

УДК 550.388

## НЕКОТОРЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕНДОВ В ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

© 2021 г. А. Д. Данилов<sup>1, \*</sup>, Н. А. Бербенева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия

\*e-mail: [adanilov99@mail.ru](mailto:adanilov99@mail.ru)

Поступила в редакцию 09.01.2021 г.

После доработки 11.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Показано, что в настоящее время наблюдаются тренды параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы, которые уже приводят или могут в обозримом будущем привести к изменениям в этих сферах. Указаны тренды этих параметров, которые, на наш взгляд, уже сейчас имеют выход на прикладные задачи. В средней атмосфере это — увеличение количества паров воды, которое может повлиять на судьбу озонового слоя. Оно объясняет также рост явлений полярных мезосферных летних эхо, беспокоящих оборонные ведомства. Там же происходит изменение системы ветров и усиление проникновения внутренних волн в ионосферу. Это должно приводить к существенному усилению “метеорологического контроля” ионосферы. Тренды плотности на спутниковых высотах уже сейчас приводят к увеличению времени жизни объектов “космического мусора” и повышению вероятности их столкновения с космическими аппаратами. Отрицательный тренд количества атомного кислорода в термосфере указывает, скорее всего, на усиление турбулентной диффузии. Видимо, это потребует корректировки термосферных моделей, используемых для многих прикладных задач. Отрицательные тренды температуры ионов в ионосфере могут уже сейчас влиять на работы систем глобального позиционирования. Тренды полного содержания электронов и приведенной толщины ионосферы связаны с корректировкой систем позиционирования и других подобных систем. Обнаружено, что происходит “опускание” уровней постоянных величин  $Ne$  в области  $D$ . Это должно учитываться в системах, использующих распространение радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов. Тренды критической частоты слоя  $F2$  могут уже в ближайшее время привести к изменениям  $foF2$ , которые, как показывают расчеты, значительно влияют на параметры радиотрасс КВ-диапазона.

DOI: 10.31857/S0016794021040040

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время является общепризнанным тот факт, что человеческая деятельность влияет на окружающую среду в целом и атмосферу, в частности. Наиболее известным примером является истощение слоя озона в 80–90-х годах прошлого века, которое было вызвано использованием галогенсодержащих соединений (галонов) как в промышленности, так и в бытовой химии. К счастью для человечества, глобальное уменьшение количества озона удалось остановить благодаря объединенным усилиям ведущих мировых держав (так называемый “Монреальский протокол”) по замене галонов другими соединениями, не приводящими к каталитическим циклам уничтожения озона.

Вторым примером влияния человечества на окружающую среду является явление глобально-

го потепления. Обсуждение этого явления выходит за рамки данной статьи. Мы упоминаем о нем только потому, что именно то увеличение парниковых газов (в основном это — двуокись углерода  $CO_2$ , и мы для простоты будем говорить только о ней), которое вызывает парниковый эффект в тропосфере, существенно влияет и на поведение вышележащих атмосферных слоев от стратосферы до термосферы. Группой ученых [Laštovička et al., 2008] была выдвинута концепция оседания и охлаждения средней и верхней атмосферы. Эта концепция с тех пор нашла много надежных подтверждений.

В этой статье мы дадим краткий обзор сегодняшнего положения дел с трендами параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы и кратко обсудим, к каким прикладным проблемам изучение этих трендов относится уже сегодня или

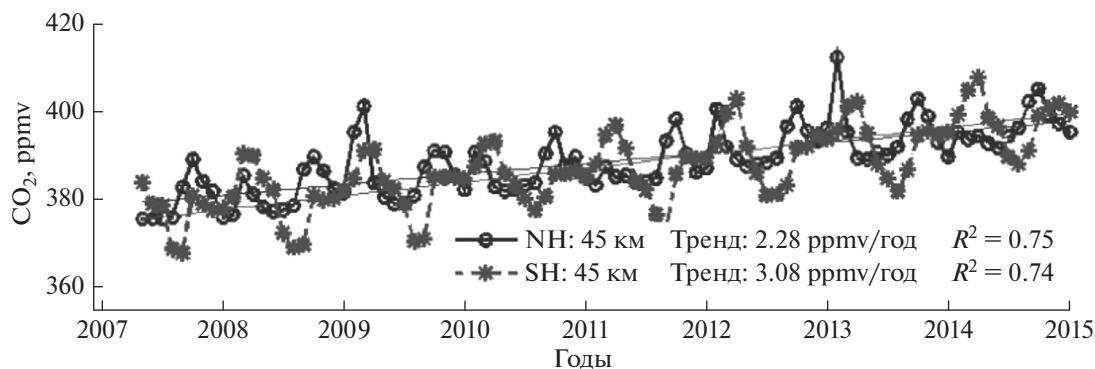


Рис. 1. Изменение количества CO<sub>2</sub> в течение последнего десятилетия по измерениям аппаратурой SOFIE на высоте 45 км согласно Su et al. [2018].

с большой вероятностью будет относиться в ближайшем будущем.

Подробный обзор всех аспектов проблемы трендов средней и верхней атмосферы и ионосферы потребовал бы большого объема статьи, очень большого числа ссылок и увел бы нас от основного вопроса данной публикации. Поэтому мы ограничимся констатацией наиболее важных аспектов этой проблемы, как она видится сегодня, отсылая читателя за детальными описаниями и более полным списком ссылок к обзорам: Данилов и Константинова [2020a], Laštovička [2017, 2018].

## 2. СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА

Монотонное увеличение количества двуокиси углерода в атмосфере продолжается непрерывно. Рост количества CO<sub>2</sub> согласно измерениям на ст. Мауна Лоа (США) составляет 2 ppm в год [Yue et al., 2018]. В настоящее время превышение над доиндустриальным уровнем (1980 г.) составляет чуть менее 30%. Таким образом, факт роста количества CO<sub>2</sub> в атмосфере общеизвестен. Результатом этого роста в тропосфере является глобальное потепление, проявления которого уже сегодня широко известны. Но увеличение количества CO<sub>2</sub> происходит во всей толще атмосферы.

