УДК 550.385

9-Й СИМПОЗИУМ ПО ТРЕНДАМ В АТМОСФЕРЕ

А.Д. Данилов

Поступила в редакцию 03.10.2016 г.

Кратко описаны наиболее интересные результаты, обсуждавшиеся на 9-м Симпозиуме «Долговременные изменения и тренды в атмосфере» (Кулунсборн, Германия, 19–23 сентября 2016 г.). Подчеркивается, что идет накопление экспериментальных данных, подтверждающих существование охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения количества CO_2, а также развитие теоретических моделей, способных эти данные объяснить. Однако в настоящее время имеется несколько наборов экспериментальных данных, которые даже самые совершенные модели объяснить не могут.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРЕНД, ИОНОСФЕРА, ТЕРМОСФЕРА

ВВЕДЕНИЕ

9-й Симпозиум по Трендам в Атмосфере проходил в Кулунсборне (Германия) с 19 по 23 сентября 2016 г. Основной лейтмотив Симпозиума был следующим. Если на 7-м симпозиуме (2012 г.) приводились доказательства в пользу концепции охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы, а на 8-м симпозиуме (2014 г.) эта концепция считалась очевидной, и подчеркивалось, что имеющиеся теоретические модели не могут объяснить основные особенности наблюдаемых трендов, то в Кулунсборне анализировались детали найденных ранее трендов (зависимость от времени суток, сезона и широты, связь с магнитной активностью и т.д.) и обсуждались новые теоретические модели.

Симпозиум был организован Международной Рабочей Группой по долговременным изменениям и трендам в атмосфере. Спонсорами этой группы являются Международная Ассоциация Геомагнетизма и Аэрономии (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 прияло участие около 100 ученых из 24 стран. Было представлено 24 заказных и 47 обычных устных докладов, а также 17 постерных сообщений.

Как и на предыдущем Симпозиуме 2014 г., основной акцент в большинстве докладов в Кулунсборне был сделан на проблеме описания с помощью теоретических моделей наблюдаемых изменений в различных параметрах средней и верхней атмосферы. Напомним, что из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов (прежде всего – CO_2), вызывающих в тропосфере парниковый эффект, в средней и верхней атмосфере происходит охлаждение атмосферного газа с соответствующими изменениями многих параметров стратосферы, мезосферы, термосферы и ионосферы. Еще в 2008 г. была выдвинута концепция «оседания и охлаждения средней и верхней атмосферы», которая в настоящее время является общепринятой. С течением времени появляются новые экспериментальные данные и удлиняются ряды уже использованных данных, которые подтверждают указанную концепцию. Одновременно развиваются теоретические модели, которые призваны описать наблюдаемые изменения параметров средней и верхней атмосферы. Как будет показано ниже, это пока удается сделать не во всех случаях.

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, соответствующие пояснения будут сопровождать рисунки в тексте.

Данилов Алексей Дмитриевич, д.ф-м.н., зав.лаб., ФГБУ «ИПГ», adanilov99@mail.ru

СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА

Температура в стратосфере и мезосфере продолжает понижаться — наиболее сильный отрицательный тренд составляет 3 К за десятилетие на высотах 40 и 60 км. Однако охлаждение стратосферы в северном полушарии замедлилось из-за восстановления (в результате действия Монреальского Протокола) количества озона (см. ниже) — в 1997 г. наибольший отрицательный тренд в стратосфере составлял более 4 К. В мезосфере заметного восстановления озона не происходит и отрицательный тренд температуры по-прежнему составляет 3-4 К.

Новым результатом, обсуждавшимся на Симпозиуме, был факт, что температурные тренды и в стратосфере, и в мезосфере сильно зависят от сезона (зимой отрицательные тренды сильнее), а потому использовать среднегодовые величины Т для выделения трендов нельзя. Было обнаружено также, что дни внезапных стратосферных потеплений (ВСП), когда температура в стратосфере резко повышается, вносят существенный вклад в получаемые тренды, если эти дни также включаются в анализ. При правильном анализе трендов температуры в стратосфере и мезосфере эти дни нужно исключать из рассмотрения.

Все сказанное иллюстрирует рис. 1. Черная линия показывает тренд Т зимой при исключении дней ВСП. Красной линией показан тренд также в зимний период, но при включении в анализ всех дней, включая и дни ВСП. Зеленая линия показывает тренд в летний период. Наличие сезонного различия очевидно. Синей пунктирной линией показана среднеквадратическая ошибка.

На рисунке 1 обращает на себя своеобразный хаос кривых на высотах, больших 65 км. Он отражает неопределенность ситуации с трендами в верхней части мезосферы и на мезопаузе. Сводка измерений Т на мезопаузе, опубликованная в 2003 г., давала надежный нулевой тренд. Сейчас же ряды измерений дают (в зависимости от широты наблюдения) достаточно сильные отрицательные тренды, достигающие −4 К за десятилетие. Это различие нельзя объяснить ошибками экспериментов — видимо имеет место тенденция резкого уменьшения температуры на мезопаузе.

