше 30 км наблюдается статистически значимый отрицательный тренд, равный 5–10% за десятилетие. После 1997 г. во всей стратосфере выше 22 км наблюдается восстановление количества озона со скоростью 3–8% за десятилетие. Ниже 22 км в широтной зоне 40° N – 40° S, однако, смены знака тренда не произошло, и сохраняется уменьшение концентрации озона со скоростью, которая была до 1997 г.

Детальный анализ результатов измерений аппаратурой SABER (Sounding of Atmosphere by Broadband Emission Radiometry) на спутнике TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics) за период 2002–2012 гг. показал, что отрицательный тренд температуры составляет 0.5 K за десятилетие в стратосфере и 3 K за десятилетие в мезосфере. В стратосфере обнаружен слабый положительный тренд озона на высоте 25 км, других трендов [O<sub>3</sub>] в стратосфере не обнаружено. В мезосфере зарегистрирован статистически значимый отрицательный тренд озона, равный 1.3 ppmv за десятилетие. Последнее обстоятельство важно потому, что тем самым подтверждается, что в охлаждение мезосферного газа вносит вклад не только увеличение количества CO<sub>2</sub>, но и отрицательный тренд озона.

Проведен анализ частоты появления РМС (полярные мезосферные облака). Получен устойчивый положительный тренд (взят период их появления 20 мая – 20 августа) этой частоты. Имеются также указания на то, что в 2002–2012 гг. нижняя граница области наблюдения РМС сдвинулась к низким широтам. Поскольку эти облака наблюдаются на высотах 82–84 км и связаны с температурой мезосферного газа (чем ниже температура, тем больше вероятность образования ледяных кластерных частиц, формирующих облака), оба эти результата качественно полностью согласуются с отрицательными трендами T, полученными для этих высот.

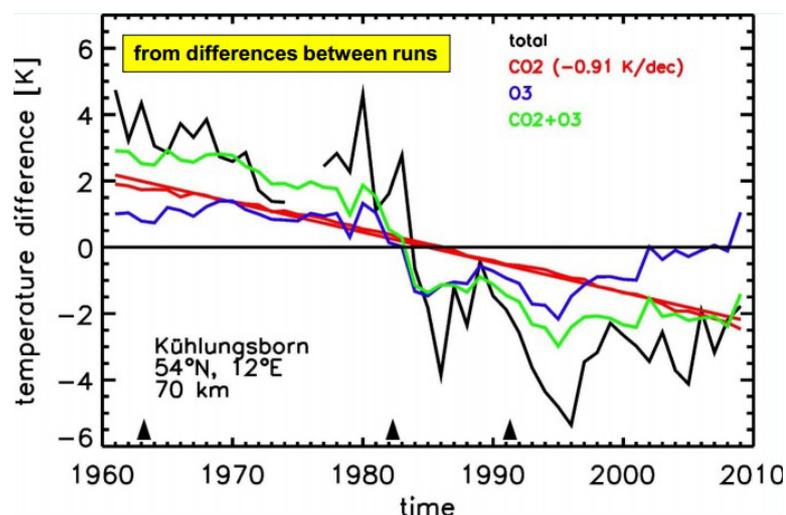


Рис. 3. Тренды температуры при учете охлаждения только за счет CO<sub>2</sub> или O<sub>3</sub>, а также за счет суммарного эффекта обоих газов согласно [2].

Проблема трендов динамики средней и верхней атмосферы была названа в программном докладе руководителя Рабочей Группы по трендам Я. Ластовички (Чехия) одной из наиболее сложных и актуальных проблем, связанных с атмосферными трендами. Ластовичка подчеркнул, что в последнее время стало ясно, что наблюдаются тренды всей динамической системы средней и верхней атмосферы, включая внутренние волны, приливы, ветры и вертикальный перенос. Существенно, что тренды динамических процессов должны особенно сильно различаться для разных регионов.

Были представлены новые данные о трендах преобладающего ветра на высоте около 90 км, основанные на наблюдениях метеорным радаром и низкочастотным приемником в Келне (Германия). Эти данные показывают, что в течение большей части года (за исключением весны) есть положительный тренд – преобладающий ветер становится все более направленным на восток. Средняя скорость зонального ветра с 1980 по 2014 гг. изменилась с +4 до +8 м/с. Этот вывод важен с точки зрения концепции усиления проникновения внутренних волн (прежде всего – ВГВ) из нижней атмосферы, где они генерируются, в область турбопаузы (110–120 км), где их диссипация определяет коэффициент турбулентной диффузии.

## ТЕРМОСФЕРА

Детальному анализу подверглась проблема усиления отрицательных трендов плотности термосферы в период минимума солнечной активности. Уже на предыдущем симпозиуме высказывалось предположение, что это связано с разной зависимостью от солнечной активности концентраций NO и CO<sub>2</sub>. Наблюдения аппаратурой SABER на спутнике TIMED (2001–2014 гг.) показали, что вклад молекул окиси азота в охлаждение термосферы меняется в цикле солнечной активности (СА) на порядок величины, тогда как изменение такого вклада за счет молекул CO<sub>2</sub> изменяется только на 35%. Таким образом, в минимуме СА основное охлаждение термосферы определяется именно количеством CO<sub>2</sub>, которое увеличивается со временем.

