

УДК 550.385

СИМПОЗИУМ ПО ТРЕНДАМ В АТМОСФЕРЕ

А.Д. Данилов

Кратко описаны наиболее интересные результаты, обсуждавшиеся на 7-м Симпозиуме «Долговременные изменения и тренды в атмосфере» (Буэнос Айрес, Аргентина, 11-14 сентября 2012 г.) К наиболее интересным научным результатам следует отнести различные экспериментальные подтверждения вывода об охлаждении и оседании всей толщи средней и верхней атмосферы в результате увеличения в ней количества парниковых газов. Особенно важно то, что наблюдаемые различными методами изменения в термосфере и ионосфере значительно превышают уже сейчас тренды температуры и плотности, которые дают самые совершенные современные модели, и соответствуют модельным оценкам для удвоения количества парниковых газов, ожидаемого в 2100 г.

Более подробно описывается доклад, посвященный геоинженерии – возможным инженерным решениям проблемы компенсации увеличения CO_2 .

Ключевые слова: ТРЕНД, ИОНОСФЕРА.

ВВЕДЕНИЕ

7-й Симпозиум по долговременным изменениям и трендам в атмосфере состоялся с 11 по 14 сентября 2012 г. в г. Буэнос Айрес (Аргентина). Симпозиум был организован Международной Рабочей Группой по долговременным изменениям и трендам в атмосфере. Спонсорами этой группы являются Международная Ассоциация Геомagnetизма и Аэрoномии (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).

Автор данной статьи участвовал в организации этой РГ в 1998 г во время Ассамблеи КОСПАР в Бирмингеме (Англия) и был в бюро группы до 2009 г. Он участвовал в пяти первых симпозиумах в 2001-2008 гг.

Как и на предыдущих 6-и Симпозиумах, рассматривались долговременные изменения (тренды) параметров средней и верхней атмосферы (от стратосферы до верхней ионосферы). Изменения в тропосфере рассматривались лишь постольку, поскольку они имели отношение к обсуждавшимся трендам параметров вышележащих слоев. Проблемы

глобального потепления климата не рассматривались вовсе.

Красной нитью через большинство докладов Симпозиума проходила мысль о том, что, не смотря на принятые на уровне ООН меры, увеличение количества парниковых газов в атмосфере продолжает увеличиваться, и это отражается в соответствующих трендах различных параметров от стратосферы до термосферы.

НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проблема роста концентрации CO_2 оказалась достаточно сложна из-за того, что с увеличением выбросов CO_2 ее время жизни уменьшается и, таким образом, нет линейной связи между ростом выбросов и ростом $[\text{CO}_2]$. Справедливо и обратное – даже если рост выбросов прекратится, увеличение количества CO_2 в атмосфере будет продолжаться еще некоторое время с соответствующими последствиями для всех атмосферных слоев. Например, если остановить рост выбросов сейчас, то отношение смеси CO_2 будет расти до 506.9 ppmv в 2100 г. (сейчас оно равно 338.6 ppmv).

Реальная скорость изменения температуры в тропосфере и нижней стратосфере составила за период 2000-2010 гг. +0.93 К за десятилетие. Расчеты по современным климатическим моделям,

выполненные в Национальном Центре Атмосферных Исследований (NCAR) США показывают, что при наиболее неблагоприятных из имеющихся сейчас сценариев дальнейшего изменения количества парниковых газов (CO_2 и CH_4) изменение температуры в стратосфере тропических широт может достигнуть 15 К.

Меры, принятые в отношении уменьшения выброса в атмосферу озоноразрушающих веществ, галлонов, (Монреальский протокол), наоборот, дали вполне заметные результаты. Идет восстановление количества озона в стратосфере. С начала индустриального периода (условно считается 1970 г.) общее содержание озона (ОСО) в глобальном масштабе падало в среднем на 2.9% за десятилетие. Максимальное уменьшение ОСО пришлось на середину 90-х годов. С примерно 1995 г. выброс галлонов стал уменьшаться. Это сказалось на изменении ОСО в средних широтах. Величина ОСО в среднем составляла 420 ЕД в 1970 г. и 320 ЕД в 1995 г. В настоящее время (2012 г.) она равна 380 ЕД. Иначе говоря, произошло существенное восстановление количества озона в средних широтах, хотя доиндустриальный уровень еще не достигнут.