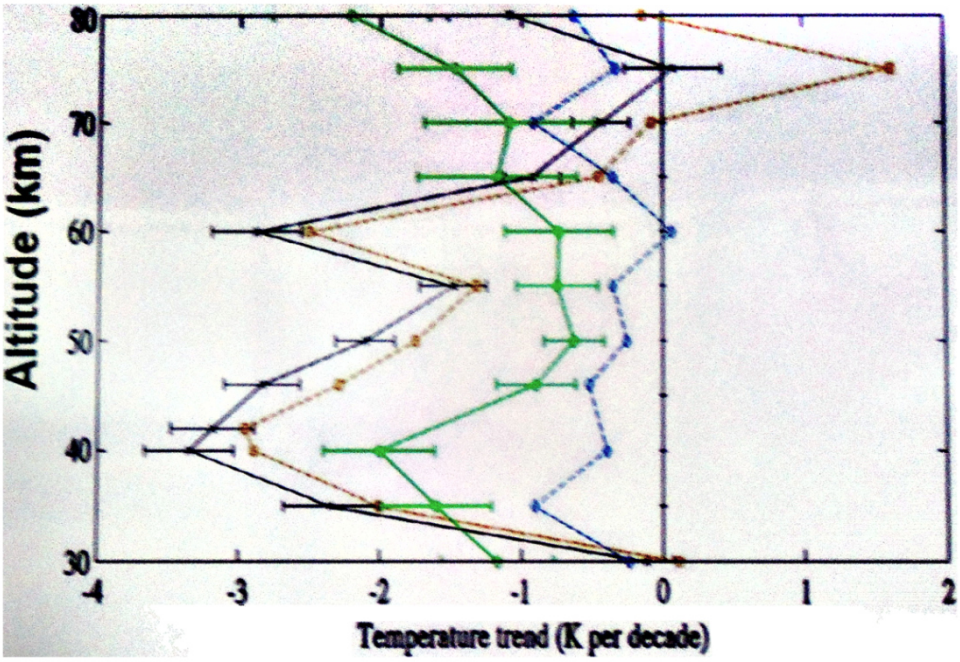

Рис. 1.

Странно ведет себя стратосферный озон. Падение общего содержания озона (ОСО) из-за разрушения его галогенными соединениями антропогеной природы, начиная с 80-х годов хорошо известно. Благодаря принятым мерам по замене озоно-разрушающих галонов (Монреальский протокол), в северном полушарии это падение прекратилось в конце прошлого столетия и началось постепенное восстановление ОСО. Однако, в южном полушарии такого восстановления не происходит, и ОСО остается почти на 100 ЕД ниже, чем в 1980 г. Все описанное иллюстрирует рис. 2. Верхняя часть рисунка относится к северному полушарию, нижняя – к южному. Светлые и темные кружки в северном полушарии относятся к февралю и марту, соответственно.

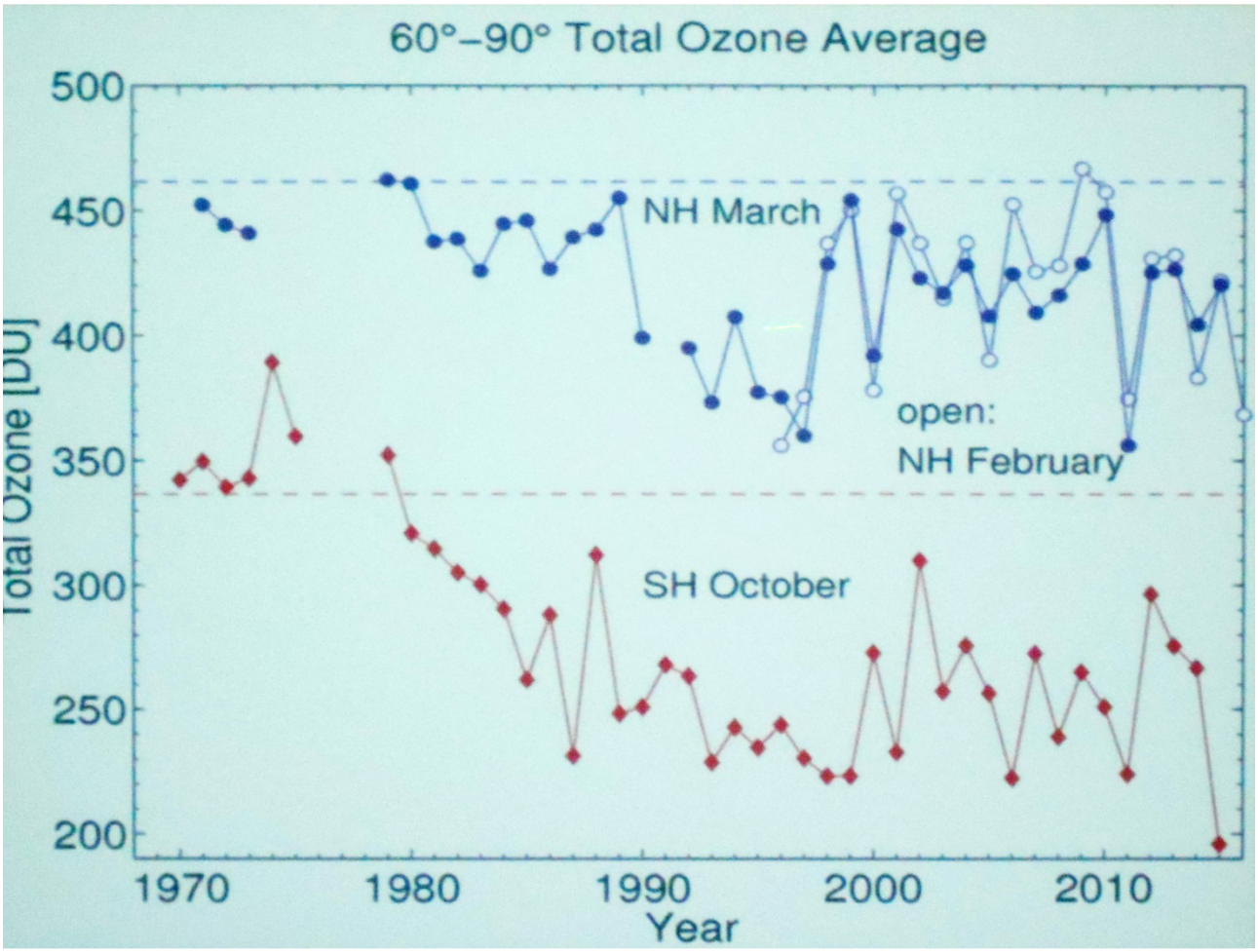

Рис. 2.

