



ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ISSN 2304-7380

УДК 550.385

Поступила в редакцию10.01.2018 г.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНЫХ СЛОЕВ

А. Д. Данилов, А. В. Константинова

Приводится обобщение серии публикаций авторов, касающейся долговременных вариаций (трендов) ионосферных слоев *F*2, *E* и *D*. Приведены основные результаты, полученные для каждого слоя, и описывается концепция, разработанная авторами, и используемая для выделения указанных трендов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ТРЕНДЫ

1 ВВЕДЕНИЕ

Авторы данной работы в течение многих лет занимались исследованием трендов параметров ионосферных слоев с помощью разработанного ими же метода. Результаты этих исследований были опубликованы в различных журналах (как отечественных, так и зарубежных). Нам представляется, что отдельные результаты, которым посвящены конкретные статьи, разбросанные по времени и различным журналам, в совокупности представляют собой некую единую систему взглядов, основанных на едином подходе и описывающих различные аспекты долговременных изменений параметров ионосферных слоев.

Исходя из сказанного нам показалось разумным и нужным свести эти результаты в одну публикацию, кратко повторяя и (если необходимо с учетом прошедшего времени) комментируя основные результаты, но опуская детали и неизбежные повторы от статьи к статье. Это и является мотивом написания данной статьи.

По мере технологического развития Человечества все более важным становится знание характеристик верхних слоев атмосферы, ионосферы, магнитосферы и околоземного космического пространства. Если в первой половине прошлого года эти образования интересовали лишь ученых с чисто познавательными целями, то в наши дни можно перечислить добрый десяток прикладных направлений человеческой деятельности, для которых знание (включая диагностику и прогноз) состояния указанных характеристик является жизненно важным. Не отвлекаясь на перечисление всех таких направлений, отметим только, как самые яркие примеры, работу спутниковых навигационных систем для которых необходимо знание полного содержания электронов (ПСЭ) в столбе ионосферы и радиосвязь в КВ диапазоне, которая требует знания характеристик «основного ионосферного зеркала» слоя F2.

Изучение трендов параметров ионосферных слоев представляет большой интерес по двум основным причинам. Во-первых, знание состояния ионосферы, как уже сказано выше, важно для решения целого ряда задач, связанных с распространением радиоволн различных диапазонов. Даже если пока изменения характеристик ионосферных слоев невелико, важно знать тенденцию их изменения, чтобы предвидеть, какие эффекты в распространении радиоволн следует ожидать в будущем. Во-вторых, ряды наблюдений ионосферных параметров методом вертикального зондирования для многих ионосферных станций насчитывают уже 60 лет (а для станций Slough и Томск еще больше) и являются наиболее длинными рядами однородных наблюдений атмосферных параметров. Анализируя эти наблюдения можно надеяться получить информацию не только о долговременных трендов параметров самой ионосферы, но и об изменении аэрономических

Данилов Алексей Дмитриевич, д.ф-м.н., зав.лаб. ФГБУ«ИПГ», adanilov99@mail.ru Константинова Анна Владимировна, с.н.с, ФГБУ«ИПГ», anna@tabulata.ru

параметров нейтральной атмосферы. Ниже будет описано как на основании наблюдений критической частоты foF2 был сделан вывод об уменьшении количества атомного кислорода в термосфере и усилении турбулентной диффузии в области турбопаузы. Отметим еще работу [Danilov, 2008], в которой на основании анализа трендов величины foF2 днем и ночью (foF2(02)/foF2(14)) было получено, что тренды этого отношения вызваны трендом зонального ветра в термосфере, а именно – усилением ветра на восток.