Изменение количества озона в полярных областях, особенно в области так называемой антарктической озонной дыры, не так заметно. Дыра не исчезает, но характер ее поведения меняется. Она становится более вытянутой, причем направление вытянутости меняется – в одни годы край дыры накрывает Патагонию (Южная Америка), в другие – юг Африки. По-прежнему наблюдаются спорадические уменьшения количества озона в Арктике.

Принципиально новым фактом явилось уменьшение отрицательного тренда в мезосфере. Расчеты показывают, что увеличение количества CO_2 дает постоянный вклад в температуру мезосферы, равный -0.91 К в десятилетие. Максимальный тренд T в мезосфере в середине 90-х составлял минус $0.2-0.3$ К в год. В этот период максимальное отклонение температуры от температуры доиндустриального периода составляло $\Delta T \sim -5$ К. Вклад уменьшения количества озона составлял при этом 2 К. Сейчас за счет восстановления количества озона его вклад

в охлаждение мезосферы равен нулю, а суммарное отклонение T равно -2 К.

В то же время, принципиальный факт охлаждения мезосферы подтвердился результатами наблюдений в низких широтах на спутнике HALOE. Большой массив наблюдений на этом спутнике резко повысил статистическую достоверность отрицательных трендов T на высотах 50-80 км, полученных ранее другими методами.

В приэкваториальных широтах восстановление температуры верхней стратосферы и мезосферы идет медленнее. Лидарные наблюдения в Индии дали следующие величины трендов T зимой за период 1997-2008 гг.: -4.2 , -4.8 и -2.0 К за десятилетие на высотах 35, 45 и 55 км, соответственно.

В то же время, обнаружен отрицательный тренд температуры на мезопаузе, где до сих пор считалось, что T неизменна. После 2000 г. тренд составляет -2.3 К за десятилетие. Предполагается, что изменение тренда T на мезопаузе также связано с восстановлением количества озона в атмосфере, но физический механизм пока не ясен.

Дополнительным подтверждением «оседания» или «сжатия» мезосферы из-за увеличения количества парниковых газов является уменьшение высоты слоя свечения возбужденных молекул ОН. При этом количество таких молекул (а, следовательно, и интенсивность соответствующих полос в свечении атмосферы) может оставаться постоянной, что и обусловило нулевой тренд T на мезопаузе (рядом со слоем свечения ОН), получавшийся по этому свечению.

Долгое время не могли согласовать данные по трендам серебристых облаков (NLC), полярных мезосферных облаков (PMC) и полярных мезосферных летних эхо (PMSE), наблюдаемых радаром ($f \sim 50$ МГц). Сейчас картина прояснилась. Окончательно установлено, что NLC и PMC – это одно и то же явление, по-разному выглядящее со спутников и при наземных наблюдениях. Эти облака зависят от температуры на высотах 82-84 км и количества паров воды. Показано, что появляемость этих облаков растет. Если в 1980 г. она составляла 10 в год, то в 2009 г. – уже 27 в год. Анализ радарных наблюдений показал, что растет и частота

регистрации PMSE. Их появление и длительность наблюдения также связаны с температурой (чем ниже T , тем более вероятно образование заряженных аэрозолей, на которых происходит отражение радиоволн). Таким образом, все три явления указывают на отрицательный тренд температуры на высотах 80-85 км.

Изменяется ветровой режим мезосферы. Получено, что в стратосфере и нижней мезосфере происходит усиление зонального ветра к востоку. Поскольку хорошо известно, что зональный ветер на этих высотах фильтрует внутренние атмосферные волны и что ветры на восток благоприятны для прохождения волн вверх, полученное усиление ветра на восток должно приводить к более сильному проникновению волн в верхнюю мезосферу и нижнюю термосферу. Факт такого проникновения подтверждается как данными о планетарных волнах, так и наблюдениями внутренних гравитационных волн (ВГВ). При этом амплитуды гравитационных волн усиливаются в мезосфере и ослабевают в термосфере. Последнее означает, что их энергия диссипирует в области 90-110 км, приводя к усилению турбулентной диффузии (см. также ниже).