Имеются данные эксперимента ACE (Atmospheric Chemistry Experiment) об изменении концентраций CO и CO<sub>2</sub> в так называемой области MLT (мезосфера и нижняя термосфера) с 2004 по 2011 г. Эти данные показывают, что общее количество нечетного углерода CO<sub>x</sub> растет со временем быстрее, чем ожидалось в соответствии с моделями, основанными на известном увеличении CO<sub>2</sub> в тропосфере. При этом для CO<sub>2</sub> наблюдается как положительный тренд, так и зависимость от солнечной активности. Для CO наблюдается только зависимость от СА. Для CO<sub>x</sub> наблюдается положительный тренд и не наблюдается зависимости от СА.

Полученный из наблюдений с помощью ACE тренд [CO<sub>2</sub>] на высотах 90–105 км (+8% десятилетие) больше, чем тренд, даваемый моделью NCAR (+5% за десятилетие). Можно согласовать результаты этой модели с экспериментальными данными, если предположить, что коэффициент турбулентной диффузии  $k_{zz}$  растет со временем на 15% за десятилетие. Этот вывод важен для работ Института, поскольку на основании анализа трендов критических частот слоя F<sub>2</sub>, было высказано предположение [4], что усиливается перенос вниз атомов кислорода из гетеросферы в гомосферу через турбопаузу за счет, скорее всего, увеличения скорости турбулентного переноса (т.е. роста  $k_{zz}$ ).

Для проверки результатов, полученных с помощью аппаратуры ACE, использовалась модель WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model), которая включает детальную фотохимию 60-и с лишним компонент, включая семейства O<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, BrO<sub>x</sub>, и ClO<sub>x</sub>, а также весь комплекс процессов переноса и современные данные об изменениях УФ радиации в цикле СА. Модель проверялась на независимых данных наблюдений (измерения [CO] аппаратурой MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)) и показала свою корректность.

Результаты расчетов по модели WACCM позволили объяснить многие особенности результатов измерений аппаратурой ACE и другой аппаратурой на других спутниках. Для усредненных высотных профилей [CO<sub>2</sub>] и [CO] получено хорошее согласие модели и измерений. Эти результаты показали также, почему не наблюдается зависимости от СА в суммарной концентрации CO<sub>x</sub>: оказалось, что [CO<sub>2</sub>] и [CO] меняются со временем в антифазе (см. рис. 4). Однако модель WACCM не в состоянии объяснить высокий тренд (~8%), полученный аппаратурой ACE. Как видно из рис. 5, где приведены профили отношения смеси CO<sub>2</sub> согласно двум моделям для двух периодов (1996 и 2008), на высоте 101 км различие между кривыми для этих периодов почти отсутствует. Модельные расчеты показывают также, что выше 110 км отрицательный тренд [CO<sub>2</sub>] становится значительно сильнее тренда [CO] и, таким образом, определяет тренд [CO<sub>x</sub>].

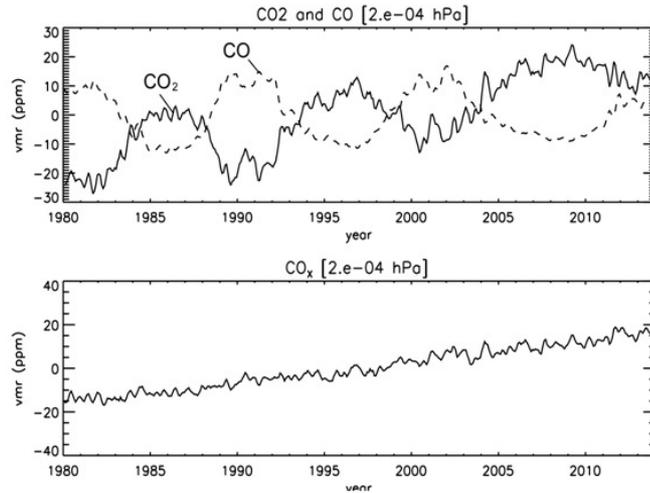


Рис. 4. Изменение со временем концентраций CO<sub>2</sub>, CO и CO<sub>x</sub> согласно [5].

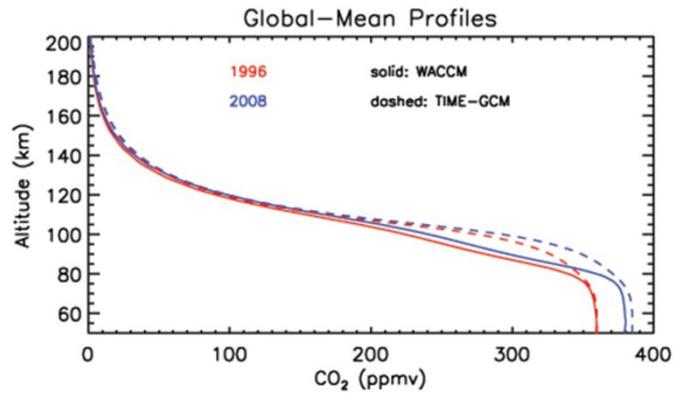


Рис. 5. Профили отношения смеси CO<sub>2</sub> согласно двум моделям для двух периодов (1996 и 2008), на высоте 101 км (из [6]).

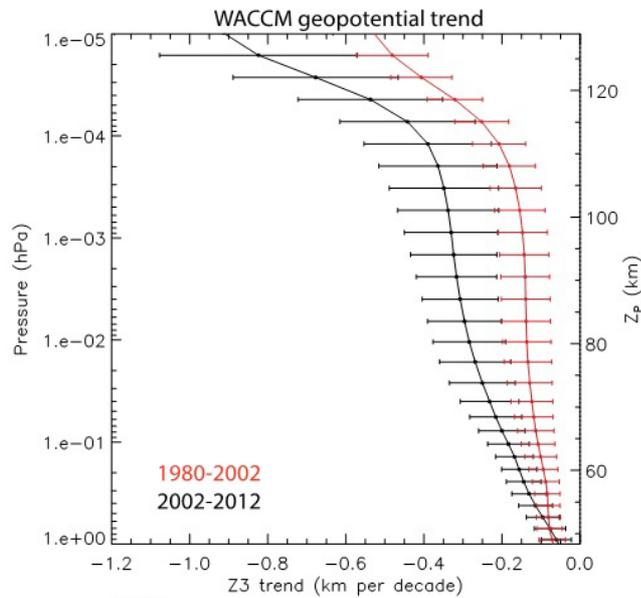


Рис. 6. Тренд геопотенциальной высоты для двух периодов согласно [5].