В течение последнего десятилетия все большее внимание привлекает проблема долговременных изменений (трендов) параметров средней и верхней атмосферы, вызванных увеличением в атмосфере количества парниковых газов, прежде всего – CO₂. В тропосфере это увеличение приводит к постепенному нагреву атмосферного газа (так называемое «глобальное потепление»), тогда как в средней и верхней атмосфере оно приводит к прямо обратному эффекту – охлаждению атмосферного газа. В результате неизбежны изменения характеристик верхней атмосферы, которые являются предметом многочисленных публикаций и дискуссий на международных форумах. Не отвлекаясь на подробное описание этой сложной проблемы, отсылаем читателя к недавней статье Laštovička [2017], в которой просуммировано положение дел по результатам обсуждения проблемы на 9-м Симпозиуме по трендам в атмосфере (Германия, сентябрь 2016 г.).

Ионосфера образуется за счет ионизации атомов и молекул термосферы и области MLT (мезосфера и нижняя термосфера) солнечным коротковолновым излучением. Очевидно, что изменения в параметрах нейтральной атмосферы, вызванных увеличением количества CO₂, не могут не сказаться на состоянии ионосферы, причем по-разному для разных ионосферных слоёв.

В данной статье мы опишем результаты исследований касающихся трендов параметров ионосферных слоев F2, и E. Мы не претендуем на обзор всей проблемы ионосферных трендов, сделав акцент на сжатое описание результатов наших публикаций за предыдущие 7 лет, однако проведем краткое сравнение с работами наиболее известных групп исследователей, занимающихся этой проблемой. Кроме того, мы кратко опишем результаты анализа трендов ионосферной области D, в котором один из авторов данной работы также принимал участие.

2 МЕТОД АНАЛИЗА

Для анализа трендов параметров ионосферных слоев F2 и E в работах авторов использовался один и тот же метод. Небольшие изменения происходили лишь в выборе индекса солнечной активности, который использовался для устранения эффекта последней из исходных данных (см. ниже).

В качестве исходных данных использовались результаты вертикального зондирования на глобальной сети ионосферных станций, для которых имелись ряды наблюдений достаточной длины. На большинстве станций наблюдения начались в период МГГ в 1957–1958 гг. Метод определения трендов в нашем методе базируется на основном предположении о том, что до 1980 г. не было трендов *foF2* или *hmF2*. Поэтому период 1957/1958 – 1980 гг. (ниже для краткости мы будем писать 1958–1980 гг., имея в виду, что если имелись данные за 1957 г., они тоже включались в анализ) использовался для построения регрессионной зависимости *foF2* и *hmF2* от индекса солнечной активности *F*10.7.

Кратко остановимся на предположении о том, что до 1980 г. не было существенных трендов параметров слоя F2. Это предположение подробно обсуждается в [Данилов, 2012] и основывается на полученных авторами резких изменениях ряда параметров слоя F2 после 1980 г. Наиболее наглядный пример, взятый из работы Данилова и Ваниной-Дарт [2010], приведен на рис. 1. Он показывает, что параметр S, характеризующий поведение *foF2* (за деталями мы отсылаем читателя к указанной работе), остается практически неизменным до 1975–1980 гг., но резко меняет свое поведение после этого периода. На начало изменений параметров слоя F2 около 1980 г. указывают и данные измерений методом HP. Рисунок 2, основанный на данных установки HP в Saint-Santin, наглядно иллюстрирует этот факт. Zhang and Holt [2011] также подчеркивали, что три группы данных (включая и измерения в Saint-Santin) дают начало изменений в слое F2 около 1980 г. Пример аналогичной ситуации для слоя E будет приведен ниже в параграфе 3.

8



Рис. 1. Изменение со временем параметра *S* (ст. Свердловск, январь-февраль)

Для периода 1958–1980 гг., который в нашем методе считается «эталонным», строилась зависимость *foF2* или *hmF2* от индекса солнечной активности *F*10.7. Эта зависимость, как правило, была хорошо выражена и имела высокий коэффициент определенности R^2 , превышающий 0.9 и дающий статистическую значимость по критерию Фишера более 95% (в большинстве случаев – около 99% и выше). Пример «эталонной» зависимости для ст. Slough, февраля месяца и 1000 LT приведен на рис. 3, взятом из работы Данилова [2012].



Рис. 2. Изменения ионной температуры со временем по измерениям на установке НР в Saint-Santin согласно Donaldson et al. [2010].