Достаточно неожиданным явился доклад, согласно которому количество галогено-углеродных соединений ($CHBr_3$, $CH2Br_2$, $CHBR_2Cl$, CH_2ClI и других) поступающих в атмосферу из воды океанов, увеличилось в атмосфере с 2010 по 2015 г. Причина — изменение вертикальных потоков в атмосфере из-за изменения циркуляционной системы тропосферы в результате глобального потепления. В области экваториального разрыва тропопаузы эти соединения быстро переносятся в стратосферу и там «включаются» в разрушение озона. Сделан модельный прогноз этого процесса на 120 лет. В ближайшие десятилетия эти соединения будут вносить такой же вклад в разрушение озона, как галоны антропогенного происхождения. Модели показывают, что в результате «работы» Монреальского Протокола через 10 лет мы вернулись бы к уровню озона 1980 г. Но добавление галлонов из океана задержит этот процесс еще на 10 лет.

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. Сейчас картина стала более согласованной и показывает, что частота появления всех этих трех явлений растет. Рисунок 3 демонстрирует частоту наблюдений NLC на лидарной установке «Аломар» (69 N). Следует обратить внимание на красные прямоугольники, которые соответствуют наблюдениям на высокочувствительном канале лидарной установки. Хорошо видна тенденция роста времени наблюдения NLC в последние 10 лет.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

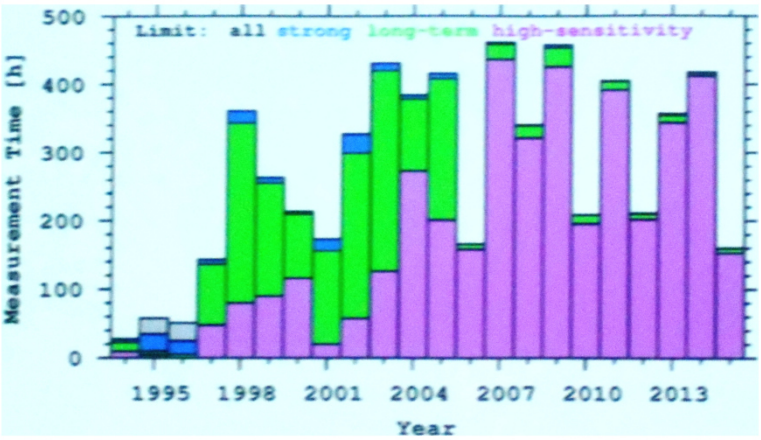

Рис. 3

Согласно другим лидарным данным тренд частоты появления PMC за период 1998–2015 гг. составляет 6% за десятилетие. На рисунке 4 показан тренд частоты появления PMSE согласно радарным наблюдениям. Видно, что он также положителен и составляет 0.33 в год.

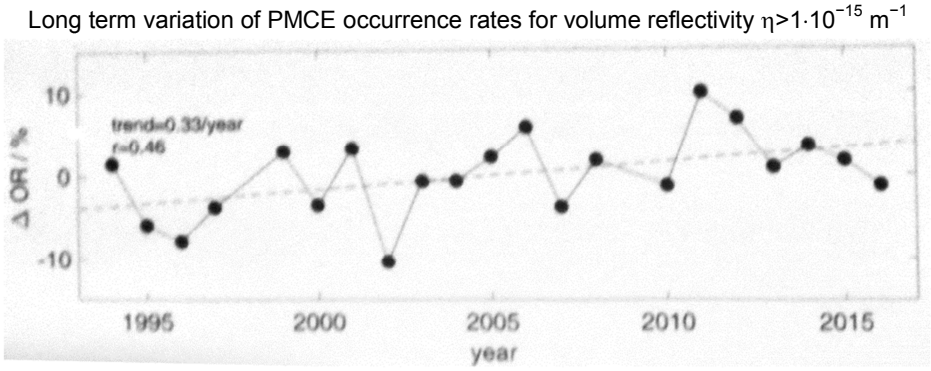

Рис. 4.

Поскольку все три явления связаны с формированием на указанной высоте ледяных кристаллов, положительные тренды их появления подтверждают отрицательные тренды T в верхней мезосфере и указывают на рост там количества паров воды.

Большое внимание в докладах Симпозиума было уделено трендам динамики средней атмосферы. Подтверждаются данные, упоминавшиеся еще на предыдущих двух симпозиумах, что зональные ветра в средней атмосфере становятся более западными (направленными на восток). Такие ветра должны быть более благоприятны для проникновения вверх в нижнюю термосферу внутренних гравитационных волн (ВГВ).