Расчеты с помощью модели WACCM показали, как по мере охлаждения и оседания атмосферы уменьшается геопотенциальная высота (высота фиксированного давления). За период с 1980 по 2002 гг. геопотенциальная высота на  $h = 120$  км уменьшалась (по сравнению с геометрической) на 0.4 км за десятилетие (см. рис. 6). Согласно моделям GCM и WACCM-X (см. ниже) на высоте 360 км уменьшение геопотенциальной высоты по сравнению с геометрической с 1996 по 2008 гг. составляет 3.2–3.7 км.

Модель WACCM позволила рассчитать изменения параметров области MLT до 2100 г. Расчеты показывают, что отрицательный тренд температуры будет расти и достигнет на высоте около 110 км 10 K за десятилетие к концу текущего столетия.

Падение плотности газа в основании термосферы (110–125 км) в период 2003–2012 гг. происходило гораздо быстрее, чем в предыдущие десятилетия. На высоте 125 км скорость этого падения достигла 6–7% за десятилетие.

В конце 23-го цикла СА наблюдалось сильное падение плотности термосферы на спутниковых высотах. Оно не согласуется с наблюдавшимся изменением индекса  $F(10.7)$ . Индекс  $F(10.7)$  в минимуме 2008–2009 г. был лишь на 3.7% ниже, чем в предыдущем минимуме СА, тогда как уменьшение  $\rho$  составило 28%. Это расхождение может быть связано с неадекватностью индекса  $F(10.7)$  для описания скорости нагрева термосферы, но может (хотя бы частично) быть объяснено и более быстрым охлаждением и оседанием верхней атмосферы из-за более сильного, чем ожидалось роста  $[CO_2]$  в области MLT (см. выше).

Как уже указывалось ранее (см. [1, 7]), данные по торможению спутников указывают на уменьшение плотности термосферы на высотах около 400 км. Данные предыдущих исследований давали для периода 1967–2005 гг. отрицательный тренд  $\rho$  от 1.7 до 5 % за десятилетие. Результаты группы Морской Исследовательской Лаборатории (США) для периода 1967–2005 гг. давали тренд, равный  $-1.9 \pm 0.7$  % за десятилетие. Новый анализ орбит 5000 объектов на высотах от 200 до 600 км за период 1967–2013 гг., выполненный указанной группой, дал отрицательный тренд, равный  $1.57 \pm 0.45$  % за десятилетие. Важным моментом этого анализа является то, что были исключены из рассмотрения годы глубокого минимума солнечной активности (2006–2009 гг.), поскольку в эти годы, как считают многие исследователи, индекс  $F(10.7)$  не описывал правильно изменение солнечного УФ излучения, которое определяет нагрев термосферы.

Самый большой тренд получается, если брать все годы за период 1967–2013 гг. Он меньше для периода 1967–2005 гг. и для комбинированного периода 1967–2005+2010–2013 гг (см. рис. 7). Важным результатом является то, что не обнаружено зависимости тренда плотности от индексов  $F(10.7)$  или  $k_p$  для  $F(10.7) \geq 100$ . Однако для низкой солнечной активности наблюдается резкий рост амплитуды отрицательного тренда от  $\sim 2\%$  за десятилетие при  $F(10.7) \sim 100$  до  $\sim 7\%$  за десятилетие при  $F(10.7) \sim 80$ .

Очень важно, что полученные отрицательные тренды  $\rho$  существенно сильнее, чем предсказывалось теоретическими моделями и их было невозможно объяснить наблюдаемым на сегодняшний день увеличением количества  $CO_2$ . До настоящего времени расхождение в величинах отрицательных трендов плотности термосферы на высоте 400 км, полученных по анализу торможения спутников, и трендов  $\rho$ , даваемых наиболее совершенной моделью TIME-GCM, разработанной в NCAR (США), было одной из наиболее острых проблем. Это различие было наиболее сильно выражено в минимуме солнечной активности, где наблюдения дают тренд — (5–7)% за десятилетие, а модельные расчеты давали только 3% за десятилетие. Выполнен новый цикл расчетов по указанной модели, в которых вместо удвоения количества  $CO_2$ , которое принималось раньше, взято реальное текущее увеличение этого количества. Введены также некоторые уточнения в саму модель. В частности включен учет процессов конвективного перемешивания. Результаты

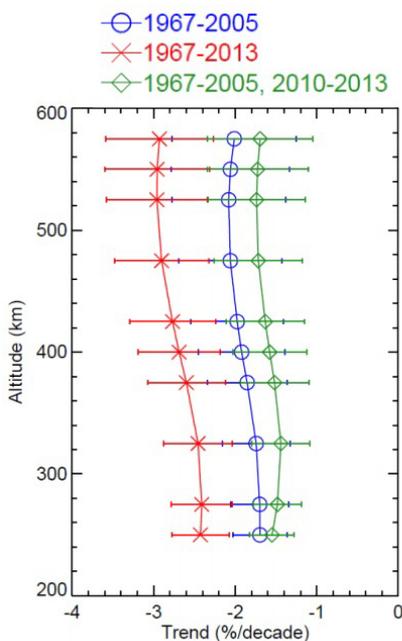


Рис. 7. Изменение трендов плотности термосферы для трех периодов согласно [8].

