



10-Й СИМПОЗИУМ ПО ТРЕНДАМ В АТМОСФЕРЕ

А. Д. Данилов

Кратко описаны наиболее интересные результаты, обсуждавшиеся на 10-м Симпозиуме «Долговременные изменения и тренды в атмосфере» (Хефэй, КНР, 14–18 мая 2018 г.). Подчеркивается, что концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения в атмосферном газе количества CO_2 полностью принята и подтверждается все новыми наборами экспериментальных данных. В средней атмосфере (стратосфера и мезосфера) картина охлаждения атмосферы в целом уже достаточно ясна и идет исследование локальных эффектов. Что же касается термосферы и ионосферы, то здесь имеется ряд проблем. Прежде всего, это – высокие температуры ионов по данным некогерентного рассеяния. Они не согласуются с данными о трендах плотности и их трудно объяснить в рамках даже самых совершенных теоретических моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

1. ВВЕДЕНИЕ

10-й Симпозиум по трендам и долговременным изменениям в атмосфере проходил с 14 по 18 мая в городе Хефэй (КНР). Он, как и предыдущие симпозиумы спонсировался несколькими международными научными организациями, включая Международную Ассоциацию Геомagnetизма и аэрoномии (MAGA), Международную Ассоциацию Метеорологии и Атмосферных Наук (IAMAS), Международный Союз Геодезии и Геофизики (IUGG), Международный Комитет по Солнечно-Земной Физике (SCOSTEP) и рядом других.

Всего на Симпозиуме было представлено около 110 докладов. Поскольку КНР была хозяином мероприятия, около 80% докладов были сделаны китайскими учеными или от имени групп авторов, включающих китайских ученых. Всего доклады были сделаны с участием китайских ученых, представляющих 20 научных организаций Китая. Этот факт, а также общая направленность докладов говорит о том, что китайские ученые очень серьезно рассматривают проблему охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы и проводят и планируют в дальнейшем ее серьезное изучение.

Указанная проблема была в окончательной форме сформулирована в виде научной концепции группой ученых в 2008 г. С тех пор на последующих симпозиумах данной серии эта концепция получала все новые экспериментальные подтверждения. Ход этого процесса можно проследить по отчетам автора данного отчета о командировках на 7, 8 и 9 симпозиумы в 2012, 2014 и 2016 гг., а также по соответствующим статьям в данном журнале.

В настоящее время эта концепция является общепринятой и идет уточнение различных деталей (сезонный и суточный ход трендов различных параметров, влияние на различные тренды солнечной активности и т. д.).

Чтобы облегчить восприятие статьи, я не буду давать ссылок на конкретных авторов и доклады (тем более, что многие проблемы обсуждались в нескольких докладах), а постараюсь дать по возможности сжатое описание основных результатов. Рисунки будут представлены в их оригинальном виде без перевода надписей в поле рисунка, или вдоль осей. Там, где это необходимо, рисунки будут сопровождаться соответствующими пояснениями в тексте.

2. СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА

Несколько докладов было посвящено проблеме трендов солнечной и геомагнитной активности. Лейтмотив этих докладов – солнечная и геомагнитная активность в течение последних солнечных циклов уменьшается. Характерный пример приведен на рис. 1.

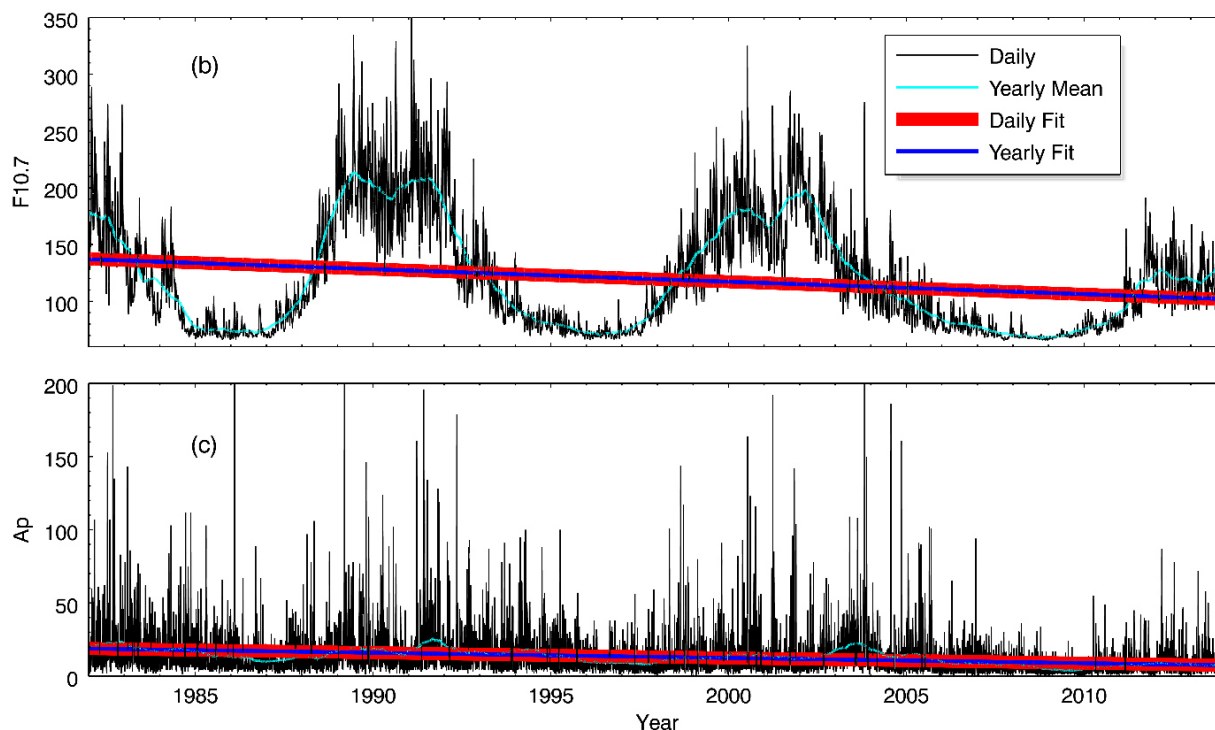


Рис. 1. Изменение индекса солнечной активности $F10.7$ и индекса геомагнитной активности A_p в течение предыдущих десятилетий.

Согласно этому рисунку с 1980 г. произошло уменьшение солнечного индекса $F10.7$ на 8% за десятилетие и индекса геомагнитной активности A_p на 20% за десятилетие.

Однако наличие трендов солнечной и геомагнитной активности не объясняет наблюдаемых трендов параметров средней и верхней атмосферы, т. к. все исследователи старательно удаляют зависимость от обоих внешних параметров прежде, чем сформировать ряды однородных данных, используемых для нахождения трендов.

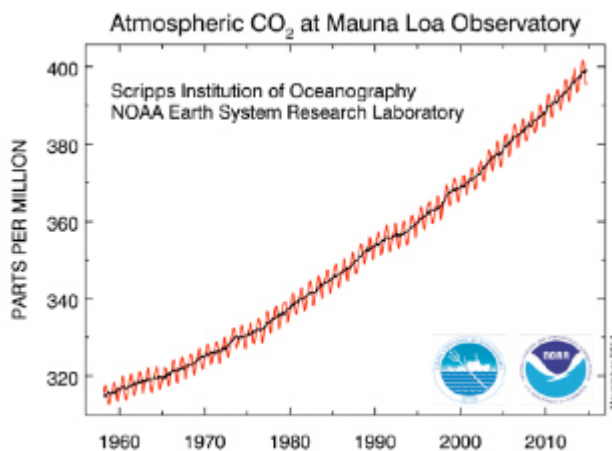


Рис. 2. Изменение количества CO₂ в приземной атмосфере.

Продолжается монотонное увеличение количества двуокиси углерода в атмосфере. На рисунке 2 приведено изменение количества CO_2 в единицах ppm (частиц на миллион) согласно измерениям на ст. Мауна Лоа (США). Рост CO_2 составляет 2 ppm в год. В настоящее время превышение над доиндустриальным уровнем (1980 г.) составляет чуть менее 30%.

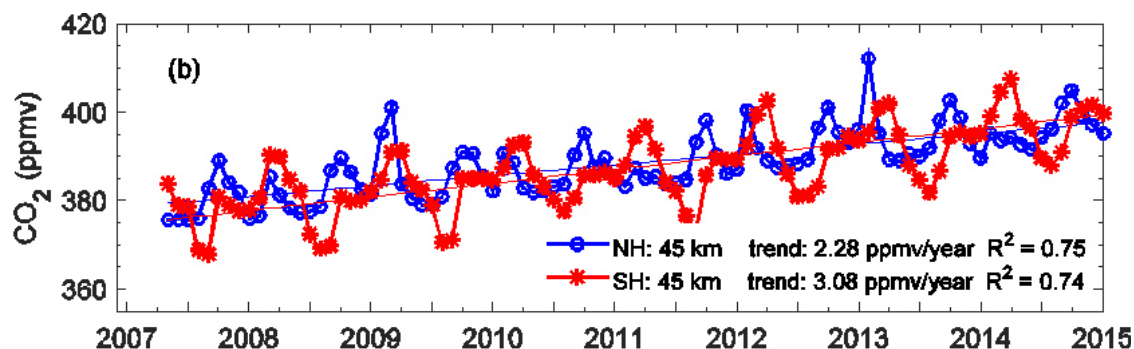


Рис 3. Изменение количества CO_2 в течение последнего десятилетия согласно измерениям аппаратурой «SOFIE» на высоте 45 км.