В соответствии с физическими законами, контролирующими распределение барометрических параметров в атмосфере, состав атмосферы (в силу действия турбулентной диффузии) должен оставаться постоянным до высоты так называемой турбопаузы (~110–120 км). Именно поэтому увеличение количества CO<sub>2</sub> в результате антропогенной деятельности неизбежно должно происходить и на всех высотах средней атмосферы и в области MLT (мезосфера и нижняя термосфера). То, что это действительно происходит, подтвердили измерения аппаратурой SABER на спутнике TIMED [Mlynczak et al., 2016]. Согласно 20-лет-

ним измерениям аппаратурой SABER на спутнике TIMED [Yue et al., 2016] рост количества CO<sub>2</sub> ниже 80 км происходит с той же скоростью, что и в тропосфере: 5% за десятилетие. Тренды CO<sub>2</sub> составляют 20.6 ± 3.0, 19.5 ± 4.5 и 19.9 ± 5.5 ppm за десятилетие на высотах 80, 90 и 100 км, соответственно [Yue et al., 2018]. Авторы специально подчеркивают, что из данных убраны эффекты солнечной активности и квазидвухлетних осцилляций (QBO), которые могут исказить получаемые тренды.

На рисунке 1 приведено изменение количества двуокиси углерода со временем на высоте 45 км по измерениям аппаратурой SOFIE на спутнике AIM согласно [Su et al., 2018]. 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: ~3 ppm в год.

Здесь мы имеем наглядный пример важности изучения трендов в вышележащих слоях атмосферы. Измерения трендов CO<sub>2</sub> на высотах стратосферы и мезосферы нужны 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 поэтому очень важны – они являются такой проверкой и дают хорошее согласие с наземными наблюдениями.

Первый детальный анализ всей совокупности измерений температуры в средней атмосфере был представлен Beig [2002]. В серии более поздних работ большой группы авторов во главе с G. Beig были уточнены результаты, полученные ранее, и подтверждено существование систематического охлаждения атмосферного газа на высотах средней атмосферы.

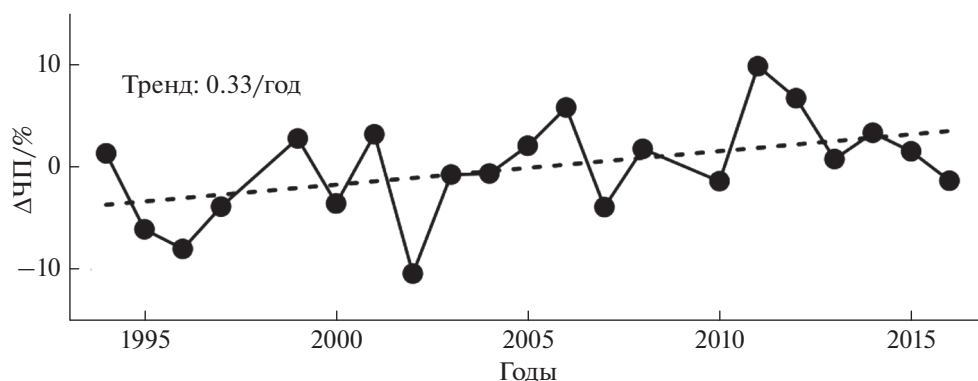


Рис. 2. Изменение со временем частоты появления PMSE согласно Latteck [2016].

В последующие годы результаты оценок трендов  $T$  в средней атмосфере неоднократно уточнялись. Было получено, что данные измерений различными наземными и спутниковыми методами хорошо согласуются между собой [Beig, 2018]. Например, согласно Sharma et al. [2016] измерения аппаратурой SABER на спутнике TIMED и аппаратурой HALOE на спутнике UARS дают изменения  $T$  со временем, близкие между собой и с наземными лидарными измерениями.

Много лет шла дискуссия вокруг трендов появления серебристых облаков (NLC) и явлений PMC (полярные мезосферные облака) и PMSE (полярные мезосферные летние эхо). Эта дискуссия была обусловлена, прежде всего, тем, что явления PMSE видны как сигналы на радаре, в том числе и задействованных в оборонительной службе разных стран, а потому способны вызывать ложные тревоги. Это, естественно, беспокоило соответствующие ведомства.

Однако природу указанных явлений и их взаимосвязь удалось выяснить. Оказалось, что наблюдения всех трех явлений (PMC, NLC, и PMSE) дают значимый положительный тренд. Согласно измерениям на 8 спутниках, частота появления PMC увеличилась в 1.5 раза. Такое же изменение наблюдается и по частоте появления NLC. Радары фиксируют рост числа PMSE. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведено изменение со временем частоты появления (ЧП) PMSE согласно Latteck [2016]. Все три явления связаны с количеством воды и температурой (ледяные кристаллы) и, таким образом, указывают на понижение температуры атмосферы на высотах 82–84 км и увеличение количества паров воды.

В результате большой программы по изучению NLC [Lübken et al., 2018a, b] был получен ряд новых результатов. Прежде всего, оказалось, что 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  $H_2O$ . Обнаружению положительных трендов паров воды в стратосфере и мезосфере было посвящено несколько публикаций [Nath, 2018; Lübken et al., 2018b; Ratnam, 2018]. В частности, было показано, что на высотах 30–50 км количество паров воды растет на 3% за десятилетие [Ratnam, 2018].

Необходимо отметить, что обнаружение указанного тренда количества  $H_2O$  требует существенного уточнения, или даже пересмотра, схемы фотохимических процессов, определяющих поведение озона в термосфере, поскольку соединения семейства  $NO_x$  играют в этой схеме существенную роль [Брасье и Соломон, 1987]. Таким образом, результаты, связанные с PMSE, имеют даже два прикладных аспекта. Во-первых, они сняли проблемы радарных наблюдений непонятных эхо, поскольку доказали, что это — одно из проявлений комплекса явлений, связанных с ростом количества воды в мезосфере. Во-вторых, они указывают на необходимость уточнения фотохимии озона в мезосфере, а это важно для прогнозирования будущего озонового слоя.

На сегодня картина трендов температуры в средней атмосфере выглядит следующим образом. Температура в стратосфере и мезосфере продолжает понижаться — наиболее сильный отрицательный тренд составляет 3 К за десятилетие на высотах 40 и 60 км. Охлаждение стратосферы в северном полушарии несколько замедлилось из-за восстановления количества озона. В мезосфере заметного восстановления озона не происходит,

и отрицательный тренд температуры по-прежнему составляет 3–4 К за десятилетие.

Отметим здесь один важный для данного рассмотрения факт. Увеличение температуры в тропосфере в глобальном масштабе еще мало (0.85 К), хотя оно уже приводит из-за нарушения системы циркуляции к заметным погодным катаклизмам и увеличению аномальных атмосферных явлений (штормов, торнадо, тайфунов и т.д.) в различных регионах Земли. Для измерения столь небольшого изменения температуры необходимы специальные усилия с использованием прецизионной аппаратуры. А обнаружение за тот же период уменьшения температуры в мезосфере на 4 К с помощью современной техники (например, лидарной) представляет собой гораздо более реальную задачу. Таким образом, результаты изучения трендов в вышележащих атмосферных слоях обеспечивают подтверждение реальности увеличения количества  $\text{CO}_2$  в атмосфере, а, следовательно, и глобального потепления.