Наиболее сильные и неожиданные изменения происходят в термосфере и области F ионосферы. На основании наблюдений орбит нескольких сотен спутников уже было показано ранее, что плотность термосферы на высотах около 400 км систематически уменьшается, причем наибольший отрицательный тренд (~5% за десятилетие) наблюдается в минимуме солнечной активности. Эти данные были подтверждены и дополнены недавними измерениями.

Причина зависимости тренда плотности термосферы ρ от солнечной активности стала понятна в результате моделирования. В охлаждении термосферы принимают участие NO и CO₂. Концентрация последней не зависит от солнечной активности, тогда как концентрация первой зависит и сильно (охлаждение за счет NO уменьшилось с 2002 г. до 2008 г. на порядок величины). В результате – в минимуме активности все охлаждение определяется CO₂, количество которого непрерывно уменьшается, поэтому в

минимуме наблюдается наиболее сильный отрицательный тренд ρ .

Изменение тренда ρ в зависимости от солнечной активности приведено на рис. 1, взятом из недавней работы [1]. Практически этот же рисунок был показан в заказном докладе Эммерта [2]. Кроме уже упомянутого выше усиления тренда ρ в минимуме солнечной активности обращает на себя внимание факт, что модельные расчеты [3, 4] дают качественно «правильный» ход тренда с активностью и абсолютные значения тренда, совпадающие с наблюдаемыми. Проблема состоит в том, что расчеты деланы для удвоения количества CO₂, которое ожидается лишь в 2100 г.

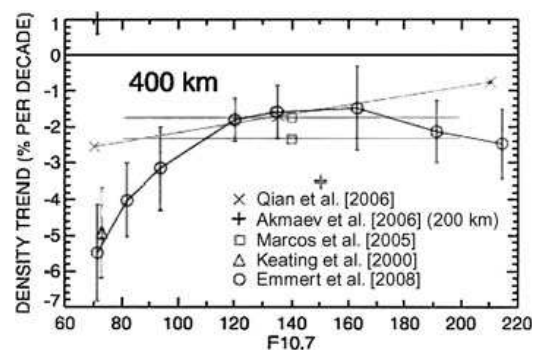


Рис. 1. Тренды плотности термосферы согласно измерениям по торможению спутников и модельным расчетам (из [1]).

Новым элементом явилось экспериментальное обнаружение роста количества CO₂ в термосфере (101 км), причем со скоростью 23.5 ± 6.3 pptv за десятилетие. Это на 10 pptv больше, чем предсказывается моделями. Этот факт вместе с описанным выше уменьшением плотности показывают, что термосфера охлаждается и сжимается быстрее, чем ожидалось.

Проблема настолько остра, что ставится вопрос о том, правилен ли механизм охлаждения за счет возбужденных молекул CO₂, который считался хорошо известным и являлся краеугольным камнем всех модельных оценок охлаждения за счет этих молекул. Как альтернатива рассматривается возможность уменьшения в термосфере количества атомов кислорода, которые должны замедлять охлаждение,

деактивируя часть возбужденных молекул CO_2 .

Одним из возможных механизмов уменьшения $[\text{O}]$ и увеличения $[\text{CO}_2]$ является усиление турбулентной диффузии в районе турбопаузы, где формируются граничные условия диффузионного распределения термосферных газов. Выше уже упоминалось, что наблюдается увеличение проникновения ВГВ до высот турбопаузы, что и может приводить к усилению турбулентности. Уместно заметить, что в ИПГ на основании анализа ионного состава области E и данных масс-спектрометрических измерений нейтрального состава указывалось на возможность усиления турбулентности в области турбопаузы.

Ионосферные наблюдения также указывают на более сильные тренды параметров области F, чем предсказывается моделями. В двух докладах автора данного отчета на основании анализа данных глобальной сети вертикального зондирования было показано, что тренды критической частоты foF2 в 1995-2010 г. составляют минус 0.02-0.04 МГц в год, а тренды высоты слоя F2 – минус 1.2-3.1 км в год. Пример изменения foF2 со временем для станции Боулдер по разным наборам исходных данных согласно одному из докладов автора [5] приведен на рис. 2. Близкие результаты были получены в докладах других авторов на основании наблюдений на отдельных станциях (Джикамарка, Томск и Уагодогу).