Дистанционными методами также ведутся регулярные наблюдения за ростом количества CO_2 на различных высотах в стратосфере и мезосфере. На рисунке 3 приведено изменение количества двуокиси углерода со временем на высоте 45 км по измерениям аппаратурой «SOFIE» на спутнике AIM. Видно, что в северном полушарии тренд на 45 км близок к тренду, получаемому на ст. Мауна Лоа, тогда как в южном полушарии этот тренд заметно выше – около 3 ppm в год.

Тренды CO_2 в ppm за десятилетие для верхней части MLT области согласно измерениям аппаратурой «SABER» на спутнике TIMED приведены в табл. 1. Авторы специально подчеркивают, что из данных убраны эффекты солнечной активности и квази-двухлетних осцилляций (QBO).

Таблица 1

Высота, км	80	90	100	110
Тренд	20.6±3.0	19.5±4.5	19.9±5.5	12.8±3.7

Измерения трендов CO_2 на высотах стратосферы и мезосферы важны для контроля трендов, получаемых по наземным измерениям. Измерять небольшие изменения газовых примесей в приземной загрязненной атмосфере трудно и даже эталонные измерения на ст. Мауна Лоа нуждаются в проверке. Измерения дистанционными методами на различных высотах в средней атмосфере являются такой проверкой и дают хорошее согласие с наземными наблюдениями.

В начале исследования трендов в средней атмосфере выводы о трендах базировались на измерениях температуры T в небольшом количестве пунктов. Результаты этих измерений позволяли говорить лишь о глобально усредненных (или, в лучшем случае – средне зональных) трендах. В настоящее время измерения трендов в мезосфере и нижней термосфере ведутся несколькими методами (лидары, различные радары, наблюдения атмосферных эмиссий, дистанционные измерения со спутников). Это утверждение иллюстрирует рис. 4, где показано распределение пунктов измерений параметров области MLT (мезосфера и нижняя термосфера).

Эти измерения подтвердили выводы, сделанные ранее (за исключением трендов на мезопаузе, см. ниже) о том, что в среднем тренды T в стратосфере и мезосфере составляют минус 3-4 К за десятилетие.

В настоящее время в средней атмосфере в основном идет уточнение эффектов – поиск суточных, сезонных и локальных вариаций трендов различных параметров. Выяснилось, что тренды температуры зависят от места наблюдения.

На рисунке 5 представлены профили трендов T в стратосфере и мезосфере. Обращает на себя внимание тот факт, что даже в двух пунктах, расположенных в Индии (гора Абу, красная кривая) и Гаданки (синяя кривая), профили трендов отличаются друг от друга.

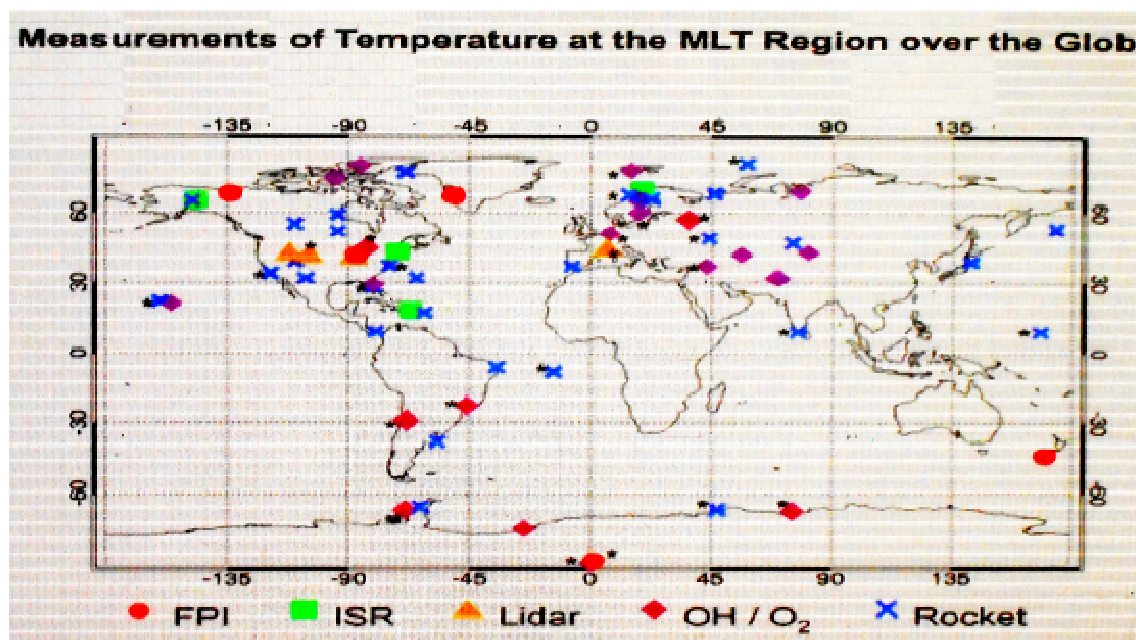


Рис. 4. Распределение по земному шару пунктов наблюдения параметров MLT области.

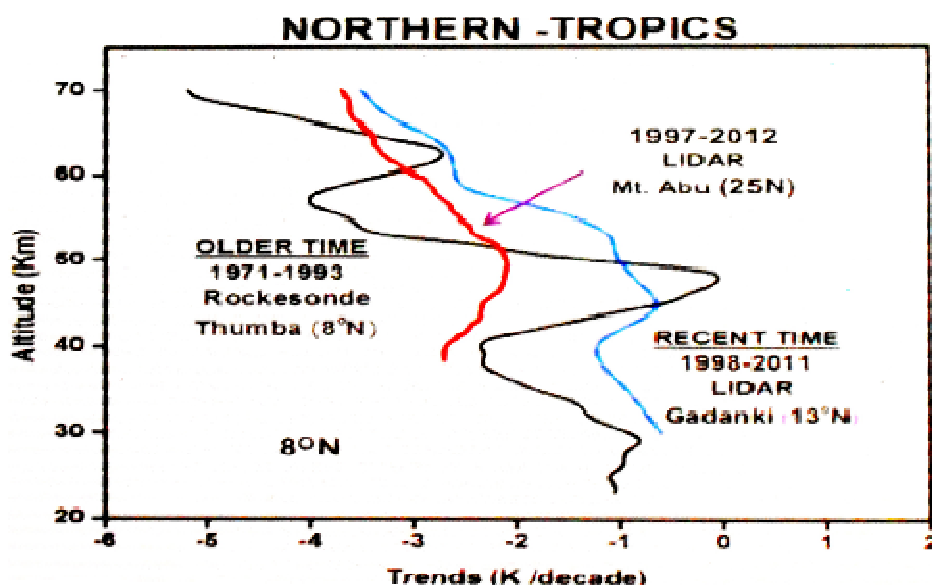


Рис. 5. Вертикальные профили трендов температуры в стратосфере и мезосфере.

Рисунок 6 призван проиллюстрировать то же утверждение на основании данных, полученных аппаратурой «SABER» (темные кривые) и наземными наблюдениями (красные кривые) в трех долготных зонах экваториальной области: Бразилия (левый рисунок), Африка (средний рисунок) и Индия (правый рисунок). Видно, что высотные профили трендов T во всех трех случаях различаются, но общая тенденция охлаждения средней атмосферы на 2–4 К за десятилетие сохраняется.

Новым явился вывод о том, что на мезопаузе наблюдаются значительные отрицательные тренды температуры ~3–4 К за десятилетие. Еще относительно недавно считалось, что тренд на мезопаузе равен нулю, хотя выше и ниже этой формации наблюдаются отрицательные тренды T . Однако сейчас картина выглядит так, как показано на рис. 7. Большинство измерений дают на мезопаузе отрицательные тренды, равные 3–4 К за десятилетие. Точная причина изменения ситуации не ясна, но высказываются предположения, что она связана с восстановлением количества озона в области MLT.