Поскольку уменьшается температура мезосферы, в соответствии с барометрическим законом должна уменьшаться и ее плотность. По данным метеорологических радаров в Beijing и Mohe (Китай) высота сгорания метеоров систематически уменьшается (на 56.2 м в год и 65.8 м в год, соответственно) [Liu H.-L., 2018]. Это подтверждает отрицательные тренды (уменьшение) плотности атмосферы на высотах ~90 км, поскольку метеоры сгорают в атмосфере, достигнув определенной плотности атмосферного газа.

Уменьшение температуры в средней атмосфере происходит неравномерно по земному шару, поэтому это уменьшение (да еще различное на разных широтах) должно неизбежно влиять, прежде всего, на ветровой режим стратосферы и мезосферы. Такое влияние действительно заметно [Emmert et al., 2001; Portnyagin et al., 2006; Hoffmann and Chau, 2016; Jacobi et al., 2016; Reid et al., 2018]. Преобладающий зональный ветер становится все более близок к восточному (направленному на восток). Этот факт создает более благоприятные условия для распространения вверх через стратосферу и мезосферу атмосферных волн, генерируемых в тропосфере в результате природных явлений (штормы, атмосферные фронты, землетрясения и т.д.) и антропогенной деятельности.

Согласно Hoffmann and Chau [2016] на  $h = 74$  км максимальная скорость ветров с востока уменьшилась с 2000 до 2016 гг. на 8 м/с. При этом интенсивность ВГВ на 80 км возросла с 35 до 40 единиц. Согласно измерениям прибором SABER в высоких широтах южного полушария наблюдается рост интенсивности ВГВ на 20% за десятилетие [Yue et al., 2016]. В работе [Liu X. et al., 2018] экспериментально обнаружен рост количества ВГВ

на высотах 35–60 км на 12–15% за десятилетие. Согласно Deng [2018] тренд ВГВ на 100 км составляет +10% в год. Этот тренд очень важен для анализа физических процессов в области турбопаузы (110–120 км), поскольку диссипация ВГВ в этой области является основным источником турбулентности на этих высотах. Таким образом, усиление проникновения ВГВ через барьер горизонтальных ветров очень важно для проблемы увеличения коэффициента турбулентной диффузии, о которой будет говориться ниже.

Известно, что ионосфера реагирует на события в тропосфере. Это явление получило название “метеорологический контроль” или “влияние снизу” (coupling from below) и подробно описано в монографии Данилова и др. [1987]. В настоящее время уже надежно установлено, что переносчиком возмущений из тропосферы в ионосферу являются внутренние волны различных масштабов. Описанное выше “улучшение” проникновения таких волн через барьер циркуляции в средней атмосфере в результате температурных трендов может очень значительно усилить “влияние снизу”. Не исключено, что уже сейчас надо пересматривать учет влияния метеорологической обстановки на состояние ионосферы (особенно области D) в моделях и алгоритмах, используемых для прогноза состояния ионосферы и условий распространения радиоволн в прикладных задачах.

### 3. ТЕРМОСФЕРА

#### 3.1. Плотность атмосферы на спутниковых высотах

Первые указания на то, что анализ орбит спутников показывает, что плотность термосферного газа  $r$  систематически уменьшается, были представлены Keating et al. [2000]. Эти данные были подтверждены в работах [Emmert et al., 2004; Marcos et al., 2005]. Все три группы результатов хорошо согласовались между собой и давали отрицательный тренд плотности на 400 км в пределах 1.7–7.4% за десятилетие.

В дальнейшем аналогичный анализ проводился и другими группами авторов, и в настоящее время вывод об уменьшении плотности термосферы основывается на анализе более чем 10000 спутниковых орбит. В результате этого анализа выяснилось, что магнитуда отрицательных трендов  $r$  сильно меняется с уровнем солнечной активности. Отрицательный тренд минимален при высокой активности (–(1–2)% за десятилетие) и может достигать –8% в период солнечного минимума [Solomon et al., 2018].

Вряд ли нужно пояснять, что точное знание плотности атмосферы на спутниковых высотах жизненно важно для целого ряда прикладных задач – организации наблюдений за конкретными

объектами, планирование времени их жизни в атмосфере, оценки вероятности их столкновения с другими объектами.

Venchiarutti et al. [2016] показали, что уменьшение плотности атмосферы, наблюдаемое уже сейчас, влияет на орбиты космических аппаратов и объектов космического мусора (space debris). Время жизни таких объектов на низких орбитах увеличивается 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.

### 3.2. Концентрация атомного кислорода

Изменение состояния термосферы и средней атмосферы неизбежно должно приводить и к изменению фотохимических параметров термосферы, в частности – состава термосферного газа. Наибольший интерес представляет изменение количества атомного кислорода, поскольку он играет большую роль в формировании ионосферных слоев  $F1$  и  $F2$ , а также в ряде других фотохимических процессов.

Данилов и Константинова [2014, 2016] подробно рассмотрели вопрос о трендах величины  $[O]$ . Проанализировав на основании анализа данных вертикального зондирования тренды критической частоты  $foF2$  и связи между  $foF2$  и  $hmF2$ , они пришли к выводу, что происходит систематическое уменьшение концентрации атомного кислорода в термосфере. Это уменьшение на высотах области  $F$  составляет ~10% за десятилетие [Danilov, 2015].

Прикладной аспект этого результата связан с тем, что распределение атомов  $O$  в термосфере определяется скоростью переноса этих атомов вниз через турбопаузу за счет турбулентной диффузии. Если полученный на основании ионосферных трендов вывод об уменьшении  $[O]$  справедлив, это означает, что идет усиление турбулентной диффузии.