оказались в относительном согласии с экспериментальными данными. Теперь модель дает отрицательный тренд в 2% за десятилетие для средней солнечной активности и 5% за десятилетие в период солнечного минимума (см. выше о новых результатах анализа торможения спутников). Сравнение экспериментальных трендов  $\rho$  и расчетов по предыдущей версии модели TIME-GCM и по новой версии, доложенной на описываемом Симпозиуме, приведено на рис. 8.

Однако даваемая новой версией модели TIME-GCM скорость охлаждения термосферного газа все еще ниже, чем оцененная из данных наблюдений на спутнике SABER. Один из способов увеличить скорость охлаждения в модели – принять более высокие концентрации атомного кислорода в термосфере, поскольку он принимает активное участие в цикле процессов охлаждения за счет молекул  $\text{CO}_2$ . Однако, представляется, что указанное противоречие может быть связано с тем, что реальные концентрации  $\text{CO}_2$ , по крайней мере в основании термосферы, гораздо выше, чем ожидается в соответствии с увеличением  $[\text{CO}_2]$ , наблюдаемым в тропосфере (см. выше об измерениях  $[\text{CO}]$  и  $[\text{CO}_2]$  на спутнике ACE).

Доложены первые результаты расчетов по модели WACCM-X, которая представляет собой расширение модели WACCM (см. выше) на всю термосферу до высоты около 500 км. В этой модели приняты более высокие концентрации атомного кислорода, чем в модели TIME-GCM. Это позволяет получить скорости охлаждения термосферного газа, более близкие к наблюдаемым. Однако, как и в предыдущей модели WACCM, в модели WACCM-X практически нет роста  $\text{CO}_2$  на высотах около

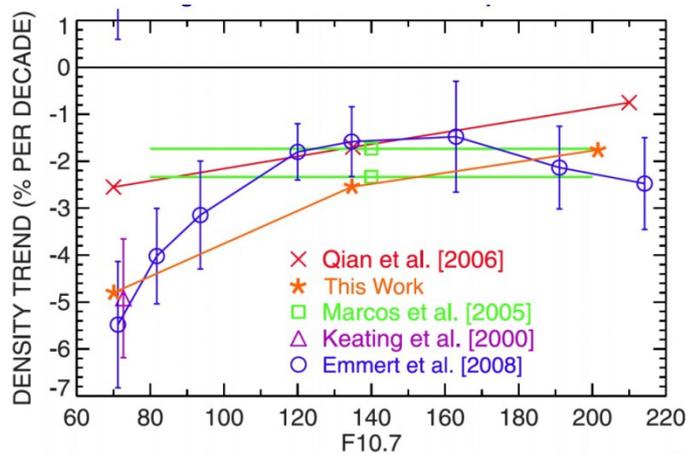


Рис. 8. Зависимость трендов плотности термосферы от индекса F(10.7) согласно экспериментальным данным и моделям согласно [9].

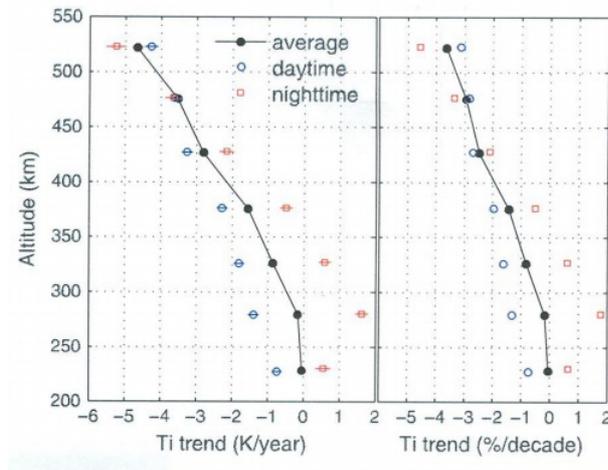


Рис. 9. Тренды ионной температуры по измерениям методом НР в Милстоун Хилл согласно [3].

100 км от 1996 к 2008 г., тогда как (см. выше) согласно экспериментальным данным  $[\text{CO}_2]$  в основании термосферы в 2000-х годах существенно выше, чем в 90-х годах прошлого века. Расчеты уменьшения плотности атмосферы от предыдущего минимума СА к минимуму 2008–2009 гг. дают по модели WACCM-X за счет увеличения количества парниковых газов падение на 6%, тогда как реальная разница в  $\rho$  составляет около 30%. Это несоответствие, как уже указывалось выше, объясняют очень глубоким минимумом 2008–2009 гг., когда реальный поток УФ излучения Солнца мог быть много ниже, чем в минимуме 1996 г. Следует также подчеркнуть, что предположение о более высоких концентрациях  $[\text{O}]$  противоречит наблюдениям аппаратурой SABER на спутнике TIMED, которые показали, что концентрация  $[\text{O}]$  в мезосфере уменьшается со временем.

Расчеты по модели WACCM-X для случая удвоения количества  $\text{CO}_2$  дают для высот 200 и 300 км уменьшение температуры на 35–40 и 45–50 К, соответственно. Модельное уменьшение плотности термосферного газа составляет для этих высот 40 и 50%, соответственно.