Рис. 3. Пример зависимости foF2 от F10.7 для «эталонного» периода 1958-1980 гг.

Для периода после 1980 г. находились отклонения $\Delta foF2$ или $\Delta hmF2$ измеренных величин foF2 или hmF2 от указанной эталонной зависимости для каждого года. Эти величины сглаживались с окном в 11 лет, и полученные сглаженные величины наносились на график как функция года. Наклон линейной аппроксимации полученной зависимости давал искомый тренд k(fo) или k(hm). Пример изменения $\Delta foF2$ для ст. Slough для июня–июля по данным системы SPIDR (см. ниже следующий параграф) приведен на рис 4.



Рис. 4. Пример изменения *ΔfoF2* на ст. Тотsk для июня-июля и 1400 LT.

Как видно из рис. 4, уменьшение $\Delta foF2$ со временем хорошо выражено и статистически значимо (величина R^2 соответствует при имеющемся количестве точек уровню достоверности, превышающему 99%).

3 ТРЕНДЫ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F2

Наибольшее количество исследований трендов было выполнено для параметров *foF2* и *hmF2*. Значительная серия таких исследований была выполнена Даниловым и Ваниной-Дарт [2008a, 20086, 2009, 2010] и Даниловым и Константиновой [2013a, 20136, 2014, 2015a, 20156, 2016a, 20166]

3.1 Анализ данных системы SPIDR

Данные по foF2 и hmF2 брались в описываемой системе работ из двух источников: системы SPIDR и банка медианных данных Damboldt and Suessmann [2012]. Оба источника проверялись на

наличие заведомо ложных значений и проводилась соответствующая «чистка» данных (подробнее см. Данилов и Константинова [2013a, 20136, 2015a]). Данные системы SPIDR анализировались для двух моментов времени (1400 LT и 2 часа после захода Солнца (ss+2)). Последний момент был выбран потому, что именно в это время ночи можно ожидать наибольшего влияния динамических процессов (вертикального дрейфа) на *foF2* и *hmF2*. В качестве индикатора солнечной активности при анализе данных системы SPIDR использовался среднегодовой индекс F10.7. Медианные данные использовались для нахождения сезонной и суточной зависимости трендов (см. ниже).

Результаты анализа данных системы SPIDR показали наличие отрицательных трендов *foF2* и *hmF2* для всех рассмотренных станций и ситуаций (1400 LT, SS+2, Лето, Зима).

Сводка трендов критической частоты слоя F2, k(foF2), опубликованная в работах [Данилов и Константинова, 2013a; Danilov and Konstantinova, 2013] для четырех указанных выше ситуаций приведена в табл. 1. Соответствующие столбцы показывают начало и конец линейного тренда. Видно, что, хотя имеется разброс величин тренда для разных станций, удается получить средние величины для каждой ситуации с допустимым стандартным отклонением (SD).