По наблюдениям на двух спутниках обнаружена высокая скорость увеличения количества  $CO_2$  на  $h = 80–110$  км, в два раза превышающая скорость роста  $CO_2$  в тропосфере и средней атмосфере (подробнее см. в обзоре Данилова и Константиновой [2020a]). Emmert [2012] предположил, что такое увеличение может быть связано с усилением турбулентной диффузии в области турбопаузы (100–120 км). Garsia et al. [2014] показали, что для объяснения такого увеличения  $[CO_2]$  с помощью модели WACCM необходимо предположить, что

коэффициент турбулентной диффузии  $K_{zz}$  растет со скоростью ~30% за десятилетие. На необходимость увеличения  $K_{zz}$  в модели WACCM для объяснения увеличения  $[CO_2]$  указывали также Yue et al. [2016] и Liu H.-L. et al. [2018]. Очень может быть, что описанные выше оценки уменьшения количества атомов  $O$  на основании ионосферных трендов как раз и дают усиление турбулентной диффузии, которое необходимо для решения проблемы высоких трендов  $CO_2$  на 80–110 км.

### 3.3. Температура ионов

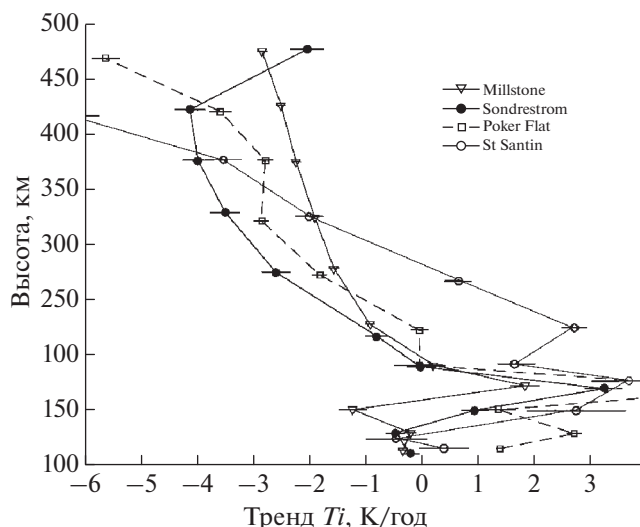
Результаты измерения температуры ионосферы  $Ti$  на установках некогерентного рассеяния (НР) дали неожиданно высокие величины отрицательных трендов  $Ti$  (2–5 К в год) во всей толще ионосферы, кроме слоя  $F1$ , где тренд оказался положительным. Следует сразу подчеркнуть, что измерения методом НР дают температуру ионов. Вопрос о том, равна ли температура нейтрального газа в термосфере температуре ионной составляющей, обсуждается с начала измерений методом НР, но, к сожалению, не решен окончательно и по сей день. Во всех работах, однако, принимается, что  $Tn = Ti$ , но крайней мере ниже 300 км, и поэтому на основании данных НР можно говорить об охлаждении термосферного газа в области  $F$  и ниже.

Поскольку высокие тренды  $Ti$ , полученные методом НР (прежде всего, в Millstone Hill) [Zhang and Holt, 2013], вошли в явное противоречие с данными о трендах плотности, описанными выше, вокруг этой проблемы развернулась широкая дискуссия. Опуская здесь эту дискуссию (она подробно описана в обзоре Данилова и Константиновой [2020a]), отметим, что на сегодня высокие тренды  $Ti$  получены на пяти установках НР.

Zhang et al. [2016a, 2016b] подробно рассмотрели результаты наблюдений на четырех установках НР (Millstone Hill, Chatanika (Poker Flat), Sondrestrom и Saint Santin), и подтвердили наличие высоких отрицательных трендов  $Ti$  (см. рис. 3) выше 200 км. В то же время, эти наблюдения дают высокие положительные тренды  $Ti$  на высотах слоя  $F1$ .

Результаты измерений  $Ti$  на установке EISCAT (Trömsö, Норвегия), не вошедшие в сводку измерений на рис. 3, также дают большие (более 10 К за десятилетие) отрицательные тренды  $Ti$  выше 220 км и большие положительные тренды в слое  $F1$ .

Таким образом, заключения о высоких трендах ионной температуры базируются на очень большом количестве измерений. Однако, наблюдения орбит более чем 10000 спутников дают тренды плотности атмосферы, которые соответствуют трендам температуры атмосферы на 400 км ~0.2 К в год [Emmert, 2015]. Наблюдающееся противоречие вызывает горячие споры. Од-



**Рис. 3.** Дневные (12:00 LT ± 3 ч) тренды  $T_i$  по измерениям на четырех установках НР (Millstone Hill, Saint Santin, Chantanka (Poker Flat) и Sonderstrom) согласно Zhang et al. [2016b].

ним из решений проблемы может быть предположение, что (вопреки принятым представлениям) температуры ионов и нейтральных частиц на рассматриваемых высотах не равны.

Сильные отрицательные тренды температуры ионов в ионосфере выше максимума слоя  $F_2$ , измеренные методом НР и достигающие 50–60 К за десятилетие (см. рис. 3) должны уже сейчас влиять на работы систем глобального позиционирования и, несомненно, будут влиять в обозримом будущем, если будет происходить дальнейшее усиление отрицательных трендов  $T_i$ .

Изменение  $T_i$  должно неизбежно сказываться и на важнейшем параметре ионизационно-рекомбинационного цикла в ионосфере — эффективном коэффициенте рекомбинации  $\alpha_{\text{эф}}$ , поскольку определяющие его фотохимические процессы сильно зависят от температуры ионов.

#### 4. ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ

Роль состояния ионосферы в решении многочисленных задач, связанных с распространением радиоволн различных диапазонов, очевидна и пояснения не требует. Ионосферная информация составляет большую долю общего количества информации, выдаваемой любой службой космической погоды потребителям, поэтому вопрос о трендах параметров ионосферных слоев имеет особенно большое прикладное значение. Проблема ионосферных трендов сложна, и ее описание выходит за рамки данной статьи. Мы вновь отсылаем читателя к недавнему обзору Данилова и Константиновой [2020a], а ниже ограничимся лишь указанием на прикладные аспекты измене-

ний, которые происходят в различных ионосферных параметрах.

##### 4.1. Область D

В самой нижней части ионосферы (область D) все исследования приводят к одному и тому же выводу — концентрация электронов в области D увеличивается и это приводит (в силу специфики вертикального профиля  $[e]$ ) к тому, что уровни заданной электронной концентрации монотонно уменьшаются.

Данилов и Смирнова [1999] получили положительный тренд  $N_e$ , анализируя результаты всех опубликованных ракетных измерений. Результаты анализа собственных ракетных измерений  $N_e$  в области D австрийской группы авторов [Friedrich and Torkar, 2001] были позже подтверждены Friedrich and Pock [2016]. Был получен положительный тренд  $N_e$  на высотах 75–95 км, равный 1% в год. Причина наблюдаемого поведения области D со временем ясна в рамках концепции оседания и охлаждения атмосферы. Вертикальный профиль величины  $N_e$  в области D монотонно растет. Сама величина электронной концентрации жестко привязана к плотности нейтральной атмосферы, поскольку определяется фотохимическими процессами с участием основных нейтральных компонент ( $N_2$  и  $O_2$ ). Таким образом, если происходит оседание атмосферы, вертикальный профиль  $N_e$  смещается вниз, и при этом очевидным образом на каждой фиксированной высоте величина электронной концентрации повышается.