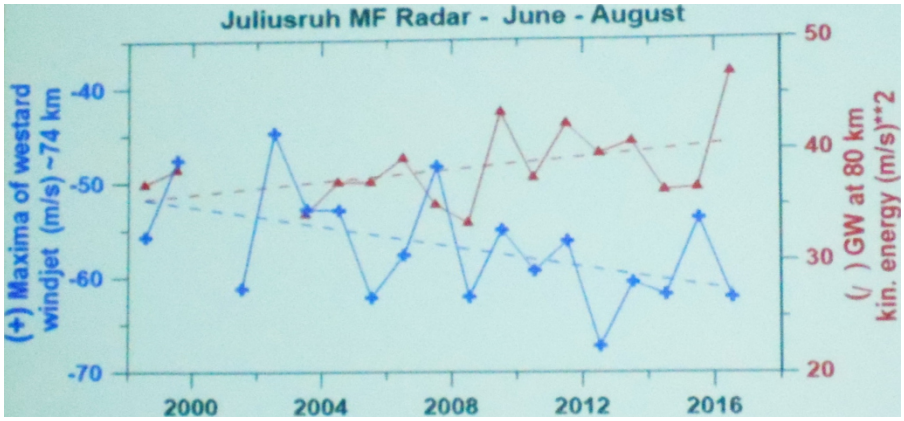

Рис. 5.

Рисунок 5 подтверждает это предположение. Синяя кривая показывает уменьшение восточных (направленных на запад) ветров на 74 км, а красная — рост интенсивности ВГВ на 80 км. Подчеркнем, что, поскольку диссипация ВГВ в области турбопаузы (110–120 км) является основным источником турбулентности на этих высотах, усиление проникновения ВГВ через барьер горизонтальных ветров очень важно для проблемы увеличения коэффициента турбулентной диффузии, о которой будет говориться ниже.

Согласно измерениям прибором SABER в высоких широтах южного полушария наблюдается рост интенсивности ВГВ на 20% за десятилетие

ТЕРМОСФЕРА

Наиболее плохо объяснимые тренды наблюдаются в термосфере и ионосфере. Лейтмотивом симпозиума 2014 г. было то, что существующие теоретические модели атмосферы не в состоянии объяснить большинство наблюдаемых в верхней атмосфере и ионосфере изменений при том увеличении количества парниковых газов, которое в настоящее время наблюдается в тропосфере.

На данном симпозиуме основное внимание было уделено новой модели WACCM-X, разработанной в Национальном Центре Атмосферных Исследований (NCAR) в Боулдере (США). Первые упоминания о новой модели, которая является развитием известной модели глобальной циркуляции (Global Circulation Model, GCM), также разработанной в NCAR, появились еще в докладах предыдущего симпозиума. Модель WACCM была «рекламирована» на симпозиуме 2014 г. как существенное развитие модели GCM. Однако выяснилось, что она не способна объяснить ряд наблюдаемых трендов в средней и верхней атмосфере. На данном симпозиуме была представлена последняя модификация модели WACCM — модель WACCM-X.

По утверждению создателей модели WACCM-X она не только объединяет всю атмосферно-ионосферную систему, но может быть состыкована и с моделями океана, ледяного покрытия~~,~~ и суши. Самые недавние обновления включают более полную схему процессов ионно-нейтральной химии, обновление скоростей нагрева и охлаждения атмосферного газа и полностью трехмерную схему процессов ионосферного переноса.

Модель WACCM-X в состоянии объяснить многие явления (тренды температуры и малых газовых компонент) в средней атмосфере. Однако ряд важных наблюдаемых явлений в термосфере и ионосфере эта модель, как будет показано ниже, объяснить не может.

Одним из наиболее важных экспериментальных результатов следует считать подтверждение того факта, что на высотах 80–110 км существует сильный положительный тренд количества CO_2. Первые указания на существование этого тренда были доложены еще на предыдущем Симпозиуме (см. статью автора 2014 г. о докладах на указанном симпозиуме) по данным спутника ACE. Сейчас эти данные подтвердились наблюдениями аппаратурой SABER со спутника TIMED. Указанный тренд составляет около 10% за десятилетие, что вдвое больше тренда, который должен быть при современном увеличении количества CO_2 в атмосфере. Даже модель WACCM-X не может воспроизвести такой тренд на указанных высотах без существенного увеличения коэффициента турбулентной диффузии в области турбопаузы.

Сказанное иллюстрирует рис. 6. Правая сторона рисунка относится к тренду CO_2 в абсолютных единицах, левая — в процентах. Синяя линия соответствует тренду, который должен быть при сегодняшнем увеличении количества CO_2, надежно измеряемого в тропосфере. Естественно, именно такой тренд дает модель WACCM-X. Черная линия с указанием ошибок соответствует измерениям на спутнике «ACE». Эти данные уже приводились два года назад. Красная линия демонстрирует результаты измерений прибором SABER на спутнике «TIMED». Четко видно, что две независимых группы измерений дают на высотах 80–110 км значительно больший тренд (~10%), чем должно быть при сегодняшнем увеличении CO_2 в тропосфере (5%), причем различие между измерениями и моделью превышают ошибки как модели, так и измерений.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