На Симпозиуме не было специального доклада по наблюдениям методом некогерентного рассеяния (НР), но в программном докладе [3] были представлены данные измерений на установке НР в Милстоун Хилл трендов электронной температуры. Эти данные показывают, что ночью тренды  $T_i$  существенно выше, чем днем (см. рис. 9).

## ТРЕНДЫ И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Большое внимание во многих исследованиях стали уделять количественным оценкам зависимости параметров средней атмосферы от солнечной активности (СА). Так, по тем же данным SABER наблюдается положительная зависимость концентрации  $\text{O}_3$  в мезосфере и нижней термосфере на высотах 80–100 км (0.91 pptv на 100 единиц солнечного потока (sfu)) с максимумом на 90 км. Ниже 80 км зависимости  $[\text{O}_3]$  в мезосфере от СА не обнаружено. Зависимость  $T$  в верхней мезосфере от СА выражена сильнее (3.74 K/100 sfu) и имеет максимум (5.2 K/100 sfu) на 94 км. Плотность атмосферы на  $h = 100$  км демонстрирует положительную связь с СА – 5% / 100 sfu.

В докладе большой группы авторов (Англия) подробно анализировался «большой» цикл солнечной активности. Предполагается, что этот «большой» цикл, в котором мы находимся сейчас, может смениться в ближайшие несколько десятилетий сильным «большим» минимумом, возможно, близким к минимуму Маундера. В связи с этим проанализированы возможные изменения климата. Прямой эффект в тропосферной температуре должен быть мал (~0.1 К), но ожидаются сильные изменения режима тропосферной циркуляции, которые должны привести к изменениям в приземной температуре и осадках, сравнимым с теми изменениями, которые моделируется различными сценариями увеличения парникового эффекта.

Наблюдения аппаратурой SABER на спутнике TIMED показали, что текущий максимум солнечной активности много слабее, чем предыдущий, поэтому сейчас (2014 г.) максимум СА по интенсивности УФ излучения много ниже, чем в 2002–2003 гг. Соответственно, и мощность  $\text{CO}_2$  ( $W(\text{CO}_2)$ ) и температуры ( $W(T)$ ) в термосфере меньше, чем в предыдущем максимуме.

## ИОНОСФЕРА

В последние несколько лет все большее внимание привлекает проблема влияния вековых вариаций магнитного поля на параметры ионосферного слоя F2, foF2 и hmF2. Изменения магнитного поля могут влиять на состояние области F по двум каналам. Во-первых, изменения магнитного наклонения I и склонения D должны влиять на вертикальный дрейф плазмы, индуцированный горизонтальными ветрами в термосфере. Во-вторых, неизбежно должны происходить изменения в магнитосфере, которые скажутся на состоянии термосферы и ионосферы. Одним из таких наиболее очевидных изменений является изменение нагрева термосферы в полярных областях за счет джоулева нагрева. Это должно приводить как к изменению меридиональной циркуляции, так и к изменению состава термосферного газа. Примеры обоих изменений хорошо видны в случае ионосферных бурь, сопровождающих магнитосферные возмущения.

Используя модель СМІТ (Coupled Magnetosphere Ionosphere Thermosphere) были проведены расчеты термосферных и ионосферных параметров для эпох 1908, 1958 и 2008 гг. Результаты этих расчетов показывают, что разница как в foF2, так и в hmF2 между 2008 и 1958 гг. при соответствующих параметрах магнитного поля мала и статистически не значима. Разница между 2008 и 1908 г. статистически значима только в области Атлантического океана, что связано, очевидно, с изменени-

ем параметров известной магнитной аномалии. Максимальное уменьшение от 1908 г. к 2008 г. в этой области составляет 50 км и 1.5 МГц для hmF2 и foF2, соответственно, причем эти величины уменьшения существуют только в очень небольшой части рассматриваемой области. В большей ее части уменьшение hmF2 за сто лет составляет 5–10 км, а foF2 – 0.5 МГц и менее. Изменения hmF2 существенно сильнее днем, чем ночью, тогда как изменения foF2 лишь немного сильнее в дневное время.

Расчеты по той же модели показывают, что за 100 лет в рассматриваемой атлантической области нейтральная и ионная температуры на высотах максимума слоя F2 должны были уменьшиться самое большее на 4 К и 20 К, соответственно. Для электронной температуры получен рост, который в небольшой пространственной области может достигать 750 К.

Фактически, описанные результаты показывают, что вклад вековых изменений магнитного поля в анализируемые в настоящее время тренды параметров термосферы и ионосферы мал даже в области Атлантики. На остальной территории земного шара он просто отсутствует. Исключение может составлять электронная температура, но также только в небольшой пространственной области в Атлантике.

Другой подход к той же проблеме состоит в анализе изменения положения магнитного экватора из-за вековых изменений магнитного поля. Показано, что это изменение приводит к изменению положения экваториальной ионосферной аномалии. При этом на ионосферных станциях приэкваториальной зоны должен наблюдаться тренд foF2. Для двух таких станций Дакар и Огадугу из наблюдений получены отрицательные тренды, равные  $-0.0142$  и  $-0.0229$  МГц в год, соответственно, для периода 1965–1995 гг. Эти величины сравнимы с трендами, которые наблюдаются для среднеширотных станций (см. ниже), что говорит о том, что изменения положения магнитного экватора, действительно, могут вносить существенный вклад в тренды foF2 на экваториальных широтах.