Увеличение концентрации электронов на фиксированных высотах нижней ионосферы бы-



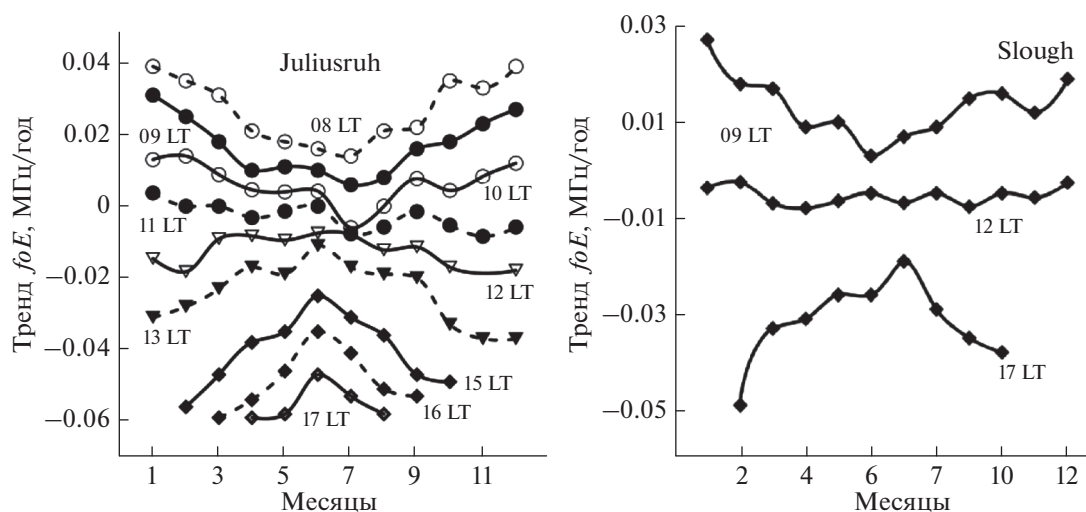


Рис. 4. Изменение трендов  $foE$  на ст. Juliusruh (а) и Slough (б) с LT и сезоном.

ло впервые получено также и по наблюдениям отражения радиоволн на фиксированных частотах [Таубенхайм и др., 1988; Taubenheim et al., 1990]. В дальнейшем подобные измерения методом стандартных фазовых высот проводились в течение двух десятилетий. Подробное описание метода и результатов можно найти в работе [Peters and Entzian, 2015].

Положительные тренды  $Ne$  в области  $D$  получены по измерениям высоты отражения радиоволн СДВ-диапазона (24.0 кГц) [Clilverd et al., 2017]. Измерения показали, что с 1971 по 2016 гг. эта высота уменьшилась на 3 км. В ДВ-диапазоне получено уменьшение высоты отражения на 114 м за десятилетие [Peters et al., 2017]. В силу специфики высотного профиля электронной концентрации в нижней части области  $D$  результаты анализа ракетных данных и результаты, полученные методом распространения радиоволн, прекрасно согласуются между собой. При этом результаты СДВ- и ДВ-измерений дают количественные изменения параметров распространения, что уже сейчас может быть важно для работ систем радиосвязи в этих диапазонах и, несомненно, должно будет учитываться в будущем.

#### 4.2. Область $E$

Тренды критической частоты слоя  $E$ ,  $foE$ , долгое время были предметом дискуссии. Разными исследователями получались как положительные, так и отрицательные тренды. Неожиданные результаты, касающиеся трендов  $foE$ , были получены в работах Данилова и Константиновой [2018] и Danilov and Konstantinova [2019]. Обнаружены тренды критической частоты  $foE$ , которые демонстрируют изменение с сезоном и временем суток. Для двух станций Juliusruh и Slough, имею-

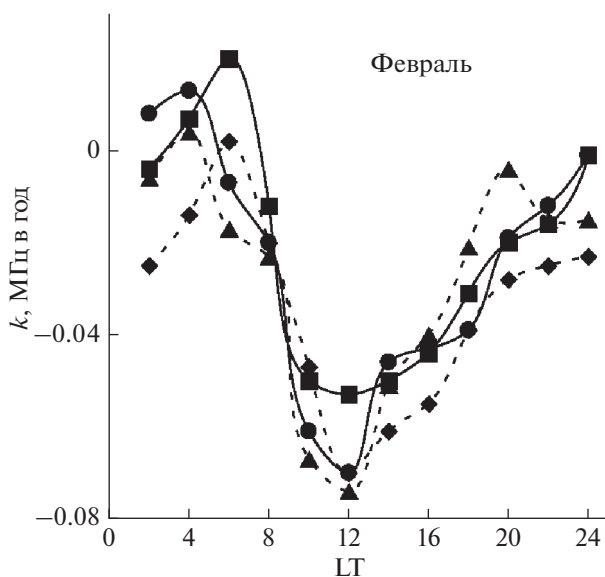
щих близкую широту, в утренние часы величины  $k(foE)$  положительны и достигают 0.02–0.04 МГц в год, в околополуденные часы они малы (по модулю меньше 0.01 МГц в год), а в вечерние часы — отрицательны и достигают минус (0.05–0.06) МГц в год. Эти результаты иллюстрирует рис. 4. Возможно, существование трендов разного знака в разные моменты суток и может объяснить разные результаты, получавшиеся разными авторами.

Изменение со временем критической частоты слоя  $E$  может иметь следующее прикладное значение. Один из распространенных методов (метод Bilitza) нахождения высоты слоя  $F2$ ,  $hmF2$ , из данных вертикального зондирования требует знания  $foE$ . Если эта величина, действительно, существенно изменяется со временем, причем в разные стороны в разные моменты суток, то не учет этого факта может приводить к существенным ошибкам в определении высоты слоя  $F2$ .

#### 4.3. Слой $F2$

Хотя вокруг трендов параметров ионосферного слоя  $F2$  ведется определенная дискуссия, все исследователи приходят к выводу о существовании отрицательных трендов  $foF2$ . Обсуждается лишь магнитуда этих трендов. Мы здесь будем опираться на результаты, полученные в ФГБУ ИПГ Росгидромета и представленные в многочисленных публикациях (мы вновь отсылаем читателя к обзору Данилова и Константиновой [2020a]).