В докладе, основанном на данных некогерентного рассеяния на установке Миллстоун Хилл, были подтверждены результаты предыдущих публикаций и подчеркнута, что получаемые тренды ионной T_i и электронной T_e температуры значительно выше, чем ожидалось по моделям и соответствуют величинам, которые ожидаются по моделям при удвоении количества CO_2 в атмосфере в 2100 г. Так выше 200 км уже сейчас наблюдается уменьшение T_i на 45 К за 50 лет, тогда как модель NCAR дает охлаждение на 50 К для удвоения CO_2 .

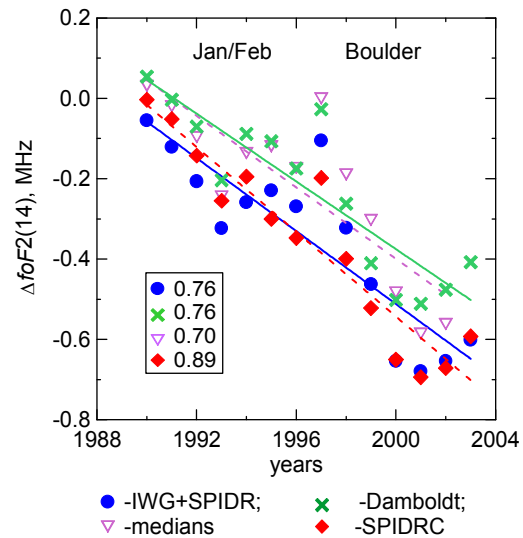


Рис. 2. Изменение критической частоты слоя F2 со временем согласно [5].

Специальный доклад Я. Ластовичка [6] был посвящен критике результатов недавней публикации Lean et al., в которой по данным измерений полного содержания электронов (TEC) был получен положительный тренд Ne в верхней части области F. Я. Ластовичка было показано, что полученный по TEC тренд противоречит как данным наземного вертикального зондирования, так и данным некогерентного рассеяния. Последнее дает значительные отрицательные тренды Ne в верхней области F. Объяснение полученных ошибочных трендов TEC лежит, видимо, в аномально низком максимуме солнечной активности в последнем солнечном цикле. Интенсивность ультрафиолетового излучения Солнца могла быть примерно на 15% ниже, чем в период предыдущего минимума. Анализ трендов TEC для трех европейских станций (Пругонице, Рим, Юлиусру) на основании данных вертикального зондирования не дал положительных трендов TEC, а дал нулевые, или слабые отрицательные тренды.

Резюмируя эту часть статьи, следует подчеркнуть, что концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы, сформулированная в 2008 г. группой западных ученых под руководством Я. Ластовички (Чехия), находит все новые подтверждения. В то же время, этот процесс идет в термосфере гораздо быстрее,

чем предсказывается даже самыми совершенными современными моделями, что заставляет пересматривать сами механизмы охлаждения, которые считались хорошо известными.

ГЕОИНЖЕНЕРИЯ

Следует особо выделить доклад Хоке Шмидта (Макс-Планк Институт, Германия) [7], посвященный «инженерному» изменению климата путем изменения солнечного излучения. Доклад важен, прежде всего потому, что показывает, насколько серьезно группы западных ученых озабочены изменением состояния всей атмосферы в целом климата из-за увеличения выбросов парниковых газов (прежде всего – CO_2).

В докладе рассматриваются различные сценарии увеличения выбросов CO_2 , опубликованные ВМО. В худшем из них выброс CO_2 в 2100 г достигнет 27 Гт (при выбросе в 2000 г в 8 Гт), в лучшем – опустится к уровню 1980 г. При этом отношение смеси CO_2 достигнет 900 ppmv (в 2000 г оно равнялось 375 ppmv), или опустится до 400 ppmv (см. рис. 3). Приповерхностная температура к 2100 г. возрастет на 5°C при худшем сценарии и на

2.5°C – при лучшем. Соответственно, возрастет и количество осадков на 0.2 и 0.1 мм в день. Температура на уровне 1 гПа (~ 50 км) при худшем сценарии уменьшится с 260 К в 2000 г. до 249 К в 2100 г.