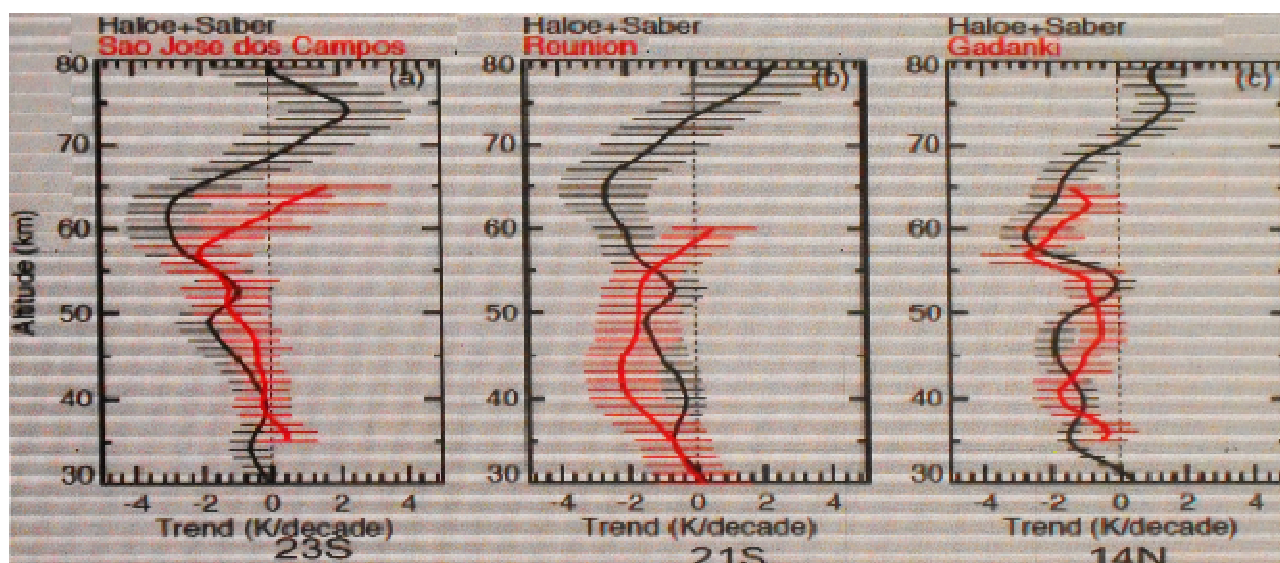
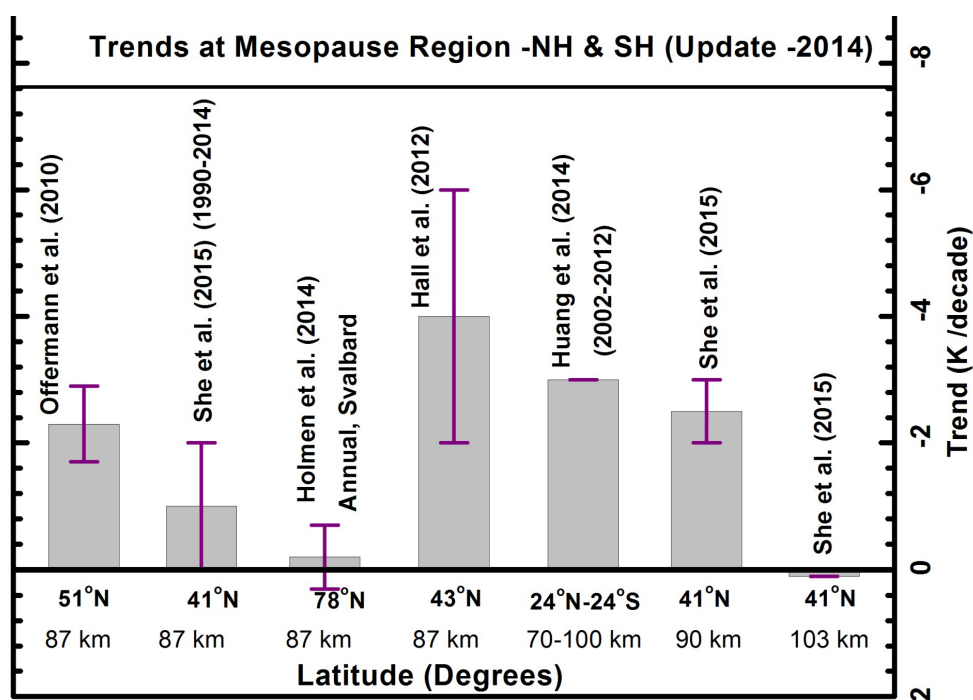
Рис. 6. Высотные профили тренда T в различных долготных зонах.

Рис. 7. Тренды температуры на мезопаузе.

Обнаружено, что существуют две мезопаузы – высокая (~102 км) и низкая (~86 км). Обе мезопаузы охлаждаются одинаково, но высокая мезопауза опускается примерно на 450 м за десятилетие, тогда как у нижней мезопаузы тренд высоты отсутствует.

Поскольку уменьшается температура мезосферы, должна в соответствии с барометрическим законом уменьшаться и её плотность. По данным метеорных радаров в Beijing и Mohe (Китай) высота сгорания метеоров систематически уменьшается (на 56.2 м в год и 65.8 м в год, соответственно), что иллюстрирует рис. 8. Это подтверждает отрицательные тренды (уменьшение) плотности атмосферы на высотах около 90 км, поскольку метеоры сгорают в атмосфере достигнув определенной плотности атмосферного газа.

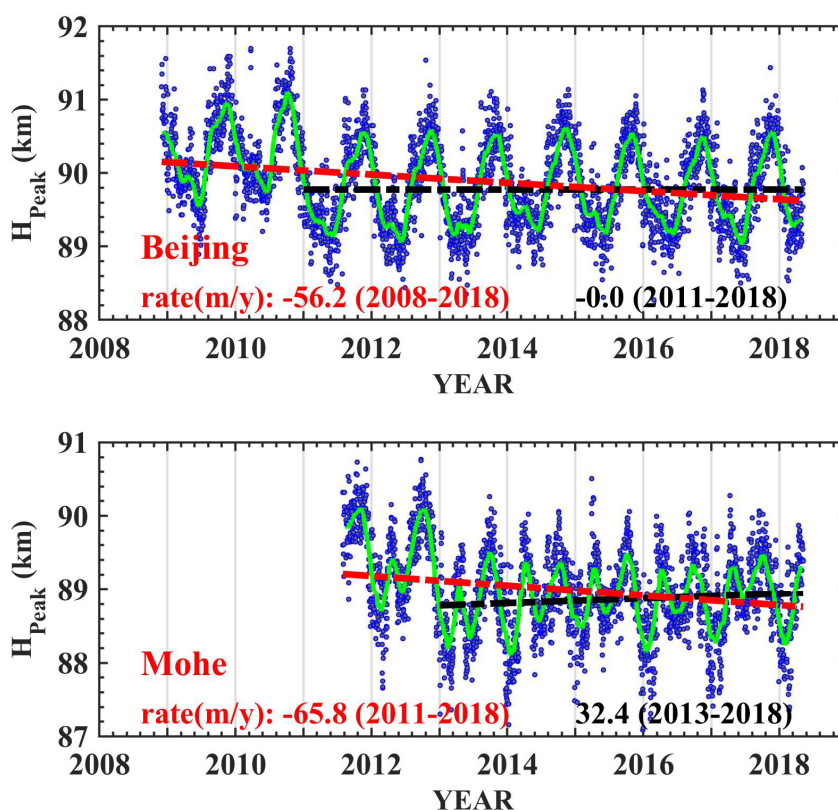


Рис. 8. Высота сгорания метеоров по наблюдениям в Beijing и Mohe.

Продолжаются исследования изменений в слое озона. Как известно, в 80-е и 90-е годы общее количество озона (ТОС) уменьшалось из-за его разрушения галогено-содержащими соединениями (галонами). В результате Монреальского Протокола выброс озono-разрушающих галонoв резко уменьшился и с 1997 г. началось восстановление ТОС. Однако, это восстановление идет медленнее (1-2% за десятилетие), чем его разрушение до 1997 г. Это связано с тем, что озono-разрушающие галоны медленно вымываются из стратосферы. На сегодня количество галонoв все еще лишь на 15-20% меньше, чем их наибольшее количество в 1997 г. Сказанное иллюстрирует рис. 9, где показано изменение со временем количества эквивалентного эффективного стратосферного хлора (EESC) и изменение общего количества озона. Как видно из этого рисунка, восстановления ТОС до уровня 1980 г. можно ожидать лишь к 60-м годам нашего столетия.

На рисунке 10 приведены тренды озона на различных широтах и высотах. Видно, что восстановление O_3 идет неравномерно в различных широтных зонах. Наибольшие положительные тренды (восстановление) озона наблюдаются в средних широтах северного полушария на высотах 35-50 км (до 5% за десятилетие), тогда как в области экватора и в нижней стратосфере эти тренды малы, или даже отрицательны.

На рисунке 11 представлены высотные профили трендов озона согласно измерениям (черные кривые) и моделям (синие кривые) до 1997 г. (падение O_3) и после 1997 г. (восстановление O_3). Видно, что наиболее интенсивно идет восстановление O_3 на высотах 30-50 км и составляет в среднем (1.5-2.0)% за десятилетие.

Неожиданные результаты получены касательно циркумполярного вихря в северном полушарии. Обнаружено, что он увеличивается (площадь, покрываемая им растет) и смещается в сторону Восточной Европы и России. Поскольку стабильны и мощный циркумполярный вихрь в южном полушарии является основной причиной так называемой "озонной дыры" над Антарктикой, следует ожидать появления значительных уменьшений общего количества озона (ТОС) и в указанных регионах северного полушария. Смещающийся циркумполярный вихрь несет в более низкие широты воздух, не только обедненный озоном, но и обогащенный озono-разрушающими соединениями, что должно усиливать уменьшение ТОС. Изменение площади той части вихря, которая находится над Евразией приведено на рис. 12.

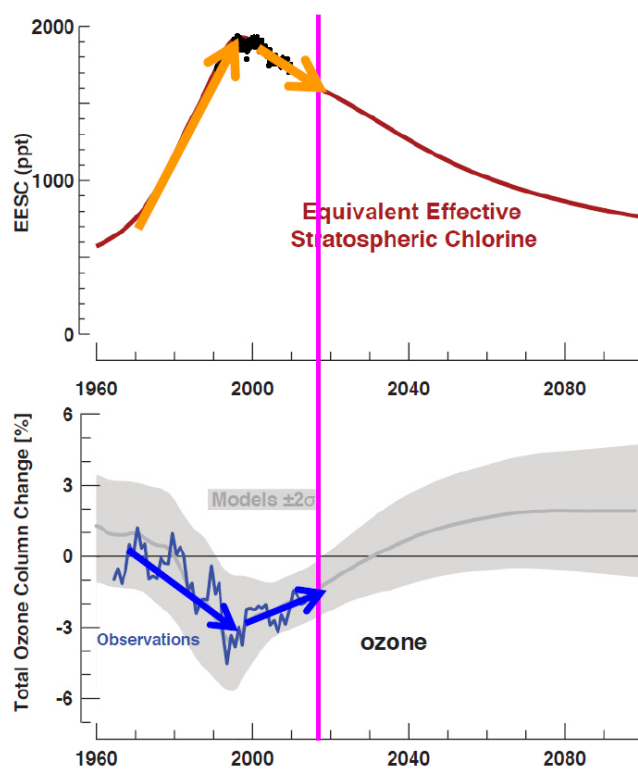


Рис. 9. Изменение со временем озono-разрушающих галонов и общего количества озона.