Для анализа трендов foF2 и hmF2 был применен метод EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition). Анализировались обычные данные вертикального зондирования. Показано, что этот метод дает более высокие тренды, особенно для foF2, чем метод линейных трендов. Для 4 станций из 19 анализировавшихся получены отрицательные тренды как foF2, так и hmF2. Для foF2 получены положительные тренды на 2-х станциях из 21. В остальных случаях тренды отрицательны. Следует подчеркнуть, что совместно анализировались все сезоны и все моменты LT. Сравнение этих трендов с результатами, полученными в [10], приведено в таблице 1. Видно, что тренды foF2, полученные методом EEMD, близки к низким трендам для летнего периода. Поскольку существует и сезонный и суточный ход трендов foF2 [11], следует ожидать, что максимальные тренды (зимой в дневное время), даваемые методом EEMD, будут в 2–3 раза выше и приближаться к более высоким трендам для зимнего периода.

Таблица 1. Тренды foF2 в МГц/год

Станция	тренд EEMD	тренд ИПГ	
		лето	зима
Юлиусру	-0.017	-0.017	-0.025
Москва	-0.012	-0.019	-0.101
Рим	-0.014	-0.011	-0.072
Томск	-0.026	-0.030	-0.025
Хобарт	-0.007	0	-0.015

Следует отметить, что по различным данным (см. [7]) ионосферные тренды в области F ионосферы начинают проявляться примерно с 1980 г. В этом случае включение в анализ более ранних лет (1964–1980) должно приводить к занижению получаемых трендов.

## ГЕОИНЖЕНЕРИЯ

О предложениях «геоинженерного» решения проблемы глобального потепления подробно говорилось в статье автора, посвященной предыдущему симпозиуму по трендам [1]. Многочисленные модельные расчеты предсказывают, что, если увеличение выбросов парниковых газов будет продолжаться, то после 2050 г. эффекты в тропосфере приобретут катастрофический характер. Усредненное

В работах другой группы авторов анализировались тренды foF2 для двух станций (Слау и Кокобунджи). Подробно рассматривались различные методы учета SA: с помощью индексов F(10.7) и W, а также моделей. Получено, что наиболее значимые тренды получаются при использовании индекса F(10.7). Сознательно не учитывались данные 23-го цикла, поскольку авторы считают, что в нем связь между F(10.7) и солнечным ультрафиолетом нарушается (см выше). Для периода 1964–2008 гг. для дневных (1400 LT) летних условий получены тренды  $-0.022$  (Кокобунджи) и  $-0.011$  (Слау) МГц/год. В работе [4] для Слау (лето, 1400 LT) был получен тренд, равный  $-0.022$  МГц/год.

по земному шару увеличение  $T$  в тропосфере на высоте 1.5 м составит в 2100 г. по сравнению с 2000 г. в среднем  $4.69^\circ \text{C}$ . Однако, это увеличение будет происходить неравномерно в географическом плане, и в некоторых регионах Земли приращение  $T$  может достигнуть  $10^\circ \text{C}$ . При предлагаемых различными группами исследователей «геоинженерных» методах (см. также [1]) среднее превышение  $T$  к 90-м годам нашего века может уменьшиться до  $2.8\text{--}3.5^\circ \text{C}$ . В число этих методов (кроме методов, описанных в указанной статье [1]) входят также искусственное утончение перистых облаков, повышение яркости стратосферных кучевых облаков, выброс морской воды в облака с помощью глобальной системы очень мощных вертикально действующих помп, создание искусственных «лесов», компенсирующих уменьшение площади тропических лесов из-за их вырубki, создание крупных дисков, летающих в атмосфере и отражающих солнечное излучение, и ряд других. По-прежнему рассматриваются два принципиальных пути – уменьшение количества  $\text{CO}_2$  (CDR, Carbon Dioxide Removal) и уменьшение солнечного излучения, достигающего поверхности Земли (увеличение альбедо). Наиболее «реальный» из CDR методов требует выброса в атмосферу  $5 \cdot 10^6$  тонн двуокиси серы ( $\text{SO}_2$ ) в год в течение 50 лет. Вероятно, геоинженерные мероприятия, связанные с воздействиями в стратосфере, более перспективны, чем мероприятия, связанные с воздействиями в тропосфере, так как последние трудно провести равномерно по земному шару. При наиболее полном использовании всех предлагаемых методов величина  $\Delta T$  может в 2035–2040 гг. достигнуть уровня  $+1.8^\circ \text{C}$  и прекратить рост.

Однако, все предлагаемые пока методы имеют два принципиальных недостатка. Во-первых, они очень сложны технически, а потому дорогостоящи и требуют совместных усилий всех развитых стран мира. Во-вторых, они чреваты уже предсказуемыми и пока еще неизвестными побочными последствиями. «Лечение может оказаться хуже болезни».

О возможных последствиях частично уже говорилось ранее (см. [1]). Из вновь указанных негативных эффектов следует упомянуть понижение концентрации стратосферного озона, непрерывное окисление океанской воды и опасность быстрого и сильного потепления, если мероприятия по какой-то причине будут прекращены. Особо следует подчеркнуть морально политические аспекты проблемы «геоинженерии», о которых, насколько известно автору данной статьи, до сих пор не говорилось. Это, прежде всего, вопрос о том, в чьих руках будет управление «термостатом», и возможности военного использования созданных технологий. Побочным эффектом, скорее всего, будет также невозможность наземных астрономических наблюдений. Сводка некоторых положительных и отрицательных эффектов геоинженерии согласно [12] приведена в таблице 2.

Таблица 2 Выигрыши и риски геоинженерии.