Все это по мнению автора говорит о необходимости «инженерного» решения проблемы. Возможны два пути такого решения. Первый применяется уже сейчас и состоит в уменьшении выброса и удалении двуокиси углерода из атмосферы. Однако, этот путь пока не дает ощутимых результатов и, учитывая роль углеродосодержащего топлива в жизни человечества, не даст и в будущем.

Второй путь включает увеличение в атмосфере количества аэрозоля (скорее всего – сульфатного), который должен отражать существенную часть приходящей солнечной радиации назад в космос.

Создан специальный проект (The Geoengineering Model Incorporation Project“ (GeoMIP), в котором участвуют ученые Германии, Норвегии, Англии и Франции. Задачей проекта на данном этапе является моделирование различных механизмов реализации второго пути и оценка их эффективности, побочных эффектов и экономических аспектов.

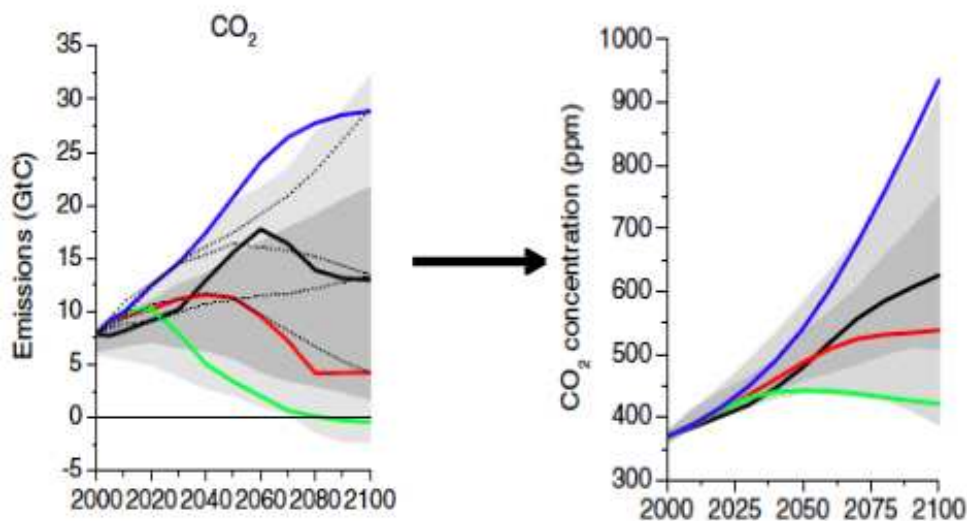


Рис. 3. Изменение количества выбросов CO_2 в атмосферу и соответствующее увеличение отношения смеси CO_2 по различным сценариям (согласно Schmidt [7]).