| H | | _ | | | | | | | | _ | | |
|-------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|
| | SS_Л | | | 14_Л | | | SS_3 | | | 14_3 | | |
| Станция | Нач. | Кон. | Тренд |
| Boulder | 1990 | 2005 | -0.014 | 1990 | 2002 | -0.015 | 1990 | 2003 | -0.053 | 1990 | 2003 | -0.046 |
| Rome | 1994 | 2005 | -0.041 | 1994 | 2005 | -0.011 | 1990 | 2003 | -0.079 | 1994 | 2005 | -0.072 |
| Juliusruh | 1990 | 2005 | -0.014 | 1994 | 2005 | -0.017 | 1995 | 2003 | -0.051 | 1990 | 2005 | -0.025 |
| Slough | 1990 | 2005 | -0.020 | 1990 | 2002 | -0.022 | 1990 | 2003 | -0.039 | 1990 | 2003 | -0.029 |
| Moscow | 1994 | 2001 | -0.023 | 1994 | 2001 | -0.019 | 1994 | 2001 | -0.041 | 1994 | 2001 | -0.101 |
| Tashkent | 1990 | 2001 | -0.033 | 1995 | 2002 | -0.060 | 1995 | 2001 | -0.053 | 1995 | 2003 | -0.092 |
| Wallops | 1990 | 2003 | -0.054 | 1990 | 2005 | -0.007 | 1990 | 2004 | -0.064 | 1990 | 2003 | -0.027 |
| Ebre | 1997 | 2005 | -0.014 | 1994 | 2001 | -0.020 | 1993 | 2004 | -0.031 | 1993 | 2005 | -0.076 |
| Grahamstone | 1990 | 2005 | -0.030 | 1990 | 2005 | -0.025 | | нет | тренда | 1995 | 2005 | -0.011 |
| Hobart | 1995 | 2004 | -0.032 | | нет | тренда | 1995 | 2004 | -0.029 | 1994 | 2004 | -0.015 |
| Townsville | 1990 | 2003 | -0.053 | 1995 | 2006 | -0.086 | 1993 | 2005 | -0.011 | 1994 | 2005 | -0.006 |
| Tomsk | 1990 | 2001 | -0.038 | 1995 | 2001 | -0.030 | 1995 | 2001 | -0.051 | 1990 | 2001 | -0.025 |
| | | | | | | | | | | | | |
| Средний | | | -0.027 | | | -0.021 | | | -0.050 | | | -0.054 |
| тренд и SD | | | 0.013 | | | 0.014 | | | -0.014 | | | 0.032 |

Основным выводом, следующим из табл. 1, является то, что для всех рассмотренных станций наблюдаются отрицательные тренды foF2 как днем, так и ночью, причем для большинства станций абсолютная величина трендов имеет один порядок величины.

Второй вывод, который хорошо виден при сравнении соответствующих столбцов табл. 1, состоит в том, что зимой величина отрицательных трендов выше, чем летом. Мы вернемся к вопросу о сезонных вариациях k(foF2) ниже.

Данилов и Константинова [20136] тщательно проанализировали имеющиеся ряды данных по высоте слоя F2. В результате анализа удалось найти долговременные тренды hmF2, k(hmF2), для 10 станций. Полученные тренды для всех станций и 4-х ситуаций приведены в табл. 5 указанной работы. В таблице 2 приведены усредненные величины k(hmF2) для каждой станции, а также усредненные по всем 10 станциям величины k(hmF2) для дневных и ночных условий, лета и зимы.

| Таблица 2. У | средненные знач | чения трендов | hmF2 для | 10 станций |
|--------------|-----------------|---------------|------------|------------|
| сог | ласно Данилову | и Константино | овой [2013 | 8б] |

| Станция | - k, км/год | σ, км/год |
|-----------|-------------|-----------|
| Slough | 2.5 | 2.00 |
| Juliusruh | 1.1 | 0.52 |
| Москва | 3.0 | 1.35 |
| Томск | 1.7 | 0.35 |

| Wallops Is. | 2.9 | 1.75 |
|----------------|-----|------|
| Ташкент | 2.4 | 1.13 |
| Norfolk | 0.9 | 0.39 |
| Grahamstone | 2.1 | 0.84 |
| Hobart | 1.3 | 0.39 |
| Point Arguello | 2.2 | 2.58 |
| 1400LT | 2.5 | 1.73 |
| SS+2 | 1.9 | 1.05 |
| Зима | 2.1 | 1.16 |
| Лето | 2.3 | 1.68 |
| | | |

Как видно из приведенной таблицы, для всех рассмотренных станций получены отрицательные величины тренда k(hmF2). При этом для разных станций они несколько различаются и лежат в пределах от 1 до 3 км в год. Данные табл. 2 показывают, что надежность трендов hmF2, получаемых для разных станций, различна. Наиболее статистически надежный тренд получился для станций Томск и Hobart, наименее надежный – для станции Point Arguello.