Выигрыши	Риски
1. Охлаждение планеты	1. Засуха в Азии и Африке
2. Ослабление таяния морского льда	2. Продолжение окисления океана за счет $\text{CO}_2$ .
3. Ослабление таяния ледников на суше.	3. Уменьшение количества озона.
4. Уменьшение подъема морской воды	4. Не будет голубого неба.
5. Увеличение продуктивности растений	5. Меньше энергии для солнечных станций.
6. Увеличение стока $\text{CO}_2$	6. Быстрое потепление, если мероприятия прекратятся.
	7. Эффект потепления не может остановиться быстро.
	8. Опасность человеческой ошибки.
	9. Коммерческий контроль
	10. Военное использование технологии.
	11. Чья рука будет на термостате?
	12. Разрушение наземной оптической астрономии

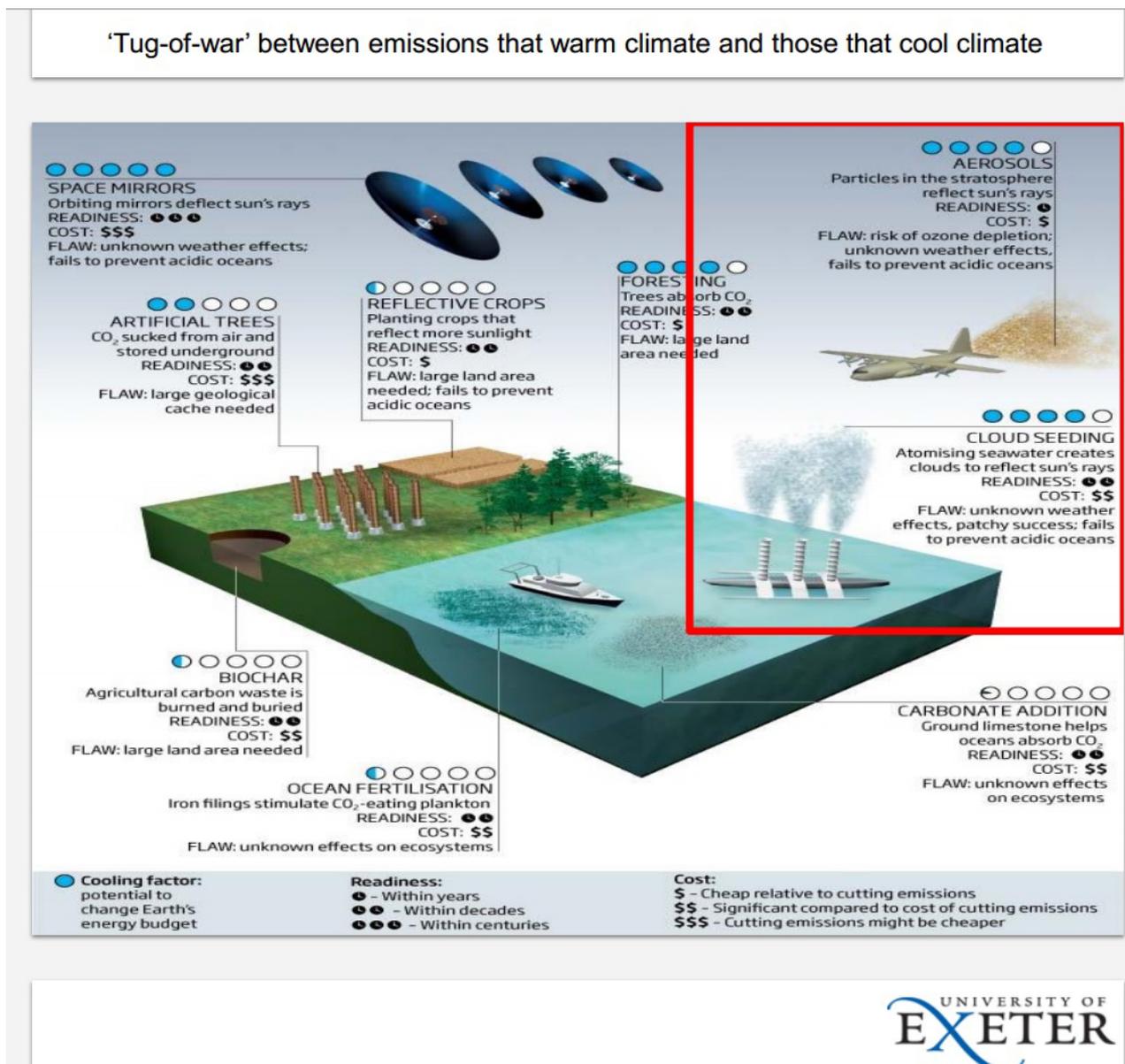


Рис. 10. Символическая сводка различных методов геоинженерии согласно [12].

Поскольку все указанные выше выводы построены на модельных расчетах, следует отметить, что была предпринята специальная кампания по проверке адекватности моделей на примере сильных выбросов аэрозолей при мощных извержениях вулканов. Проверка показала, что большинство моделей хорошо описывают изменения в атмосфере при этих извержениях, наблюдаемые по спутниковым данным (в частности, прибора OSIRIS).

Символическая сводка основных предлагаемых методов геоинженерии приведена на рис. 10.

**РАЗНОЕ**

Поскольку неизбежность дальнейшего увеличения количества парниковых газов за счет антропогенных эффектов многим исследователям представляется неизбежной, проводятся расчеты изменений параметров всей атмосферы при таком увеличении. Выше уже говорилось о том, что многие расчеты по моделям (например, NCAR GCM) делались для случая удвоения количества CO<sub>2</sub>. Используя уже упоминавшуюся выше модель WACCM, выполнены расчеты и для увеличения [CO<sub>2</sub>] в четыре раза по сравнению с доиндустриальным уровнем. Эти расчеты показывают, что рост T в тропосфере составит в среднем 4.47 K (при удвоении [CO<sub>2</sub>] этот рост ожидается на 2-3 K), причем

эффект будет сильнее в высоких широтах. В мезосфере ожидается охлаждение на 15 К. В области стратосферы также ожидается охлаждение примерно на 15 К. В стратосфере ситуация более сложна, так как сильное увеличение количества  $\text{CO}_2$  должно привести к увеличению количества озона, и вызванное этим увеличение нагрева будет компенсировать охлаждение за счет роста  $[\text{CO}_2]$ .