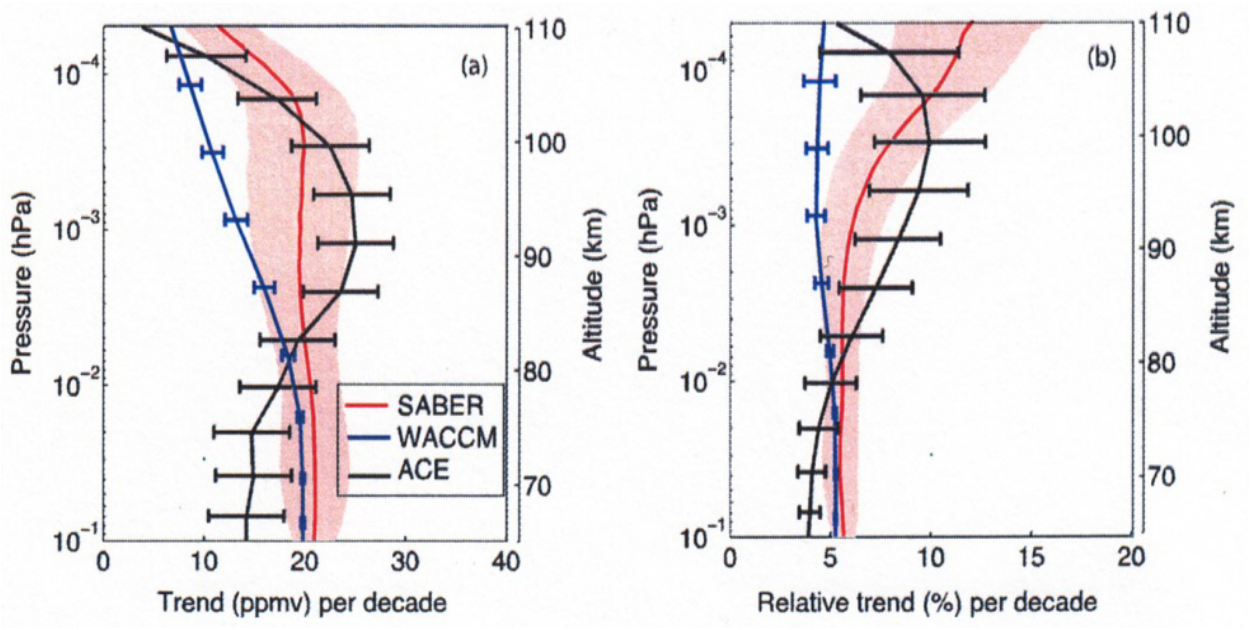

Рис. 6.

Важность этого результата состоит в том, что он относится к высоте гомопаузы, т.е. высоте, начиная с которой все газы в термосфере распределяются по своему барометрическому закону. Если полученные данные верны, то количество CO_2 в термосфере должно быть гораздо больше, чем считалось до сих пор в предположении, что до высоты турбопаузы CO_2 перемешан и составляет постоянную долю общего количества нейтральных частиц ($3\ 10^{-4}$). Более высокое количество CO_2 в термосфере может быть причиной ряда сильных трендов параметров атмосферы и термосферы (плотность, ионная температура, см. ниже), которые пока не удается объяснить с помощью теоретических моделей.

Чтобы согласовать расчеты по модели WACCM-X с приведенными на рис. 6 экспериментальными данными, необходимо предположить, что коэффициент турбулентной диффузии k_{zz} на 15–30% больше, чем считалось до сих пор. Это — очень сильное предположение, поскольку, если оно подтвердится, потребуется пересмотр целого ряда вопросов состава и структуры термосферы и даже верхней мезосферы.

Интересно, что описанный эффект увеличения тренда CO_2 на 80–110 км различен в разных полушариях — в северном полушарии он примерно вдвое больше, чем в южном.

Четыре группы авторов исследуют изменение плотности атмосферы на высотах полетов низкоорбитальных спутников на основании анализа их орбит. Проанализировано уже несколько десятков тысяч орбит. Исследования дают согласующиеся результаты — плотность термосферы на высоте 400 км (к этой высоте приводят для сравнения все данные) падает. Скорость падения (отрицательный тренд) зависит от солнечной активности. Наибольший тренд порядка — (6–8) % за десятилетие наблюдается при низкой солнечной активности. При средней и высокой активности он составляет — (2–3) % за десятилетие.

К данным о трендах плотности, уже представлявшимся на двух предыдущих симпозиумах, добавились измерения еще одной группы (синие горизонтальные линии на рис. 7, см. ниже). Эти данные при средней и высокой солнечной активности дают еще более сильный отрицательный тренд, чем давалось раньше, а в минимуме активности их тренд совпадает с трендами других групп.

Модельные расчеты, представленные на предыдущем симпозиуме (верхняя прямая линия с крестами), были в состоянии объяснить лишь тренд при средней и высокой активности, но не могли дать сильный отрицательный тренд около 7% за десятилетие, получаемый экспериментально. Модель WACCM-X позволяет воспроизвести более низкие величины тренда в минимуме активности порядка -5% за десятилетие (ломаная линия с крестами). Однако, чтобы получить пунктирную линию с крестами, которая дает минус 7 % за десятилетие в минимуме активности и ближе к новым экспериментальным данным (горизонтальная синяя линия) при средней активности, создателям модели WACCM-X пришлось сделать важный шаг – искусственно повысить вдвое константу одной из химических реакций, которая участвует в системе процессов, приводящих к охлаждению газа при росте количества CO_2.