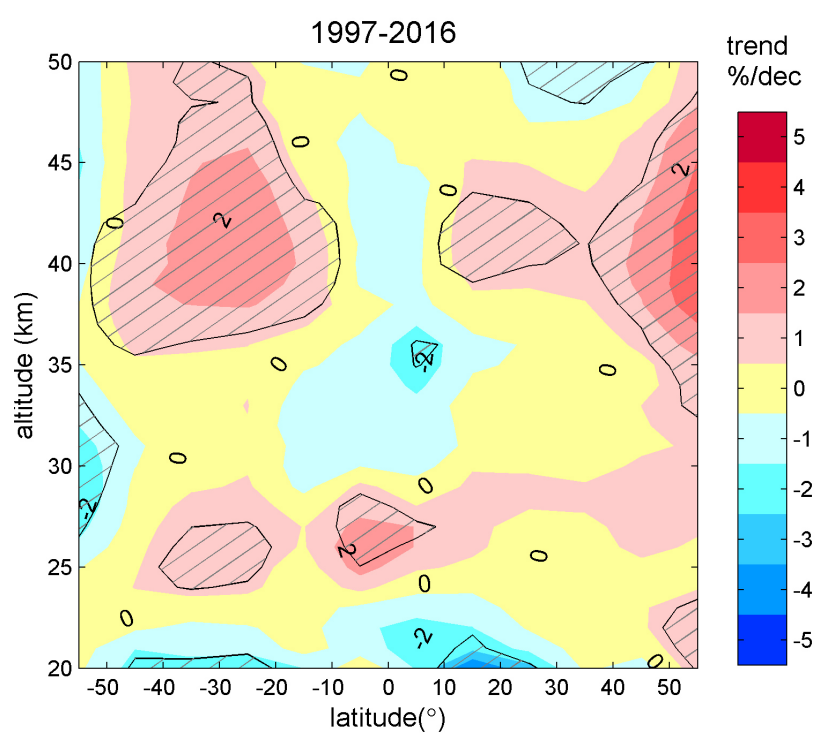


Рис. 10. Высотно-широтный разрез трендов озона.

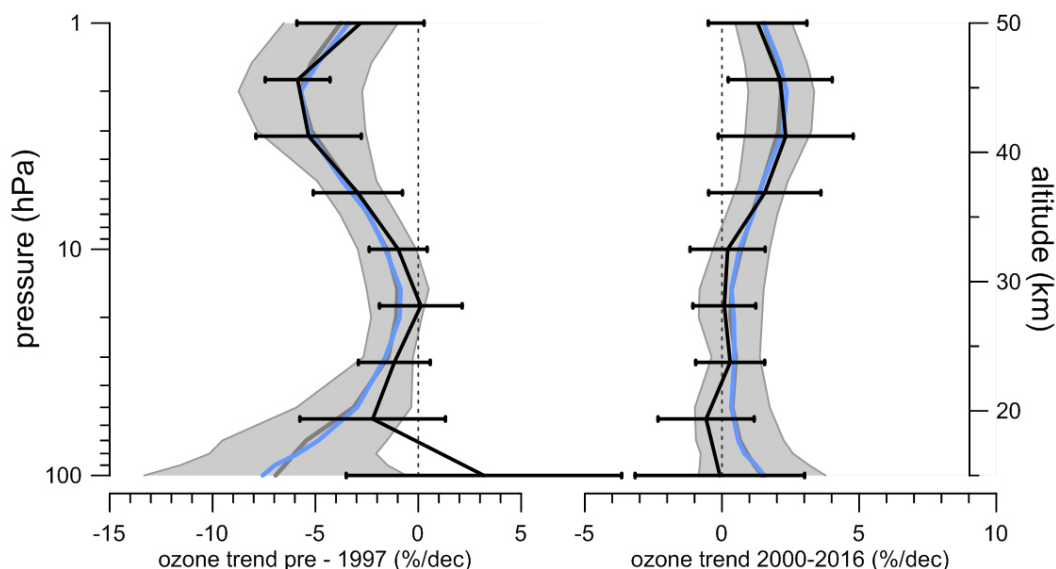


Рис. 11. Высотные профили трендов озона до 1997 г. и после 1997 г.

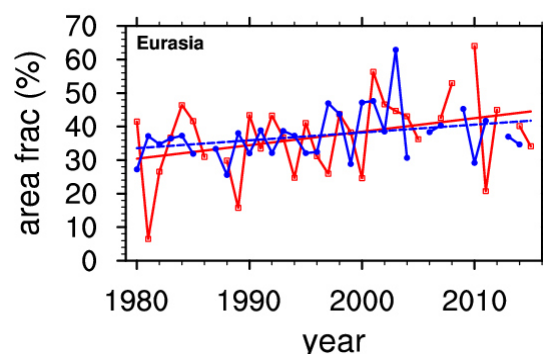


Рис. 12. Изменение со временем площади полярного стратосферного вихря над Евразией (синяя линия – три зимних месяца, красная линия – февраль).

Уже сейчас говорят об американо-европейском диполе: положительные аномалии ТОС в американском долготном секторе и отрицательные аномалии в евразийском долготном секторе. Причина происходящего связана с глобальным потеплением. Соотношение площади открытой воды и льда в Баренцевом и Карском морях изменяется за счет таяния льда в сторону увеличения площади открытой воды. Это и приводит к изменению условий формирования циркумполярного вихря и его смещению в сторону Евразии.

Долгое время существовали противоречия в данных частоты появления трех явлений: серебристых облаков (NLC), полярных мезосферных облаков (PMC) и полярных мезосферных летних эхо (PMSE), наблюдаемых как с земли, так и со спутников, на высоте 82-83 км. Вопрос о том, увеличивается ли частота появления этих явлений, и является ли это подтверждением отрицательных трендов температуры в верхней мезосфере, являлся предметом дискуссий. На предыдущем симпозиуме было показано, что все три явления представляют собой разные проявления одного и того же процесса. На данном симпозиуме был подведен итог большой программы изучения NLC, проводившейся в Институте Физики Атмосферы (Кулунсборн, Германия). Получен ряд надежных новых результатов, касающихся NLC. Во-первых, частота появления NLC существенно растет. Вероятность наблюдения NLC по сравнению с доиндустриальным периодом (в качестве границы обычно принимается 1980 г.) выросла в 10 раз (!).

При этом растет не яркость облаков, как считалось до этого, а именно частота их возникновения. Более того, оказалось, что основной причиной трендов NLC является не охлаждение окружающего газа, а увеличение в этом газе количества паров воды. Охлаждение газа понижает высоту серебристых облаков, но мало влияет на их яркость. Увеличение количества ледяных

кристаллов, образующих облака, а следовательно, и их яркости, происходит из-за увеличения количества H_2O . Последнее вызвано увеличением в атмосфере наряду с CO_2 также и количества метана, который при диссоциации солнечным излучением дает атомы водорода, формирующие пары воды. Обнаружению положительных трендов паров воды в стратосфере и мезосфере было посвящено несколько докладов. В частности, было показано, что на высотах 30–50 км количество паров воды растет на 3% за десятилетие.

Не удастся получить ясной картины долговременных трендов ветра в стратосфере и мезосфере. Это связано как с техническими трудностями измерений ветра, так и с сильной его изменчивостью. И зональная и меридиональная компоненты ветра демонстрируют долготную зависимость, а иногда носят и региональный характер.

Однако в целом складывается впечатление, что зональный ветер в стратосфере и нижней мезосфере становится более благоприятным для проникновения внутренних гравитационных волн (ВГВ) из тропосферы в верхнюю мезосферу и нижнюю термосферу. Это объясняет усиление гравитационных волн во всей средней атмосфере, которое отмечалось в нескольких докладах. В частности, экспериментально обнаружен рост количества ВГВ на высотах 35–60 км на 12–15% за десятилетие.

Последнее обстоятельство очень важно, поскольку диссипация энергии ВГВ в области турбопаузы (около 120 км) способствует формированию турбулентности в этой области. Усиление проникновения ВГВ до высот турбопаузы является, таким образом, видимо, причиной усиления турбулентности и, соответственно, вертикального переноса газов, которое требуется в ряде моделей.