Результаты соответствующего формального усреднения для дневных и ночных условий (1400 LT и ss+2) и для лета и зимы приведены в четырех нижних строках табл. 2. Видно, что в среднем тренды в дневное время несколько выше, чем после захода Солнца и летом несколько выше, чем зимой. Однако величины среднеквадратичного отклонения σ достаточно велики, поэтому указанный вывод следует считать условным. Если в порядке дискуссии принять, что тренд *hmF*2 днем, действительно, несколько выше, чем через два часа после захода Солнца, когда влияние динамических процессов на *hmF*2 максимально, то мы придем к неизбежному выводу, уже упомянутому выше, что в рассматриваемый период долговременные изменения высоты слоя *F*2 вызываются не только изменением системы горизонтальных ветров, но и изменением фотохимических параметров, вызванных охлаждением и оседанием термосферы. В противном случае величины *k* для момента ss+2 должны были быть заметно больше по абсолютной величине, чем тренды для дневного времени. Вывод об изменении фотохимических параметров будет обсуждаться ниже.

Данилов и Константинова [2013б] получили также, что до начала анализируемого периода на некоторых станциях происходил рост *hmF*2 по сравнению с «контрольным» периодом» 1957–1980 гг. Этот вывод совпадает с результатами работ [Данилов и Ванина-Дарт, 2010; Bremer, 1998], согласно которым на разных станциях были получены как положительные, так и отрицательные тренды *hmF*2. Однако, как показывают результаты Данилова и Константиновой [20136], с середины 90-х годов на всех проанализированных станциях доминирует отрицательный тренд *hmF*2.

3.2 Анализ данных банка Damboldt and Suessman [2012]

Данилов и Константинова [2015а] провели анализ сезонных и суточных вариаций трендов foF2, используя медианные данные банка данных Damboldt and Suessman [2012]. При анализе этих данных использовались среднемесячные значения индекса F10.7. Два главных выводы указанной работы состоят в том, что имеется хорошо выраженные суточный и сезонный ход величин k(foF2).

На рисунке 5 приведено изменение величины k(foF2) с LT для февраля для четырех станций. Этот рисунок показывает, что, хотя наблюдается некоторый разброс данных для каждого часа (что неизбежно с учетом разного положения станций и того факта, что используются медианные, т. е. усредненные, данные), в целом характер изменения k(foF2) в течение суток одинаков для всех станций: наибольшие отрицательные тренды наблюдаются в дневные часы, тогда как в ночные и утренние часы тренды колеблются вокруг нуля.

На рисунке 5 хорошо видно, что наибольшие величины отрицательных трендов foF2 приходятся на дневной период 1000-1600 LT. Зависимость величин k(fo), усредненных для этого периода, от месяца года показана на рис. 6. Видно, что характер сезонного изменения k(foF2) в дневное время близок для всех трех станций. Наибольшие величины отрицательного тренда наблюдаются в конце зимы и начале весны и осенью (сентябрь-октябрь). В летний период абсолютные величины k(foF2) малы.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова



Рис. 5. Зависимость тренда k(*foF2*) от местного времени в феврале для четырех станций: Juliusruh (кружки), Rome (ромбы), Slough (треугольники) и Boulder (квадраты).



Рис. 6. Зависимость тренда *k*(*foF2*) от месяца года для 1000-1600 LT для трех станций: Juliusruh (кружки), Rome (ромбы) и Slough (треугольники).

В таблице 3 для трех станций приведены средние величины k(fo) для летнего (май-август) и зимнего (ноябрь-февраль) периодов. Видно, что средние величины для всех трех станций близки между собой и летом и зимой. В последней строчке приводится абсолютная разница трендов для зимы и лета, приведенных в двух первых строках таблицы.

| Станция | Rome | Slough | Juliusruh |
|----------------|--------|--------|-----------|
| Май-Август | -0.008 | -0.016 | -0.005 |
| Ноябрь-Февраль | -0.035 | -0.034 | -0.033 |
| Разница | 0.027 | 0.028 | 0.028 |

Таблица 3. Средние величины трендов для лета и зимы (1000-1600 LT) в МГц/год и разница «зима–лето»