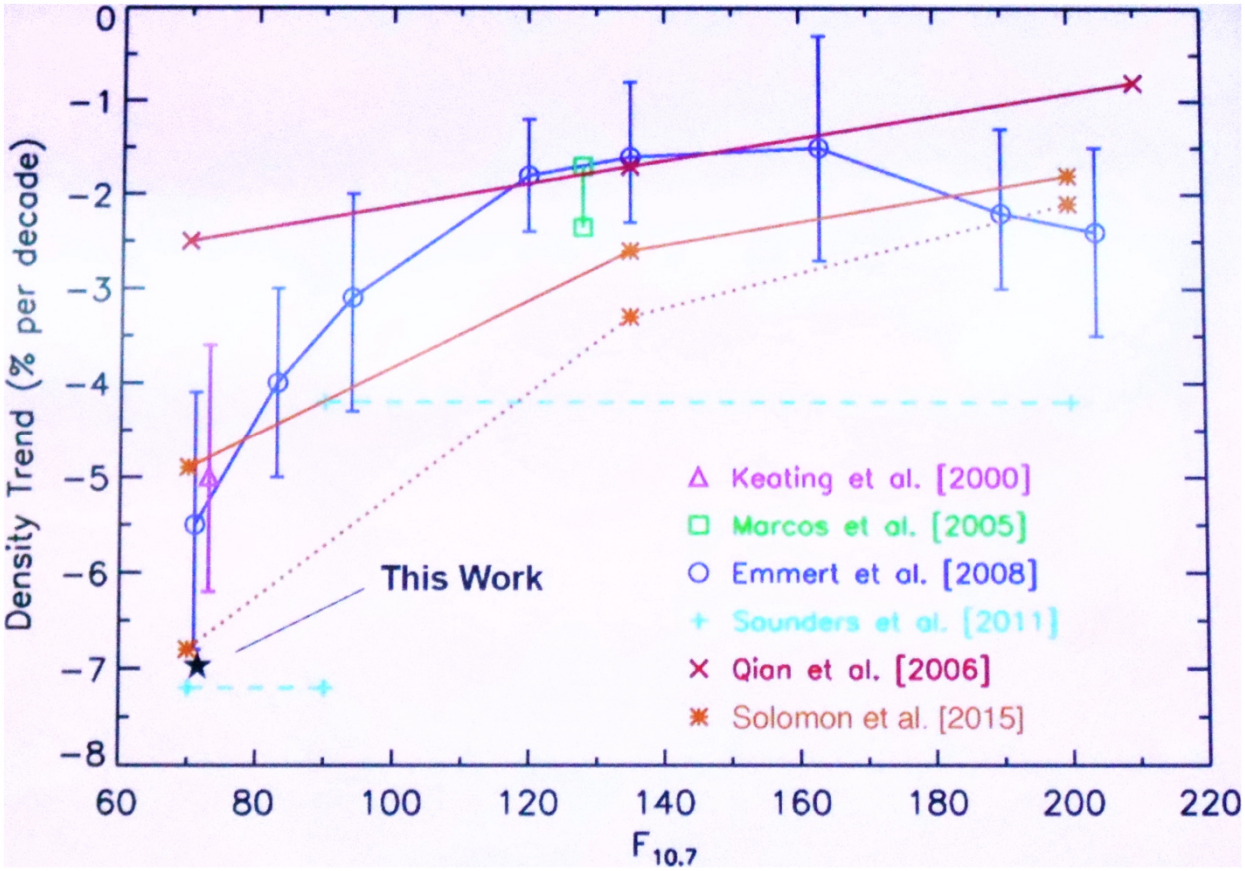

Рис. 7.

ИОНОСФЕРА

Уже около 10 лет публикуются данные измерений ионной температуры ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР). Эти измерения дают на высотах ионосферной области F очень большие отрицательные тренды, составляющие несколько (2–4) десятка К за десятилетие. На обсуждаемом симпозиуме был представлен доклад группы НР на установке в Millstone Hill, в котором анализировались результаты измерений $T_и$ на четырех установках НР. Результаты этого доклада можно сформулировать следующим образом. На высотах ионосферной области F все методы дают относительно согласующиеся результаты — отрицательный тренд, равный 30–40 К за десятилетие. Однако, высотный ход трендов $T_и$ получается различным на разных установках, поэтому на больших высотах наблюдаемые тренды сильно различаются.

Получаемые методом НР (который считается самым надежным методом измерения параметров ионосферы и даже термосферы) сильные отрицательные тренды $T_и$ вызывают удивление. Если они, действительно, так велики (а модель WACCM-X может дать самое большее −8К за десятилетие), то это означает, что охлаждение термосферы идет гораздо сильнее, чем ожидалось, и, возможно по каким-то другим законам, чем закладывались в модели со времени известных пионерских работ Ришбета, Робла и Дикинсона.

Следует отметить, что данные НР дают достаточно сильный отрицательный тренд ионной температуры около 10 К за десятилетие и на высотах области Е (110 км). Модель WACCM-X дает для этой высоты отрицательный тренд лишь около 3 К за десятилетие.

Не дает модель WACCM-X и отрицательных трендов критической частоты *foF*2, получаемых на основании наблюдений методом вертикального зондирования на станциях глобальной ионосферной сети. Для критической частоты области *F*2, *foF*2, у всех исследователей получены отрицательные тренды, хотя магнитуды этих трендов несколько различаются. Большой объем работы в этом направлении выполнен в течение последнего десятилетия в ФГБУ «ИПГ». Результаты этой работы дают отрицательные тренды *foF*2 достигающие в дневное время зимой ~0.05 МГц в год, что соответствует

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

примерно 5% за десятилетие. В то же время модель WACCM-X дает отрицательный тренд, который на порядок меньше наблюдаемого (минус 0.2–0.3% за десятилетие).