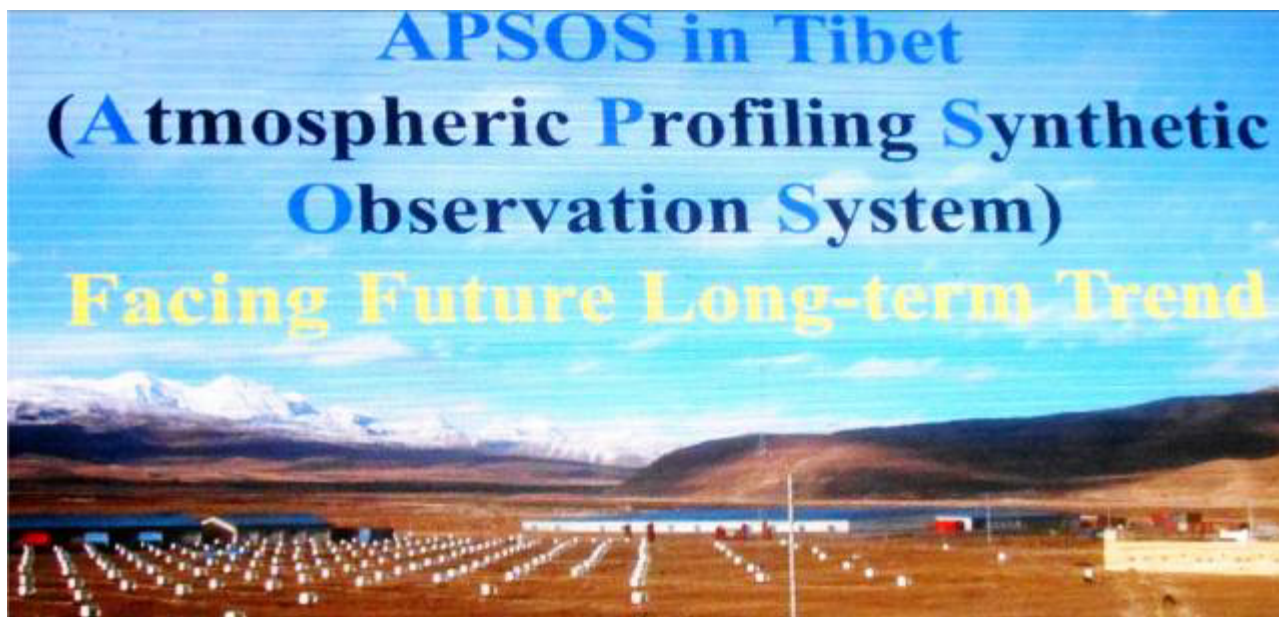


Рис. 13. Заставка к докладу про обсерваторию на Тибете.

В КНР разработан и уже реализуется проект APSOS (Atmospheric Profiling Synthetic Observational System). Он состоит в создании на плато в Тибете на высоте 4300 м комплексной обсерватории для измерения параметров средней и верхней атмосферы. Обсерватории на такой высоте автору данной статьи не известны. Там будет установлено несколько радаров на различных частотах (MST, метеорные радары), несколько лидаров, спектрометры для измерения атмосферных эмиссий и другая аппаратура. Атмосферные условия (за счет удаленности от промышленных центров и высоты над уровнем моря) крайне благоприятны для прецизионных наблюдений. Одной из задач проекта является получение данных для калибровки спутниковых данных, получаемых дистанционными методами. Часть аппаратуры уже установлена и результаты наблюдений были представлены на Симпозиуме. Основная глобальная цель этой гигантской и дорогостоящей работы провозглашена как "Быть готовыми встретить будущие долговременные тренды" (см. заставку к докладу про APSOS на рис. 13).

3. ТЕРМОСФЕРА И ИОНОСФЕРА

Сложилась странная ситуация с проблемой, о которой много говорили на предыдущем симпозиуме. На рисунке 14, который приводился и в 2016 г. приведено изменение тренда количества CO_2 с высотой по измерениям аппаратурой FTS на спутнике ACE и аппаратурой SABER на спутнике TIMED, а также модельное изменение этого тренда (красные кривые). Рисунки наглядно показывают, что на высотах 80–110 км измерения на двух спутниках дают большие тренды CO_2 , чем должно быть в условиях диффузионного равновесия (модель).

Результат вызвал горячую дискуссию и на 9-м Симпозиуме и после него, поскольку, если этот результат правилен, он означает что на указанных высотах в ходе оседания и охлаждения атмосферы происходят какие-то пока неизвестные нам процессы.

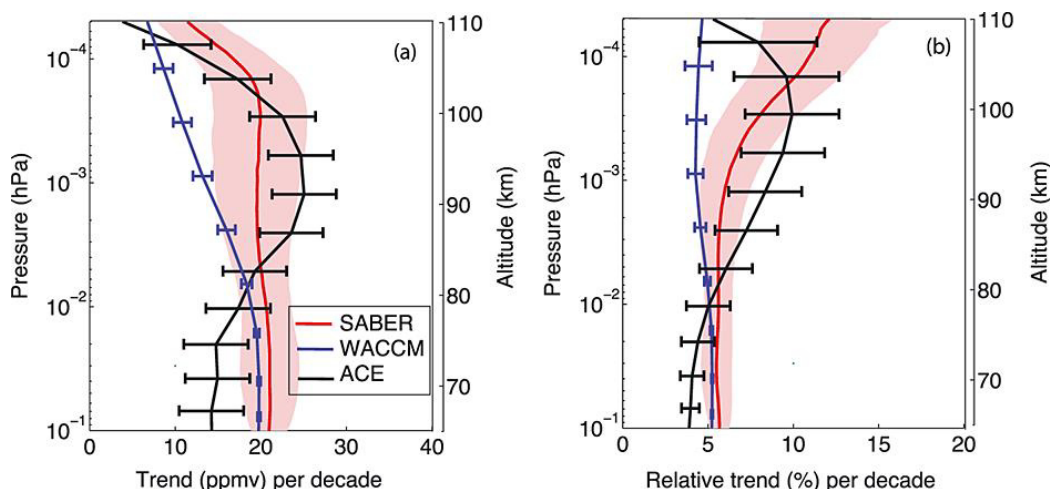


Рис. 14. Высотные профили трендов CO_2 по измерениям на двух спутниках и согласно модели WACCM.

На рассматриваемом симпозиуме специалистами по моделированию было заявлено, что результаты измерений аппаратурой SABER были взяты неправильно – без учета суточных вариаций. При «правильном» учете этих вариаций данные SABER согласуются с модельным профилем тренда.

Однако, не все специалисты согласились с этим утверждением. В одном из докладов был представлен рис. 15. Он показывает высотное распределение количества CO_2 согласно измерениям (сплошные кривые) аппаратурой SABER (синяя) и FPS (красная) и модельные распределения (штриховые кривые) для условий обоих экспериментов.

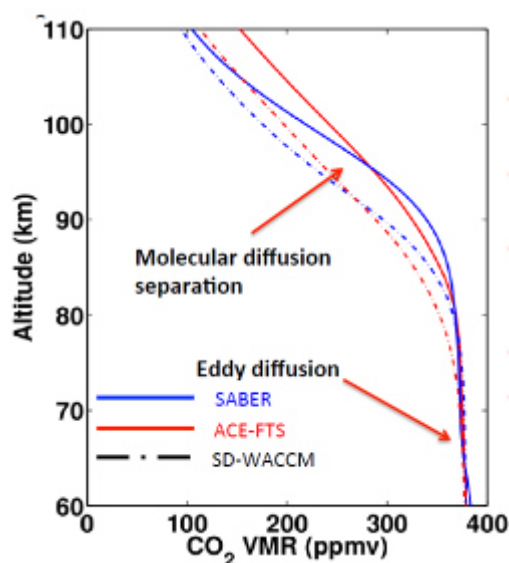


Рис. 15. Распределения количества CO_2 согласно измерениям и модели WACCM.

Как видно из рисунка, в том же интервале 80–110 км измерения дают более высокие величины

концентрации CO_2 , чем модель. Этот факт, а также то, что скорректированы только данные SABER, а данные FTS должны остаться на рис. 13 без изменения, заставляет думать, что рис. 13 все-таки правилен, и расхождение в трендах CO_2 между измерениями и моделью существуют.

Рисунок 16 также приводился на 9-м Симпозиуме. Он показывает изменение тренда плотности атмосферы на высоте 400 км с индексом солнечной активности, полученное на основании анализа эволюции орбит спутников четырьмя группами исследователей. Видно, что указанные тренды отрицательны и их магнитуда сильно уменьшается от условий высокой активности ($\sim 2\%$ за десятилетие) до минимума СА ($\sim 6\text{--}7\%$ за десятилетие). Две красные кривые показывают результаты расчетов по модели WACCM. Расчеты Qian et al. не могут дать самые низкие значения тренда в минимуме СА. Расчеты Solomon et al. могли дать необходимые величины тренда в минимуме при искусственном изменении константы скорости одной из реакций, участвующих в цикле процессов охлаждения атмосферного газа за счет CO_2 . Однако на данном симпозиуме Solomon et al. признали, что изменение константы не подтверждается лабораторными измерениями и дали величины тренда согласно новой версии модели WACCM-X, помеченные звездами. Таким образом, отрицательные тренды плотности атмосферы порядка $6\text{--}8\%$ при низкой СА остаются не объясненными.

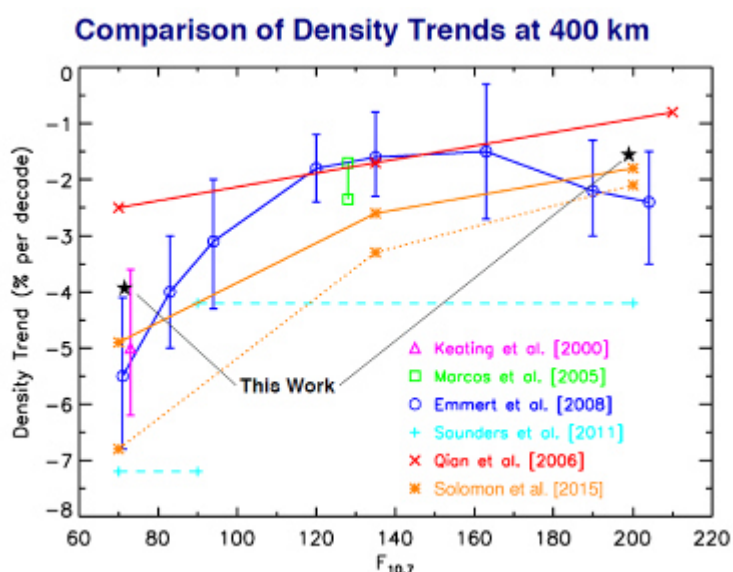


Рис. 16. Изменение трендов плотности атмосферы с индексом солнечной активности.