Вывод о сезонном ходе трендов *foF*2 был сделан ранее в работах [Данилов и Константинова, 2013а; Danilov and Konstantinova, 2013]. При усреднении результатов по всем станциям (см. выше табл. 1), было получено, что для дня (1400 LT) тренд *foF*2 равен -0.021 МГц/год летом (июнь–июль)

и -0.054 МГц/год зимой (январь-февраль). Тенденция увеличения отрицательных трендов *foF2* от лета к зиме здесь очевидна. Согласно этим цифрам превышение зимних средних трендов над летними составляет 0.034 МГц/год. Эта величина близка к разнице «зима – лето» ~ 0.028 МГц/год, для интервала 1000–1600 LT (см. табл. 3), полученной уже на основании другого банка данных. Вывод о сезонной зависимости *k*(*foF2*) очень важен, поскольку он позволил сделать вывод об уменьшении количества атомного кислорода в термосфере. Этот вывод будет обсуждаться ниже.

Данилов и Константинова [2016а] исследовали вопрос о том, как повлиял глубокий минимум солнечной активности 2008—2009 г на тренды критической частоты слоя F2, найденные ранее, и сохраняются ли отрицательные тренды *foF2* в последующие годы. Было получено, что в подавляющем большинстве случаев годы, близкие к аномально низкому минимуму солнечной активности 2008–2009 гг., нарушали монотонное изменение кривых, по которым определяется тренд *foF2*. Это уменьшало получаемый тренд критической частоты по сравнению с результатами, основанными на данных до 2009 г. Однако, последующие годы вновь приводят к тенденции продолжения монотонного падения *foF2*. Причины указанных аномалий лежат видимо в широко обсуждаемой в ряде публикаций неадекватности индекса *F*10.7 для описания изменения ионосферных и атмосферных параметров в период очень глубокого минимума солнечной активности.

Выше мы рассмотрели цикл работ по определению долговременного изменения *foF2* и *hmF2*, выполненных авторами. Это работы основаны на едином методе определения трендов и представляют собой внутренне согласованную систему взглядов на проблему.

3.3 Сравнение с результатами других групп

Подробный обзор всех работ по анализу трендов параметров слоя F2 за несколько десятилетий выходит за рамки данной статьи. Остановимся на относительно недавних работах и возможных причинах расхождения результатов разных групп исследователей, следуя работам авторов [Константинова и Данилов, 2015; Данилов и Константинова 2015б].

Roinien et al. [2014] проанализировали величины hmF2, измеренные ионозондом в обсерватории Sadankula в 1957–2014 гг. Было получено, что за весь исследованный период среднее уменьшение величины $\Delta hmF2$ составило 50 км, что (в предположении, что уменьшение происходило равномерно в течение всего периода) дает отрицательный тренд $k(hm) \sim 1$ км в год.

Rojas Villalba and Milla [2012] анализировали тренды hmF2 по данным установки HP в Jicamarca за 1993—2012 г. Было получено, что после 2000 г. наблюдается отрицательный тренд hmF2, равный 1.58 км/год при стандартном отклонении $\sigma = 0.075$ км/год. Используя измерения с помощью дигизонда в обсерватории Jicamarca, Rojas Villalba and Milla [2012] получили отрицательный тренд hmF2 от 1.63 до 2.35 км/год в зависимости от местного времени.

На основании данных вертикального зондирования на ст. Ahmedabad в период 1955–2004 гг. Sharma and Chandra [2012] получили отрицательный тренд *foF2*, равный 0.036 МГц в год в околополуденные часы и 0.026 МГц в год около полуночи. Для *hmF2* получен отрицательный тренд, равный 0.24 км/год днем и 0.28 км/год ночью. Необходимо, однако, отметить, что ст. Ahmedabad относится к низкоширотным станциям, поэтому на нее могут влиять эффекты смещения магнитного экватора (см. ниже).