Предложен новый метод анализа долговременных трендов в ионосфере и теромсфере, используя параметр, который авторы зазвали «slab thickness». Этот параметр представляет собой комбинацию измеряемой наземным ионозондом величины *hmF*2 и вертикального TEC (см. рис. 8). По утверждению авторов такой параметр должен давать лучшее представление степени изменения вертикального профиля электронной концентрации из-за охлаждения и оседания термосферы.

Используя наблюдения на станции Юлиусру, авторы этого метода получили отрицательный тренд указанного параметра, равный 4 км в год (см. рис. 9).

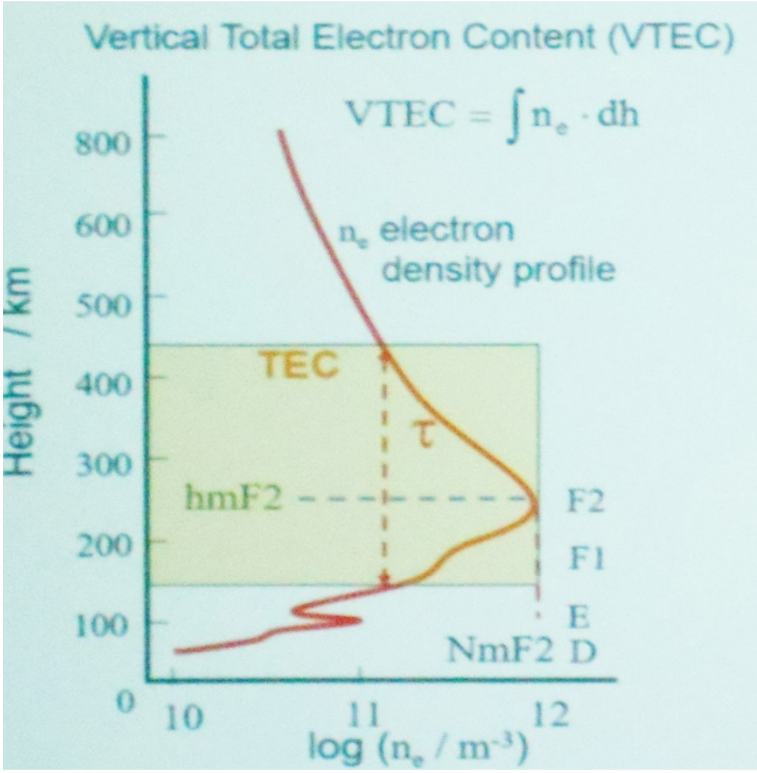

Рис. 8.

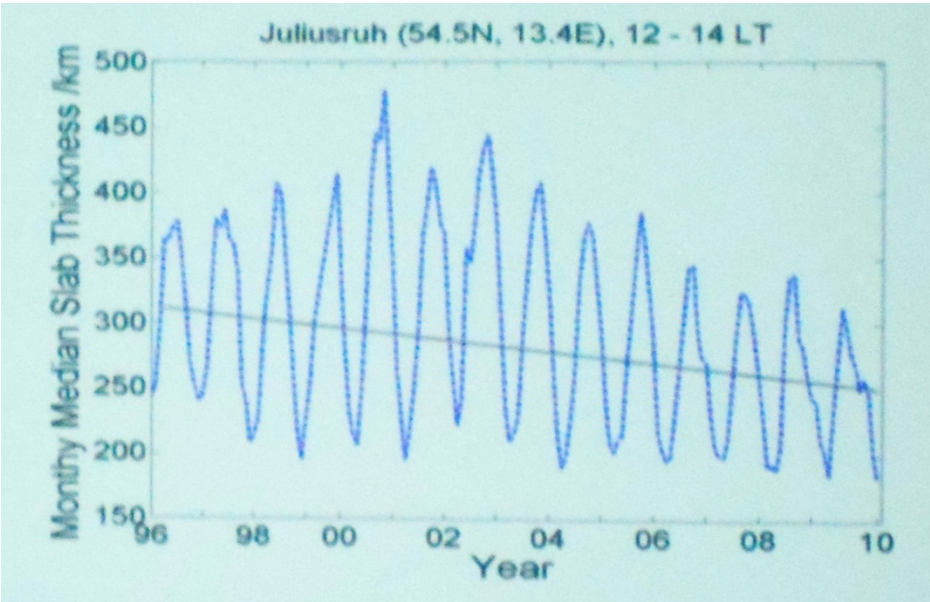

Рис. 9.

Тренды электронной концентрации в области D исследуются двумя принципиально разными методами. Измерения методом «фазовых высот», т.е. вертикальным зондированием на одной частоте и измерением высоты отражения сигнала, проводятся уже более трех десятилетий. Эти измерения показывают, что высота отражения систематически уменьшается (см. рис. 10). При характере высотного профиля [e] в области D (уменьшение [e] с уменьшением высоты) такое изменение высоты показывает, что наблюдается положительный тренд электронной концентрации. На рисунке 10 по горизонтальной оси показаны дни, начиная с 31 декабря 1958 г., а по вертикальной — высота отражения радиоволн в км.