Большинство экспериментальных результатов в представленных на симпозиуме докладах сравнивалось с наиболее совершенной на сегодняшний день моделью WACCM-X, разработанной в Национальном Центре Атмосферных Исследований (NCAR) в США. Эта модель очень хорошо воспроизводит большинство экспериментально определенных трендов параметров атмосферы, их высотное и широтное распределение и другие особенности. Однако, как показано выше, эта модель не может объяснить самые низкие значения трендов плотности атмосферы на высотах около 400 км, полученных на основании анализа данных об изменении орбит искусственных спутников для условий низкой солнечной активности (индекс СА $F_{10.7}$ порядка 70).

Неоднократно делались попытки выделить долговременные тренды общего содержания электронов (ТЕС). Однако все они встречают трудности из-за того, что при измерениях ТЕС излучающий радиоволны спутник непрерывно перемещается, изменяя широту, долготу и местное время, а потому получение рядов однородных данных, необходимых для нахождения трендов, представляется практически невыполнимой задачей. Рисунок 17 показывает, как сильно изменяются величины ТЕС во времени и пространстве.

Положительные тренды ТЕС, опубликованные несколько лет назад, признаны ошибочными. В настоящее время установлено только, что тренды ТЕС отрицательны (что согласуется с трендами параметров ионосферного слоя $F2$ по данным вертикального зондирования и с трендами «приведенной толщины» ионосферы (см. ниже)). В одном из докладов приводится тренд ТЕС, равный $-19.3\% \pm 1\%$ между двумя соседними минимумами солнечной активности. Однако, вопрос о магнитуде трендов ТЕС и их зависимости от географических координат остается открытым.

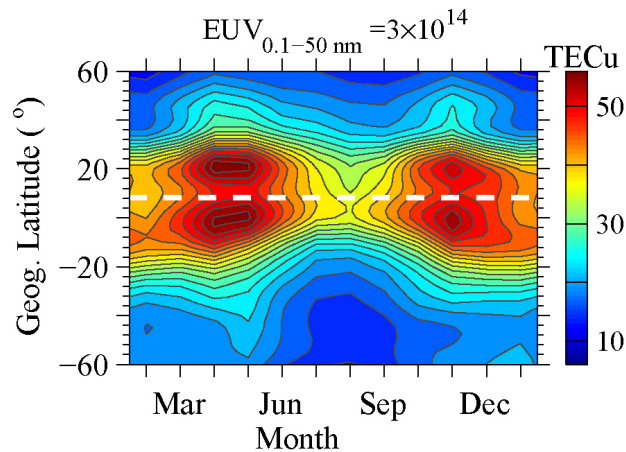
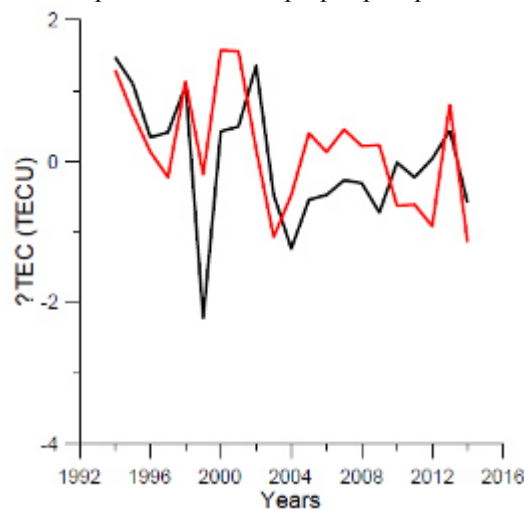


Рис. 17. Широтно-сезонный разрез распределения ТЕС.

Рис. 18. Изменение величины ΔTEC со временем.

На рисунке 18 приведен результат одной из попыток выделить долговременные тренды ТЕС. Использовались два индекса солнечной активности – классический $F10.7$ (черная кривая) и интенсивности линии MgII (красная кривая). Видно, что есть тенденция уменьшения ТЕС со временем, но говорить о надежных трендах не приходится.

Для четырех ионосферных станций Европейского региона на основании данных вертикального зондирования рассчитана «приведенная толщина» (slab thickness) ионосферы и определены ее тренды (см. рис. 19). Для всех четырех станций получены отрицательные тренды, лежащие в пределах от 3 до 5 км в год. Этот результат важен потому, что он согласуется с отрицательными трендами критической частоты f_oF2 и с упомянутыми выше оценками отрицательных трендов ТЕС.

Получены новые подтверждения положительных трендов N_e в самой нижней части ионосферы (область D). Измерения высоты отражения радиоволн СДВ диапазона (24.0 КГц) показали, что с 1971 по 2016 г. эта высота уменьшилась на 3 км. В ДВ диапазоне получено уменьшение высоты отражения на 114 м за десятилетие. В силу специфики высотного профиля электронной концентрации в нижней части области D указанные факты означают, что на фиксированных высотах величина N_e растет.

Впервые (насколько известно автору данной статьи) были представлены данные о трендах электронной концентрации в области F по данным некогерентного рассеяния (НР). Согласно этим данным тренд N_e в максимуме слоя $F2$ ($NmF2$) составляет 5% за десятилетие. Эта величина в пересчете на тренды f_oF2 ($NmF2 \sim (f_oF2)^2$) в пределах фактора 1.5 согласуется с трендами, полученными в ФГБУ «ИППГ» на основании анализа данных сети станций вертикального зондирования ионосферы и на порядок превышает очень малые тренды f_oF2 , полученные рядом других авторов.

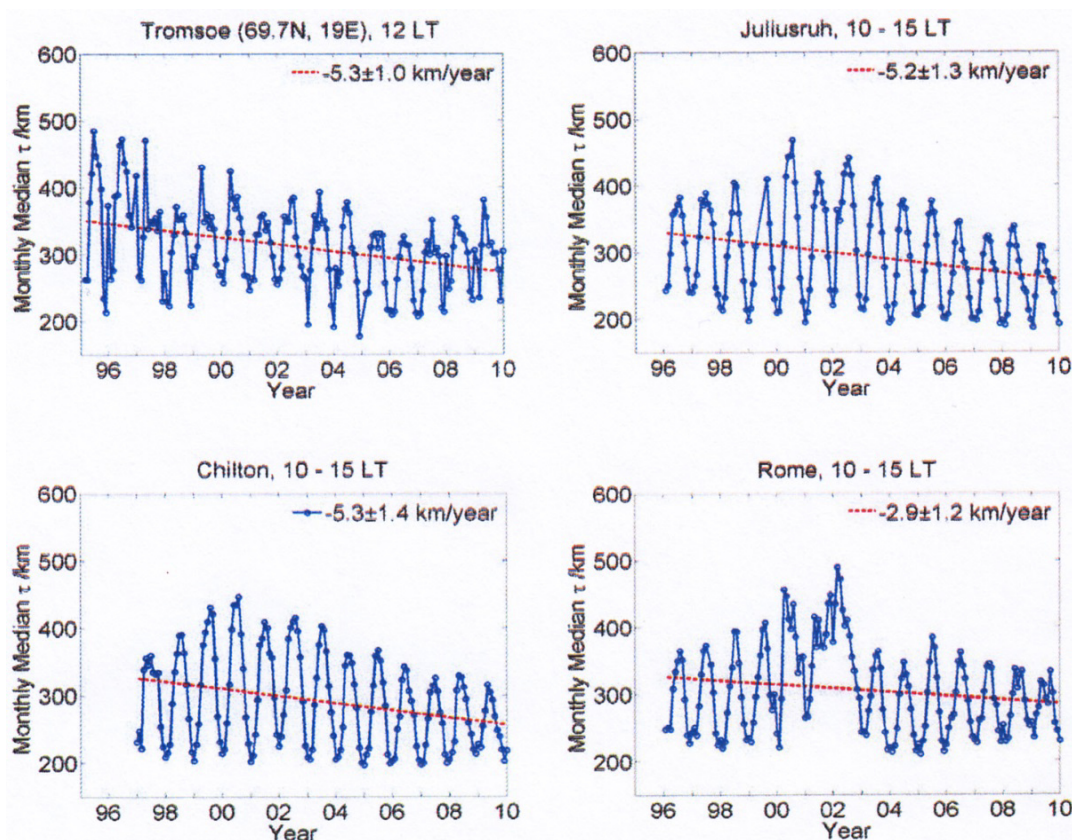


Рис. 19. Изменение со временем приведенной толщины ионосферы.

Серьезные противоречия возникли в вопросе о ионной температуре T_i в ионосфере выше 120 км. На прошлом (9-м Симпозиуме) были представлены результаты измерений T_i на нескольких установках некогерентного рассеяния (НР). Все установки дают сильные (15-30 К за десятилетие) отрицательные тренды T_i выше примерно 220 км и сильные (20-30 К за десятилетие) положительные тренды T_i в области $F1$ (160-180 км).

Все сказанное выше иллюстрирует рис. 20. Обращают на себя некоторые важные детали этого рисунка. Во-первых, в области максимума слоя $F2$ (порядка 300 км) все четыре установки дают высокие тренды T_i порядка 2-4 К в год. Во-вторых, выше 350 км высотный ход кривых резко различается. Согласно данным ст. St. Santin и Poker Flat абсолютная величина отрицательных трендов T_i продолжает расти с высотой и достигает 8 К в год на высотах 420-270 км. В то же время, согласно данным ст. Millstone Hill тренд T_i выше 300 км остается почти постоянным, а согласно данным ст. Sonderstrom наблюдается даже уменьшение магнитуды тренда выше 400 км. Такое сильное расхождение высотного хода трендов T_i само по себе вызывает сильное удивление. В-третьих, все четыре установки НР дают совершенно неожиданный и непонятный с точки зрения наших сегодняшних знаний о физике термосферы сильный рост трендов T_i до плюс 3-4 К в год на высотах слоя $F1$.