Согласно указанным публикациям в результате анализа данных примерно двадцати ионосферных станций получено, что в слое  $F2$  наблюдаются отрицательные тренды критической частоты  $foF2$  и высоты слоя  $hmF2$ . Тренды  $foF2$  зависят от местного времени (максимальны около полудня)



**Рис. 5.** Зависимость тренда  $k$  от местного времени в феврале для четырех станций: Juliusruh (кружки), Rome (ромбы), Slough (треугольники) и Boulder (квадраты). Согласно Данилову и Константиновой [2020a].

и сезона (зимой выше, чем летом). Примеры суточного хода трендов  $k$  приведены на рис. 5.

Получено, что наибольшие по магнитуде тренды  $foF2$  наблюдаются зимой в околополуденные часы суток и могут достигать минус 0.06–0.08 МГц в год. За 10 лет такие тренды могут приводить к уменьшению  $foF2$  на 0.6–0.8 МГц, что будет составлять 6–8% от средней величины порядка 10 МГц.

Оценивать, насколько указанные тренды важны при решении прикладных задач радиосвязи, должны, естественно, специалисты по распространению радиоволн с учетом конкретных задач и возможностей аппаратуры. Мы приведем один пример такого рода оценок.

Fagre et al. [2018] опубликовали результаты изучения влияния трендов слоя  $F2$  на условия распространения радиоволн коротковолнового диапазона. Используя классический метод описания распространения радиоволн в ионосфере (так называемый метод “ray tracing”), они прове-

ли расчеты изменения дальности  $R$  и высоты  $h$  отражения радиоволн различных частот при наклонном падении на ионосферу под разными углами  $\alpha$  при уменьшении концентрации электронов в области  $F$  на 1% и 5%.

Результаты приведены в таблице 1, взятой из работы [Fagre et al., 2018]. Эта таблица показывает, что при указанных изменениях  $N_e$  изменяется расстояние до точки прихода радиолуча  $R$  и высоты отражения  $h$  для различных частот при постоянном угле излучения  $\alpha$  и для разных углов  $\alpha$  при постоянной частоте 17.0 МГц. Максимальный эффект наблюдается при постоянной величине  $\alpha$ : на частоте 17.5 МГц величина  $h$  увеличивается на 7 км, а на частоте 18.8 МГц величина  $R$  растет на 147 км.

Этот результат особенно важен для работы служб космической погоды, 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.

Следует упомянуть еще об одном результате, полученном недавно (Данилов и Константинова [2020б], Данилов [2021]). Речь идет о том, что наиболее часто используемый индекс солнечной активности  $F10.7$  плохо описывает изменение солнечного ультрафиолета, определяющего поведение ионосферы, в 24-м цикле солнечной активности. Этот результат важен в прикладном плане потому, что в подавляющем большинстве прогностических моделей и программ, используемых для прогноза распространения радиоволн, входным параметром является именно  $F10.7$ . Анализ трендов  $foF2$  в 22, 23 и 24-м циклах СА позволил предложить эффективные величины  $F10.7$ , которые целесообразно использовать в ионосферных моделях при анализе условий распространения радиоволн в 24-м цикле.

#### 4.4. Полное содержание электронов

Неоднократно делались попытки выделить долговременные тренды полного 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 сложной задачей.

Положительные тренды ТЕС, опубликованные Lean et al. [2011], признаны ошибочными [Laštovička, 2018]. В настоящее время установлено

**Таблица 1.** Изменение дальности  $R$  и высоты отражения  $h$  в км для радиотрасс на разных частотах при разных величинах  $N_e$

	$f = 17.0$ МГц		$f = 17.5$ МГц		$f = 18.0$ МГц	
	$R$	$h$	$R$	$h$	$R$	$h$
1.0 $N_e$	1555	183	1605	188	1697	195
0.99 $N_e$	1561	185	1637	189	1736	197
0.95 $N_e$	1611	188	1699	195	1844	201



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)). Emmert et al. [2017] привел тренд ТЕС, равный  $-19.3\% \pm 1\%$  между двумя соседними минимумами солнечной активности. Одна из попыток выделить долговременные тренды ТЕС описана Laštovička et al. [2017]. Они получили, что есть тенденция уменьшения ТЕС со временем, но не смогли получить надежных величин трендов.

Поскольку величины ТЕС жизненно важны для планирования и работы большого числа систем, связанных с распространением радиоволн через ионосферу, понятна и важность знания трендов ТЕС. Так как непосредственное определение этих трендов связано, как указано выше, с определенными инструментальными трудностями, тренды критической частоты слоя  $F2$ , т.е. концентрации электронов в максимуме слоя  $NmF2$ , могут оказаться востребованными при определении трендов ТЕС.

Для четырех станций вертикального зондирования (ВЗ) Европейского региона была рассчитана “приведенная толщина” (slab thickness) ионосферы (отношение VTEC (полное содержание электронов в вертикальном столбе ионосферы) к  $NmF2$ ) и были определены ее тренды [Jakowsky et al., 2016]. 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  $foF2$  и с упомянутыми выше оценками отрицательных трендов ТЕС. Специалисты по системам спутниковой навигации и ориентации должны оценить, насколько такое систематическое уменьшение “приведенной толщины” ионосферы должно учитываться уже сейчас или в обозримом будущем.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня является общепринятым, что происходит охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы. Этот процесс приводит к долговременным изменениям (трендам) различных параметров как нейтрального газа, так и ионосферной плазмы. Некоторые из этих трендов достаточно надежно установлены уже сейчас. По поводу других ведется дискуссия. Многие из этих изменений атмосферных и ионосферных параметров приводят или могут приводить в самом ближайшем будущем к результатам, которые должны влиять на важные прикладные проблемы, особенно связанные со службой космической погоды, т.е. с диагностикой и прогнозированием состояния средней и верхней атмосферы и ионосферы с выходом на практические вопросы распространения радиоволн.

В этой работе мы постарались отметить те тренды параметров в средней атмосфере, термосфере и ионосфере, которые, на наш взгляд, уже сейчас имеют выход на прикладные задачи.

В средней атмосфере к таким трендам мы отнесли увеличение количества паров воды, которое, в силу важной роли, которую играют соединения семейства ОНх в фотохимии озона, может существенно повлиять на дальнейшую судьбу озонового слоя. Кроме того, обнаруженные тренды паров воды объясняют увеличение PMSE, которые регистрируются, в том числе и военными радарными.