Проблема долговременных изменений параметров средней и верхней атмосферы стала уже настолько очевидной, что ставится вопрос о новом подходе к созданию моделей атмосферных и ионосферных параметров. В частности, Эммерт (США) предложил обобщенную формулу для таких моделей [13]:

$$y = a + b F(10.7) + c \text{kp} + d [\text{CO}_2]$$

где  $y$  – моделируемый параметр,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  – некие коэффициенты, или функции. Введение последнего члена, учитывающего увеличение количества  $\text{CO}_2$ , предлагается впервые.

Анализ поведения объектов космического мусора (space debris) показывает, что уменьшение плотности атмосферы, наблюдаемое уже сейчас, увеличивает время жизни таких объектов на низких орбитах на 2-5% за десятилетие. Это автоматически приводит к увеличению числа одновременно существующих объектов и, соответственно, вероятности их столкновения с действующими космическими аппаратами. Если падение плотности термосферы будет продолжаться с той же скоростью, то очень скоро вероятность таких столкновений может возрасти до критической величины.

NASA планирует в 2015 г. запустить новый космический аппарат MASTER (Middle Atmosphere Source of Thermospheric Emission Radiometer), нацеленный на изучение энергетики процессов нагрева и охлаждения термосферного газа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общее впечатление от всех прослушанных докладов можно сформулировать следующим образом.

1. Теоретические модели (даже считавшиеся лучшими из них, например TIME-GCM) пока плохо описывают сложную динамическую ситуацию, складывающуюся в средней и верхней атмосфере в результате охлаждения и оседания. Непрерывно приходится вводить новые факторы (например, увеличение коэффициента турбулентной диффузии, или изменение  $[O]$ ), но даже при этом ряд твердо установленных фактов (увеличение  $[\text{CO}_2]$  в основании термосферы, сильное падение плотности в 2008-2009 г и др.) остается необъясненным.
2. Измеренное увеличение  $[\text{CO}_2]$  в основании термосферы показывает, что процессы охлаждения и оседания в термосфере идут явно быстрее, чем модели предсказывают для современного увеличения этой концентрации в тропосфере. Это может объяснить и более сильное изменение плотности на спутниковых высотах, и сильное уменьшение  $T_i$  (а, значит, и  $T_n$ ?) в верхней термосфере, и более сильные, чем ожидалось, тренды параметров слоя F2.
3. Продолжается поиск трендов foF2 и hmF2 и отработка методов такого поиска. Новый результат состоит в том, что у всех авторов тренды обоих параметров получаются отрицательными. Получаемые разными авторами магнитуды трендов в целом близки к результатам, полученным в ИПГ [10].
4. Стало ясно, что вековые изменения геомагнитного поля, которые некоторые исследователи рассматривали как основную причину долговременных изменений параметров верхней атмосферы и ионосферы, не вносят существенного вклада в термосферные и ионосферные тренды. Последние, несомненно, являются результатом антропогенных эффектов, вызывающих охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы.

## THE 8-TH SYMPOSIUM ON ATMOSPHERIC TRENDS

Danilov A.D.

The most interesting results discussed at the 8<sup>th</sup> Symposium “Long-term changes and trends in the atmosphere” (Cambridge, England, July 27—31, 2014) are briefly described. It is emphasized that the existence of the cooling and contraction of the middle and upper atmosphere due to the increase in CO<sub>2</sub> content became an obvious fact. Currently discussion of the problem occurs in the line of comparison of predictions of changes in thermospheric parameters according various theoretical models and real changes in these parameters observed experimentally.

**KEY WORDS:** TREND, IONOSPHERE, THERMOSPHERE.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А.Д., Симпозиум по трендам в атмосфере, Гелиогеофизические исследования, вып. 2, 2012.
2. Berger U. Temperature and PMC trends in the northern summer mesosphere for 1961-2009. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
3. Lastovicka J. Trends in the upper atmosphere—ionosphere system—Progress over 2012—2014. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
4. Данилов А.Д., Константинова А.В. Уменьшение количества атомного кислорода в верхней атмосфере. Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 2. С. 239-245. 2014.
5. Garcia, R., Puertas, M.L., Funke, B., Kinnison, D., and March, D. Secular trends and solar cycle variability of CO and CO<sub>2</sub> in the MLT. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
6. Qian L., McInerney J, Liu H., and Solomon S. Long-Term changes in the thermosphere simulated by WACCM with the Thermosphere/Ionosphere Extension (WACCM-X). Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
7. Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор). Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 291-312. 2012.
8. Emmert J. Updated thermospheric density trends from satellite orbits. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
9. Solomon S. New 3D simulation of global changes in the thermosphere. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
10. Данилов А. Д., Константинова А. В. Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота. Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 4. С. 361-372. 2013.
11. Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов *foF2* с сезоном и временем суток. Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 1. 2015 (в печати).
12. Haywood J. Solar Radiation management as a “solution” to global warming: is the cure worse than the disease. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.
13. Emmert J., Climate theory, attribution and statistics for the upper atmosphere. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Cambridge (UK), July 2014.