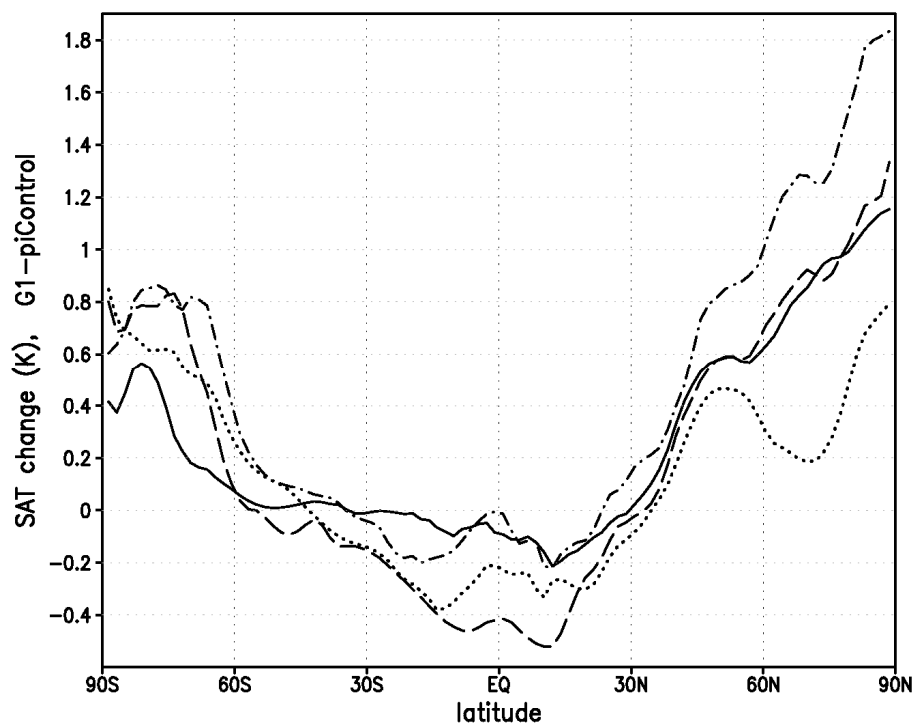


Рис. 4. Изменение приповерхностной температуры атмосферы на разных широтах согласно четырем использованным моделям при увеличении количества CO_2 в 4 раза и уменьшении солнечного излучения за счет выброса аэрозоля (согласно Schmidt [7]).

Все расчеты выполняются для четырех моделей системы атмосфера-океан. Эффективность всех моделей рассматривается в случае компенсации четырехкратного увеличения количества CO_2 по сравнению с доиндустриальным уровнем. Для компенсации нагрева атмосферы за счет такого увеличения CO_2 необходимо уменьшение полного потока солнечного излучения примерно (в зависимости от модели) на $48\text{--}64 \text{ Вт/м}^2$.

Согласно расчетам, приповерхностная температура при $4\times\text{CO}_2$ и применении метода 1 возрастет на 0.1 К (вместо 5.5 К), а количество осадков уменьшится на 0.14 мм в день (вместо роста на 0.25 мм в день). При этом изменение температуры будет различно в различных широтных зонах (см. рис. 4)

Подчеркивается, что метод 1 при его реализации для компенсации $4\times\text{CO}_2$ приведет и к негативным последствиям. Уменьшится глобальное количество осадков, уменьшится количество осадков над большими территориями суши (Северная Евразия, Северная Америка,

Центр Южной Америки), уменьшатся меридиональные градиенты температуры.

При реализации метода аэрозольных выбросов замедлится восстановление стратосферного озона. В приэкваториальных широтах $\text{N}(\text{O}_3)$ будет на $5\text{--}8 \%$ ниже доиндустриального уровня, а в области «Антарктической озонной дыры» может быть ниже на $10\text{--}15\%$.

Резюме этого доклада гласит, что неясных проблем еще очень много, но ситуация развивается так, что, если в некий момент мы не проведем инженерное воздействие на климат, могут произойти быстрые и суровые изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически все доклады Симпозиума в той, или иной мере были посвящены подтверждению концепции охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения количества парниковых газов.

Характерно, что согласно большинству экспериментальных данных этот процесс идет гораздо быстрее, чем ожидалось в 90-е годы и чем дают современные модели. Особенно остро стоит проблема высоких трендов температуры и плотности термосферы, а также параметров ионосферного слоя F2.

Следующий (8-й) Симпозиум планируется провести в Кембридже (Англия) в 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lastovicka J., Solomon S. C., Qian L. Trends in the Neutral and Ionized Upper Atmosphere. Space Sci. Rev. V. 116. P. 113-145. 2012.
2. Emmert J. T. Thermospheric density climate and climate change. Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).
3. Qian L., Solomon S.C., Nossal S. Impact of middle atmosphere trace gas trends on the thermosphere. Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).
4. Solomon S. C., Qian L., Roble R. G., Mlynchak M. G. On the discrepancy between observations and models of thermospheric climate change. Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).
5. Danilov A. D. Trends in the F2-layer parameters at the end of the 1990s and the beginning of the 2000s. Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).
6. Lastovicka J. Are trends in TEC really positive? Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).
7. Schmidt H. Engineering the climate via solar radiation managements. Effects and side effects. Paper presented at the 7th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos Aires, 11-14 September, 2012).