Там же из-за трендов температуры происходит изменение системы горизонтальных ветров и усиление проникновения внутренних волн из тропосферы в ионосферу. А это должно приводить к существенному усилению “метеорологического контроля” ионосферы, что придется учитывать в прогностических моделях ионосферы и условий распространения радиоволн.

Полученные по анализу орбит спутников тренды плотности на спутниковых высотах уже сейчас приводят к увеличению времени жизни объектов “космического мусора” и повышению вероятности их столкновения с космическими аппаратами. Эти тренды ведут к уменьшению плотности, которые, вероятно, в ближайшее время придется учитывать при планировании дальнейших запусков таких аппаратов.

Отрицательный тренд количества атомного кислорода в термосфере указывает, скорее всего, на усиление турбулентной диффузии в области турбопаузы. Уже сейчас такое усиление требуется для согласования модельных расчетов со спутниковыми измерениями трендов  $CO_2$  на 80–110 км. Видимо, это потребует корректировки термосферных моделей, используемых для многих прикладных задач.

Сильные отрицательные тренды температуры ионов в ионосфере выше максимума слоя  $F2$ , измеренные методом НР и достигающие 50–60 К за десятилетие, могут уже сейчас влиять на работы систем глобального позиционирования и, несомненно, будут влиять в обозримом будущем, если будет происходить дальнейшее усиление отрицательных трендов  $T_i$ .

Еще более наглядными примерами влияния трендов ионосферных параметров на работу спутниковых навигационных систем являются тренды полного содержания электронов (ТЕС) и приведенной толщины ионосферы. Очевидно, что оба эти параметра прямо связаны с корректировкой систем позиционирования и других систем, базирующихся на приеме сигналов с навигационных спутников.

Надежно определяемые тренды электронной концентрации в области  $D$  показывают, что про-

исходит “опускание” уровней постоянных величин  $N_e$ . А это уже сейчас должно учитываться при анализе работ систем, использующих распространение радиоволн СДВ- и ДВ-диапазонов.

Обнаруженные недавно особенности трендов критической частоты слоя  $E$ ,  $foE$ , должны учитываться при использовании  $foE$  в расчетах высоты слоя  $F2$  из данных вертикального зондирования.

Тренды критической частоты слоя  $F2$  могут уже в ближайшее время привести к изменениям  $foF2$ , превышающим 1–5% от средней величины. Как показывают расчеты, такие изменения значительно влияют на параметры радиотрасс КВ-диапазона.

Когда данная статья была уже сдана в печать, были опубликованы результаты работы группы ведущих ученых NASA, посвященные тем же проблемам [Mlynczak et al., 2021]. Их статья начинается с фразы: “Происходящие климатические изменения в средней и верхней атмосфере Земли будут влиять на быстро развивающиеся космический и телекоммуникационный сектор”. В статье подчеркивается, в частности, что уменьшение плотности атмосферы на спутниковых высотах должно приводить к существенному изменению времени жизни объектов космического мусора и ухудшению работы многих важных спутниковых систем. Говорится также о том, что тренды малых составляющих в средней атмосфере (прежде всего, воды) могут существенно влиять на весь цикл фотохимических процессов в этой области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брасье Г., Соломон С. Аэрномия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 416 с. 1987.
- Данилов А.Д. Индексы солнечной активности в 24-м цикле и поведение слоя  $F2$  ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 2. С. 218–223. 2021.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Уменьшение атомного кислорода в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 2. С. 239–245. 2014.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Изменение связи между  $foF2$  и  $hmF2$  со временем // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 5. С. 612–614. 2016.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Суточные и сезонные вариации трендов критической частоты слоя  $E$  // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 5. С. 653–661. 2018.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 4. С. 411–435. 2020а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды параметров слоя  $F2$  и 24-й цикл солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 5. С. 619–630. 2020б.
- Данилов А.Д., Смирнова Н.В. Долговременные тренды электронной концентрации в области  $D$ : экспериментальные данные // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39. № 2. С. 107–112. 1999.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат. 271 с. 1987.
- Таубенхайм И., фон Коссарт Г., Ентциан Г. Глобальные изменения климата и нижняя ионосфера // Тез. 3-го Семинара КАПГ по метеорологическим эффектам в ионосфере (София, 31 октября–4 ноября 1988 г.).
- Beig G. Overview of the mesospheric temperature trend and factors of uncertainty // Phys. Chem. Earth. V. 27. P. 509–519. 2002.
- Beig G. Trends in temperature of the mesosphere and its linkages with stratosphere // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- Clilverd M.A., Duthie R., Rodger C.J., Hardman R.L., Yearby K.H. Long-term climate change in the  $D$ -region // Sci. Rep.-UK. V. 7. P. 16683. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16891-4>
- Danilov A.D. Seasonal and diurnal variations in  $foF2$  trends // J. Geophys. Res. V. 120. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020971>
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Diurnal and seasonal variations in long-term changes in the  $E$ -layer critical frequency // Adv. Space Res. V. 63. P. 359–370. 2019.
- Deng Y. Impact of NO Cooling and gravity wave on the long-term trend in the upper atmosphere: GITM simulations // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- Emmert J.T., Mannucci A.J., McDonald S.E., Vergados P. Attribution of interminimum changes in global and hemispheric total electron content // J. Geophys. Res. – Space. V. 122. P. 2424–2439. 2017.
- Emmert J.T. Thermospheric density climate and climate changes // Paper presented at the 7th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos-Aires, Argentina, September 11–14, 2012).
- Emmert J.T. Altitude and solar activity dependence of 1967–2005 thermospheric density trends derived from orbital drag // J. Geophys. Res. V. 120. P. 2940–2950. 2015.
- Emmert J.T., Fejer B.G., Fesen C.D., Sheperd G.G., Solheim B.H. Climatology of middle- and low-latitude daytime  $F$ -region disturbance in neutral wind measured by Wind Imaging Interferometer (WINDII) // J. Geophys. Res. V. 106. V. 24. P. 701–706. 2001.
- Emmert J.T., Picone J.M., Lean J.L., Knowles S.H. Global change in the thermosphere: compelling evidence of a secular decrease in density // J. Geophys. Res. V. 109. (A02301). 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JA010176>
- Fagre M., Zossi B.S., Saavedra Z., Elias A.G. On some consequences of upper atmosphere cooling over HF signal propagation // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- Friedrich M., Torkar K.M. Long-term trends and other residual features of the lower ionosphere // Proc. 15<sup>th</sup> ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programs and Related Research, Biarritz, France, 28–31 May 2001 (ESA SP-471, August 2001).
- Friedrich M., Pock Ch. Long-term trends in mesospheric electron densities // Paper presented at the 9th Workshop