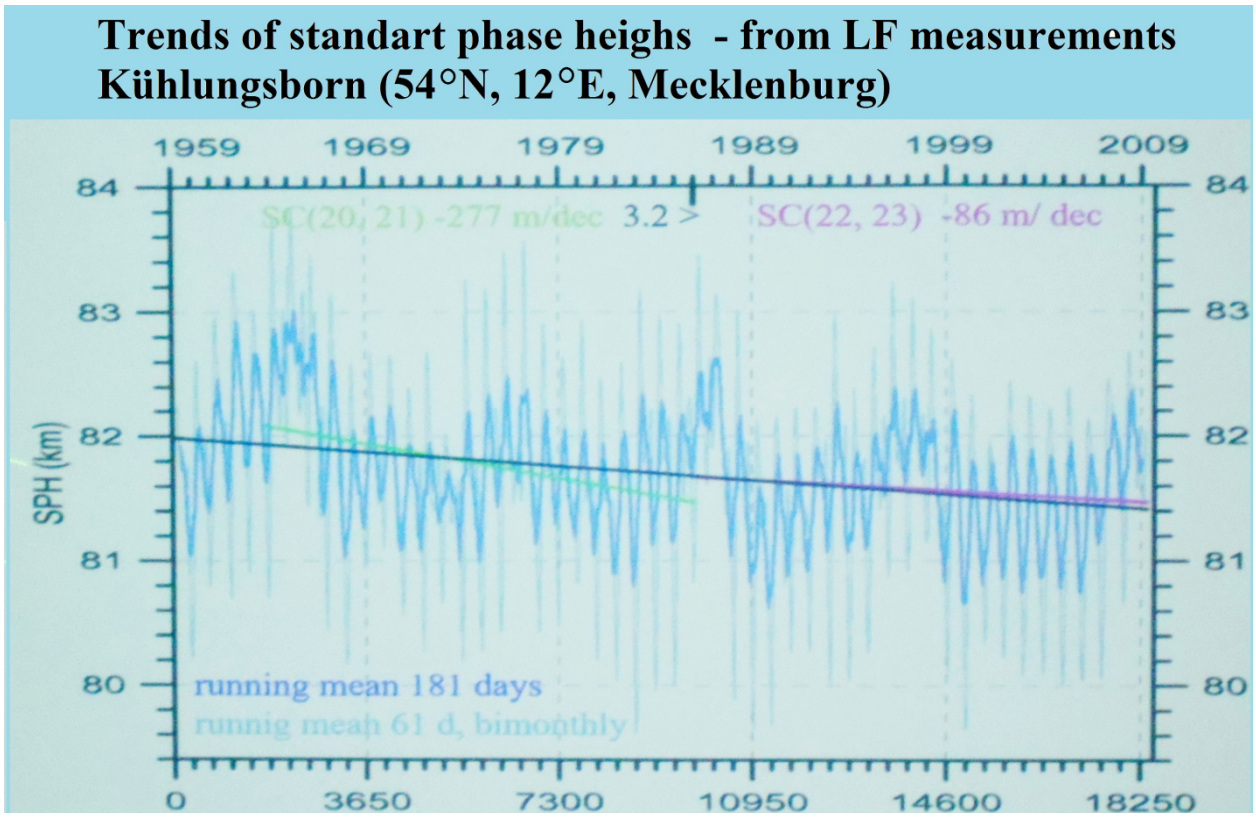

Рис. 10.

Анализ всех имеющихся ракетных измерений в области D, показал, что там наблюдаются положительные тренды электронной концентрации. Авторы доклада (Университет Граца, Австрия) использовали два подхода: анализ всех измерений, включая и большой массив зондовых измерений, проведенных на ракетах М100 в ЦАО Росгидромета, и анализ только измерений методом фарадеевского вращения с борта ракет. Последний метод является самым надежным. Добавление измерений зондовым методом, приводит к очень большому разбросу данных и, практически не позволяет выделить тренд. Фактически авторы доклада повторили работу, проделанную в 90-х годах в ФГБУ «ИПГ», но с учетом пополнения банка измерений методом фарадеевского вращения за прошедшие годы, и пришли к тому же выводу о невозможности использовать зондовые измерения и положительном тренде [e] в области D.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное направление работ по изучению долговременных изменений (трендов) в средней и верхней атмосфере, вызванных увеличением количества парниковых газов в атмосфере, состоит в уточнении найденных ранее трендов от различных факторов — сезона, местного времени, географических координат и т.д. Одновременно совершенствуются попытки описания наблюдаемых изменений с помощью теоретических моделей. Наибольших успехов достигла в этом отношении модель WACCM-X (NCAR, USA), которая хорошо воспроизводит большинство изменений, наблюдаемых в средней атмосфере.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

Однако в термосфере остаются еще явления, которые не вписываются в принятую сейчас концепцию охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы. К таким явлениям относятся: высокий положительный тренд CO_2 на высотах 80–110 км, сильные отрицательные тренды плотности термосферы на 400 км в минимуме солнечной активности, высокие скорости охлаждения термосферного газа (до 40 К за десятилетие) на высотах ионосферной области F и высокие отрицательные тренды критической частоты *foF*2.

Автор выражает благодарность А.В. Константиновой за помощь в оформлении статьи.

THE 9-TH SYMPOSIUM ON ATMOSPHERIC TRENDS

A.D. Danilov

The most interesting results discussed at the 9th Symposium “Long-term changes and trends in the atmosphere” (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016) are briefly described. It is emphasized that there occur an accumulation of experimental data confirming the existence of cooling and contraction of the middle and upper atmosphere due to the increase in the CO_2 amount and also a development of theoretical models capable to explain these data. However, currently there are several sets of experimental data which can not be explained even by the most sophisticated models.

KEYWORDS: TRENDS, IONOSPHERE, THERMOSPHERE.