Поскольку до сих пор считалось, что температуры нейтралов и ионов равны до высот около 300 км, результаты, полученные методом НР, означают, что должны наблюдаться столь же высокие тренды температуры нейтрального газа T_n . Однако ни другие наблюдения, ни расчеты по современным моделям (даже по наиболее совершенной из них модели WACCM-X) такого сильного изменения T_n не дают. Без учета эффекта вековых изменений магнитного поля (см. ниже) модель WACCM может объяснить уменьшение T_n на 0.2-0.3 К в год.

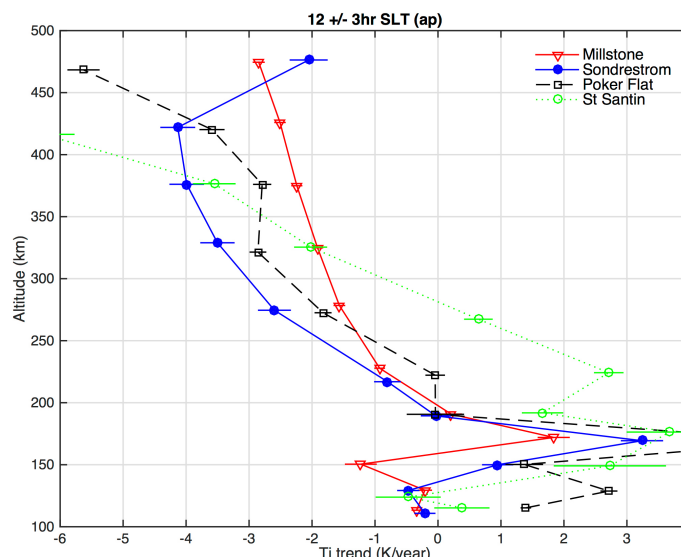
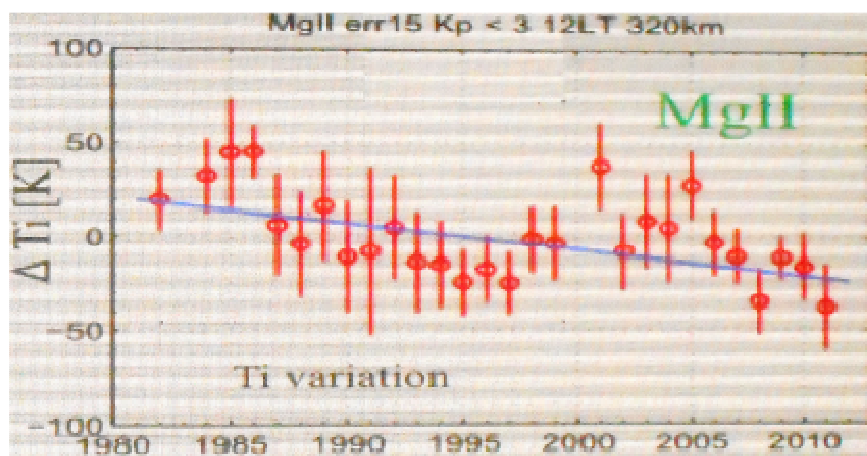


Рис. 20. Высотные профили тренда температуры ионов по измерениям на 4-х установках НР

Рис. 21. Среднегодовое изменение T_i по измерениям на ст. Tromso.

Более того, наблюдения орбит более чем 10 000 спутников дают тренды плотности атмосферы (см. выше рис. 16), которые соответствуют трендам температуры атмосферы на 400 км около 0.2 К в год. Эти данные считаются очень надежными, поскольку они получены несколькими группами исследователей и опираются на огромный статистический материал. Наблюдающееся противоречие вызывает в течение двух лет после предыдущего симпозиума горячие споры. Высказываются предположения, что данные измерений T_i ошибочны (хотя метод НР в течение нескольких десятилетий считался наиболее надежным методом ионосферных измерений), что при определении T_i не были правильно учтены изменения средней массы ионов, которое должно происходить в сторону увеличения доли ионов O^+ при охлаждении термосферы, и другие соображения, подвергающие сомнению измеренные методом НР тренды T_i .

Не смотря на указанные противоречия на Симпозиуме вновь были представлены результаты измерений T_i на установке НР, на этот раз — новые данные с установки в Тромсо (Норвегия), также дающие большие (более 10 К за десятилетие) отрицательные тренды T_i выше 220 км и большие положительные тренды в области $F1$.

На рисунке 21 приведено среднегодовое изменение T_i на высоте 320 км со временем по измерениям на ст. Tromso. Линейная аппроксимация наблюдений (линия) дает тренд T_i , равный 13 ± 3.6 К за десятилетие. В качестве индекса солнечной активности использовалась интенсивность линии MgII. Эти измерения показали также, что наблюдаются сезонные изменения тренда T_i : летом абсолютная величина отрицательного тренда больше (15 К за декаду), тогда как зимой она меньше (9 К за декаду).

Высотный профиль трендов T_i по данным ст. Tromso близок к профилю по данным ст. Sondedstrom (см. выше рис. 20). На высотах 200–380 км отрицательный тренд составляет 10–20 К за десятилетие, а выше 400 км он становится положительным и достигает +10 К за десятилетие на высоте 470 км.

В одном из докладов сделана попытка, используя модель WACCM-X, в которую введены вековые изменения магнитного диполя Земли, объяснить высокие отрицательные тренды T_i в верхней ионосфере эффектом вековых вариаций. В этом докладе показано, что таким образом удастся объяснить отрицательные тренды T_i порядка –20 К за десятилетие для измерений на конкретной станции Millstone Hill (США). Высотно-долготный разрез трендов T_i согласно модели WACCM, в которую введено вековое изменение магнитного поля, приведен на рис. 22. Как видно из этого рисунка (и это подчеркивалось в докладе) новые расчеты позволяют получить для региона ст. Millstone Hill максимальный отрицательный тренд около 20 К за десятилетие.

Однако вопросы о трендах, полученных на других установках НР, о положительных трендах ниже 200 км и о связи этих результатов с трендами нейтральной температуры термосферы остаются очень острыми и открытыми. Вся проблема трендов T_i , полученных методом НР, и кратко описанная выше, является сейчас наиболее острой проблемой всей ситуации с охлаждением и оседанием термосферы и ионосферы.

Что касается трендов электронной температуры, то они по данным измерений методом НР на станции Millstone Hill получены положительными во всем интервале измерений выше 150 км. Максимальная величина трендов T_e достигает 2.7 К в год на высотах максимума области F (см. рис. 23).

Принципиально новым явилось изучение влияния трендов состояния области $F2$ ионосферы на условия распространения радиоволн коротковолнового диапазона. Используя классический метод описания распространения радиоволн в ионосфере (так называемый метод «ray tracing») проведены расчеты изменения дальности R и высоты h отражения радиоволн различных частот при наклонном падении на ионосферу под разными углами при уменьшении концентрации электронов в области F на 1% и 5%.

На рисунке 24 приведено изменение высоты характера распространения радиолучей для различных частот в «нормальной» ионосфере (белые линии) и в ионосфере с уменьшенной в области F концентрацией электронов (цветные линии). Видно, что при изменении N_e параметры радиотрасс изменяются.