- on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Garcia R., Lopez-Puertas M., Funke B., Kinnison D.E., Marsh D.R., Smith A.K., Gonzales-Galindo F.* On the distribution of CO<sub>2</sub> and CO in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* V. 119. P. 5700–5718. 2014.
- *Hoffmann P., Chau J.L.* Trends in mesospheric winds and gravity waves at Northern middle and polar latitudes // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Jacobi Ch., Geissler Ch., Lilienthal F., Krug A.* Long-term trends of mesosphere/lower thermosphere prevailing winds at northern midlatitudes // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Jakowsky N., Hoque M.M., Mielich J., Hall Ch.* Equivalent slab thickness of the ionosphere over Europe as an indicator of long-term changes in the thermosphere // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Keating G. M., Tolson R.H., Bradford M.S.* Evidence of long term global decline in the Earth's thermospheric densities apparently related to anthropogenic effects // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. P. 1523–1526. 2000.
- *Laštovička J.* A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 163. P. 2–13. 2017.
- *Laštovička J.* A review of progress in trends in the mesosphere-thermosphere-ionosphere system // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G. et al.* Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // *Ann. Geophysicae.* V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008.
- *Laštovička J., Urbar J., Kozubek M.* Long-term trends in the total electron content // *Geophys. Res. Lett.* V. 44. P. 8168–8172. 2017.
- *Latteck R.* Long-term changes of polar mesospheric summer echoes at Andoya // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Lean J., Emmert J.T., Picone J.M., Meier R.R.* Global and regional trends in ionospheric electron content // *J. Geophys. Res.* V. 116. A00H04. 2011. doi 10.1029/2010JA016378
- *Liu H.-L., Bardeen C.G., Foster B.T., Lauritzen P., Liu J., Lu G., Wang W.* Development and validation of the Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere extension (WACCM-X 2.0) // *J. Adv. Modeling Earth Syst.* V. 10. P. 381–402. 2018.
- *Liu X., Yue J., Xu J., Garcia R.R., Russell III J.M., Mlynczak M., Wu D. L., Nakamura T.* Variations of global gravity waves derived from 14 years of SABER temperature observations // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Lübken F.-J., Berger U., Baumgarten G.* On the anthropogenic impact on long-term evolution of noctilucent clouds // *Geophys. Res. Lett.* V. 45. P. 6681–6689. 2018a.
- *Lübken F.-J., Berger U., Baumgarten G.* On the anthropogenic impact on long term evolution of noctilucent clouds // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018b).
- *Marcos F.A., Wise J.O., Kendra M.J., Grossbard N.J., Bowman B.R.* Detection of a long-term decrease in thermospheric neutral density // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L04103. 2005.  
<https://doi.org/10.1029/2004GL021269>
- *Mlynczak M., Hunt L., Yue J., Solomon S.* Trends in upper atmosphere energetics and composition – past, present, and future // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Mlynczak M.G., Yue J., McCormack J., Liebermann R.S., Livesey N.J.* An observational gap at the edge of space // *Eos.* № 102. 2021.  
<https://doi.org/10.1029/2021EO155494>
- *Nath O.* Seasonal, interannual and long-term variabilities and tendencies of water vapor in the upper stratosphere and mesospheric region over tropics (30° N–30° S) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 167. P. 23–29. 2018.
- *Peters D.H.W., Entzian G.* Long-term variability of 50 years of standard phase height measurements at Kühlungsborn, Germany // *Adv. Space Res.* V. 55. P. 1764–1774. 2015.
- *Peters D.H.W., Entzian G., Keckhut P.* Mesospheric temperature trends derived from standard phase-height measurements // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 163. P. 23–30. 2017.
- *Portnyagin Yu.I., Merzlyakov E.G., Sokolova T.V., Jacobi T.V., Kurschner D., Manson A., Meek C.* Long-term trends and year-to-year variability of midlatitude mesosphere/lower thermosphere winds // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. P. 1890–1901. 2006.
- *Ratnam M.V.* Long-term variability in UTLS aerosols and trace gases over Indian region observed by ground based and space borne measurements // Paper presented at the 10th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Reid I., Spargo A., Murphy D.* Long-term observations of the MLT region at Adelaide (34.6° S) and Davis Station (68.6° S) // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Sharma S., Chandra H., Vaishnav R.* Long-term middle atmosphere trends observed by lidar and satellite over subtropical location during 1997–2016 // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Solomon S., Liu H., Marsh D., McInerney J., Qian L., Vitt F.* Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Su Y., Yue J., Hervig M., Marshall T., Smith A., Garcia R., Guo D., Guo S., Siskind D., Russell III J.* Carbon dioxide in the polar stratosphere from AIM/SOFIE // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).

- *Taubenheim J., von Cossart G., Eintzian G.* Evidence of CO<sub>2</sub>-induced progressive cooling of the middle atmosphere derived from radio observations // *Adv. Space Res.* V. 10. № 10. P. 171–174. 1990.
- *Vencharutti V., Zossi M., Elías G.* The effect of neutral density long term variation on satellite lifetime using a simple classical mechanics formulation // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Yue J., Jan Y., Rezac L., Garsia R., Lopez-Puertas M., Mlynczak M., Russel J.* Increasing carbon dioxide concentration in the upper atmosphere observed by SABER // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016).
- *Yue J., Rezac L., Yongxiao J., Russell III J.M., Garcia R., Lopez-Puertas M., Mlynczak M.G.* On long-term trends of SABER CO<sub>2</sub> with WACCM (forward modeling) // Paper presented at the 10th Workshop on long-term changes and trends in the atmosphere (Hefei, China, May 14–18, 2018).
- *Zhang S.-R., Holt J.M.* Long-term ionospheric cooling: Dependency on local time, season, solar activity, and geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* V. 118. № 6. P. 3719–3730. 2013.
- *Zhang S.R., Holt J.M., Erickson P.J., Goncharenko L.P., Nicolls M.J., McCready M., Kelly J.* Ionospheric ion temperature climate and upper atmospheric long-term cooling // *J. Geophys. Res.* V. 121. № 9. P. 8951–8968. 2016a.
- *Zhang S.R., Holt J.M., Erickson P., Goncharenko L., Nicolls M., McCready M., Kelly J.* Strong ionospheric long-term cooling measured by multiple incoherent scatter radars // Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016b).