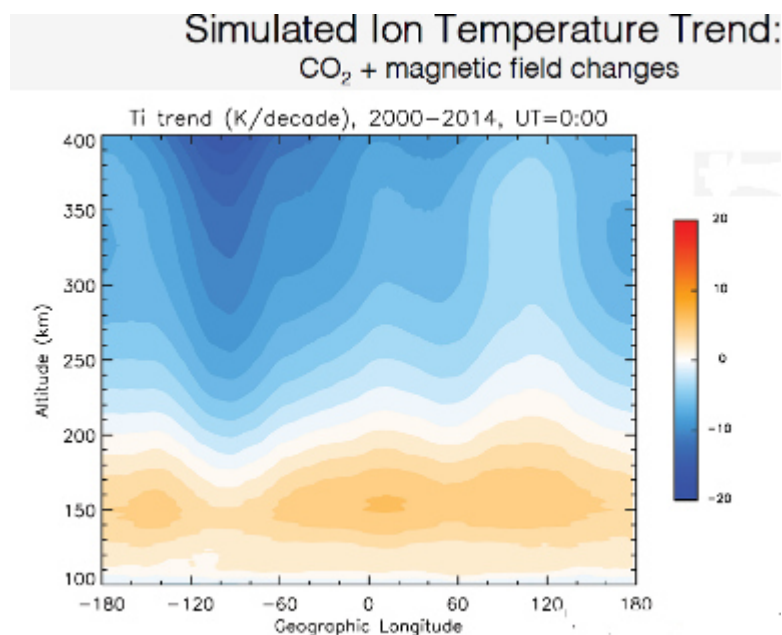


Рис. 22. Высотно-долготный разрез трендов T_i согласно модели

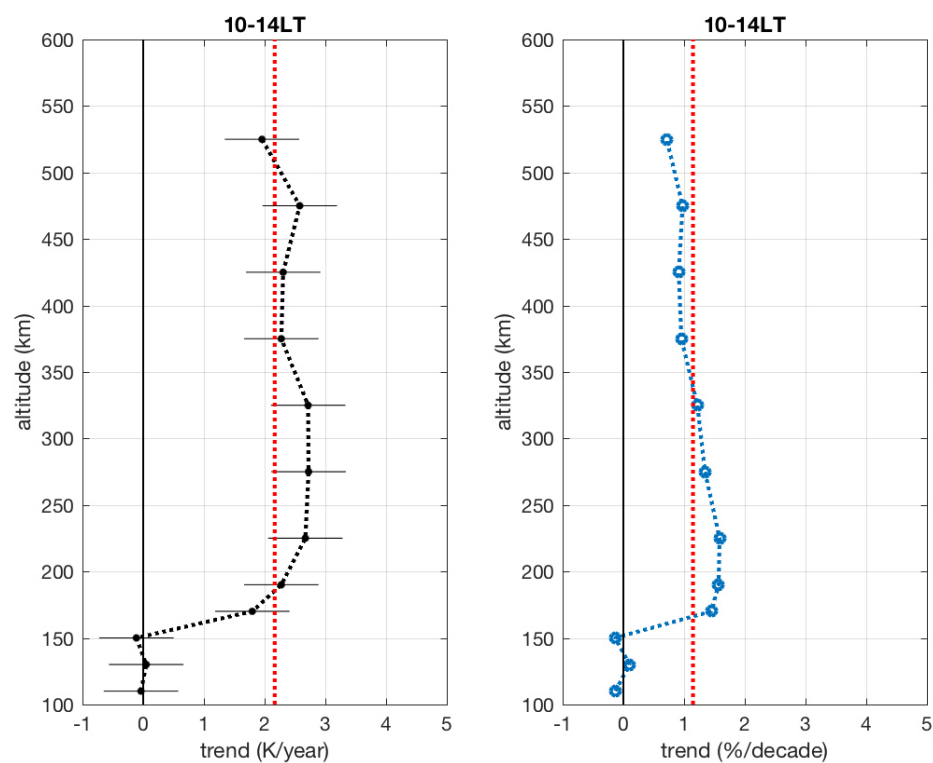


Рис. 23. Тренды T_e по измерениям на ст. Millstone Hill.

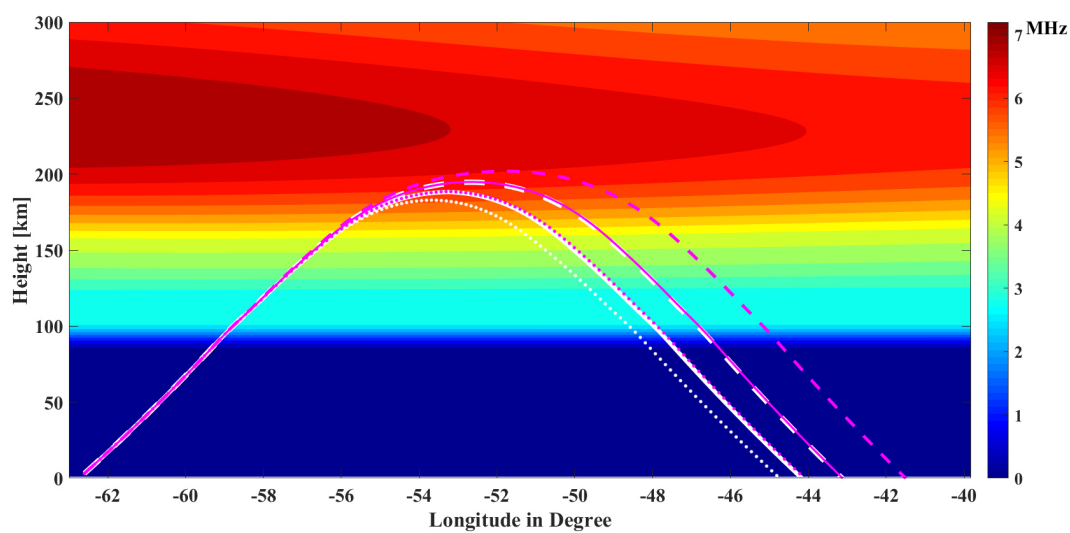


Рис. 24. Изменение траекторий КВ радиоволн при уменьшении количества электронов в области F на 5%.

Таблица 2. Изменение характеристик радиотрасс при изменении N_e .

(a)

Ionospheric conditions (12 LT)	Ground distance range, R [km] and Height, H [km]					
	$\alpha=15.0^\circ$ $f = 17.0$ MHz		$\alpha=15.0^\circ$ $f = 17.5$ MHz		$\alpha = 15.0^\circ$ $f = 18.0$ MHz	
	R	H	R	H	R	H
Eastward propagation						
Ne	1555	183	1605	188	1697	195
0.99*Ne	1561	185	1637	189	1736	197
0.95*Ne	1611	188	1699	195	1844	201

(b)

Ionospheric conditions (12 LT)	Ground distance range, R [km] and Height, H [km]					
	$\alpha=12.5^\circ$ $f = 17.0$ MHz		$\alpha=15.0^\circ$ $f = 17.0$ MHz		$\alpha = 17.5^\circ$ $f = 17.0$ MHz	
	R	H	R	H	R	H
Eastward propagation						
Ne	1671	172	1555	183	RP	RP
0.99*Ne	1664	172	1561	184	2331	220
0.95*Ne	1697	175	1611	189	RP	RP

В численном виде результаты расчетов для уменьшения N_e в области F на 1% и 5% приведены в табл. 2. Показаны изменение расстояния до точки прихода радиолуча R и высоты отражения H для различных частот при постоянном угле излучения α (a) и для разных углов α при постоянной частоте 17.0 МГц (b). Как видно из таблицы, максимальный эффект наблюдается при постоянной величине α на частоте 17.5 МГц: величина H увеличивается на 7 км, а величина R – на 94 км.

Этот результат особенно важен для работы гелиогеофизической службы Института, поскольку там регулярно ведутся расчеты радиотрасс для большого количества потребителей. При современных трендах параметров области F уменьшение концентрации в ней до значений, когда описанные эффекты станут заметны и должны будут учитываться в программах расчета условий распространения радиоволн, может произойти уже через несколько лет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным лейтмотивом всех докладов Симпозиума было то, что факт охлаждения и оседания средней атмосферы неоспорим и что эти процессы имеют антропогенную природу и вызваны увеличением в атмосфере парниковых газов. Прежде всего, это двуокись углерода CO_2 , которая является основным охладителем средней и верхней атмосферы, но существенную роль играет и метан, который приводит к увеличению в средней атмосфере паров воды, играющих важную роль в ряде аэрономических процессов (например, в формировании ледяных кристаллов в серебристых облаках).

Охлаждение средней атмосферы, как это и было получено в более ранних исследованиях, составляет 3-4 К за десятилетие. При этом наблюдаются локальные эффекты – тренды T в различных пунктах могут различаться на 1-2 К за десятилетие. В настоящее время идет, в основном, выяснение и уточнение деталей трендов основных параметров средней атмосферы – локальных эффектов, зависимости от солнечной и геомагнитной активности, связи с процессами в тропосфере (квазидвухлетние осцилляции, Североатлантическая Аномалия и другие).

Исключение составляет температура на мезопаузе. Здесь в самое последнее время произошло изменение взглядов на тренды T . Долгое время считалось, что тренды температуры на мезопаузе пренебрежимо малы (практически отсутствуют). На сегодня тренды на мезопаузе принимают отрицательными и достаточно высокими: минус 3-4 К за десятилетие.

Новым явился факт увеличения площади той части циркумполярного вихря, которая приходится на Евразию. Эта площадь увеличивается, а сам вихрь смещается в сторону Восточной

Европы и России. Последнее обстоятельство может привести к замедлению восстановления общего количества озона в этой географической области. Причина изменения циркумполярного вихря связана с глобальным потеплением. Соотношение площади открытой воды и льда в Баренцевом и Карском морях меняется в сторону открытой воды, что изменяет режим динамических процессов в атмосфере.

В термосфере и ионосфере имеется ряд проблем с изучением долговременных трендов. Не поняты до конца высокие тренды количества CO_2 на высотах 80-110 км, полученные по измерениям на двух спутниках (TIMED и ACE). Даже самые совершенные модели не могут объяснить тренд плотности атмосферы, получаемый по эволюции орбит спутников, на высотах около 400 км при низкой солнечной активности порядка минус 6-8% за десятилетие. Последняя версия модели WACCM-X дает только минус 4% за десятилетие.

Наиболее серьезные проблемы связаны с высокими трендами ионной температуры T_i , полученные по данным некогерентного рассеяния. Во-первых, выше примерно 300 км высотный ход этих трендов по данным 5-и установок НР сильно различается. Во-вторых, полученные отрицательные тренды (в среднем 10-30 К за десятилетие) много больше, чем тренды нейтральной температуры (~ минус 2 К за десятилетие). В третьих, на высотах слоя $F1$ получены высокие (20-30 К за десятилетие) положительные тренды, которые очень трудно согласовать с современными представлениями о физике ионосферы.

Высказано предположение, что кроме антропогенного фактора в виде увеличения количества CO_2 в атмосферном газе, в долговременных трендах участвует еще и геомагнитный фактор в виде вековых вариаций магнитного поля Земли.

THE 10-TH SYMPOSIUM ON ATMOSPHERIC TRENDS

A.D. Danilov

The most interesting results discussed at the 10th Workshop “Long-term changes and trends in the atmosphere (Hefei, China, May 14—18, 2018) are briefly described. It is emphasized that the concept of cooling and contraction of the middle and upper atmosphere due to the increase in the atmosphere of the CO_2 is completely accepted and confirmed by new sets of experimental data. In the middle atmosphere (stratosphere and mesosphere), the picture of atmospheric cooling is already clear enough, and local effects are studied. As for the thermosphere and ionosphere, there is a series of problems. First, it is the problem of high temperatures of ions according to the incoherent scatter data. They do not agree with the data on the trends in the density, and it is difficult to explain them even in the frames of the most complicated theoretical models.

KEYWORDS: TRENDS, IONOSPHERE, THERMOSPHERE.