De Haro Barbas et al. [2014] анализировали тренды foF2 для двух среднеширотных станций (Slough и Kokobunji). Подробно рассматривались различные методы учета CA. Получено, что наиболее значимые тренды получаются при использовании индекса F10.7. De Haro Barbas et al. [2014] получили, что в 23-м цикле CA связь между F10.7 и солнечным ультрафиолетом нарушается. Для периода 1964–2008 гг. для дневных (1400 LT) летних условий получены тренды – 0.022 (Kokobunji)) и – 0.011 (Slough) МГц/год. Последняя величина сравнима с величиной k(foF2) = – 0.016 МГц/год для ст. Slough (лето, 1000–1600 LT), приведенной выше в табл. 3.

На основании наблюдений на ст. Томск за весь период наблюдений *foF2* с 1937 по 2012 г. Кhaitov et al. [2012] получили $k(foF2) = -0.01 \text{ M}\Gamma \mu/\text{год}$. При этом рассматривались совместно данные для разных сезонов и разных моментов LT. Отрицательный тренд *foF2*, равный $-0.015 \text{ M}\Gamma \mu/\text{год}$ был получен в работе Gnabahou et al. [2012] для низкоширотной ст. Ouagadougou.

Международной группой исследователей [Lastovicka et al., 2006], был проведен коллективный эксперимент по определению трендов *foF2* разными методами на основании одного и того же массива исходных данных (станция Juliusruh, 1977–1997 гг.). Результаты этого эксперимента дали, в целом,

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

согласующиеся величины трендов (подробнее см. Lastovicka et al. [2006]). Был получен средний отрицательный тренд *foF2*, равный 0.01–0.02 МГц в год. Отметим, что в этом случае использовался околополуденный интервал местного времени (1000–1400 LT), но большинство участвовавших групп использовали совместно данные всех месяцев года.

Как видно из приведенных выше данных, у всех исследователей получаются отрицательные величины трендов foF2 и hmF2. При этом большинство результатов по порядку величины близко к результатам наших работ, описанным выше. Наиболее сильное противоречие этих результатов наблюдается с детальными исследованиями, проведенными в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014]. Подробный анализ этих работ можно найти в работе Данилова и Константиновой [20156], здесь же мы приведем лишь основные выводы из этих работ и сформулируем наиболее вероятные причины расхождений.

Результаты, полученные Bremer et al. [2012] и Mielich and Bremer [2013], можно просуммировать следующим образом. Глобальные тренды hmF2 значимы статистически и лежат в пределах от -0.12 км в год до -0.17 км в год. Средние глобальные тренды foF2 малы и незначительно отличаются от нуля, если используются все годы. При исключении лет 2001 и 2009 (когда, по мнению авторов, величины солнечных индексов плохо описывают изменение солнечного УФ излучения) получаются статистически значимые, но небольшие тренды от -0.0028 до -0.0002 МГц в год.

Споssen and Franzke [2014] использовали банк медианных данных [Damboldt and Suessmann, 2012], который уже упоминался выше. Для выделения трендов они применяли два метода: классический метод линейной регрессии и так называемый метод ЕЕМD (за деталями мы отсылаем читателя к самой работе Cnossen and Franzke [2014] и к анализу этой работы [Данилов и Константинова, 20156]). Так же, как Bremer et al. [2012] и Mielich and Bremer [2013], Cnossen and Franzke [2014] усредняли медианные значения *foF2* и *hm*F2 по всем часам суток и месяцам года.

Результаты анализа трендов hmF2 в работе [Споssen and Franzke, 2014] для 19 ионосферных станций показывают, что не для всех станций наблюдаются статистически значимые тренды. В некоторых случаях значимые тренды наблюдаются только одним методом. В тех случаях, когда оба метода дают значимые тренды, их величины, как правило, различаются не сильно. Например, метод ЕЕМD дает для станций Juliusruh и Rome величины -0.523 и -0.832 км/год. Соответствующие величины, полученные методом линейной регрессии, дают значения -0.345 и -0.652 км/год. В целом значимые тренды получены (хотя бы одним методом) для 14 станций и колеблются от -0.177 до -0.832 км/год (см. табл. 1 в указанной работе).

Результаты анализа трендов foF2 в работе [Cnossen and Franzke, 2014] показывают, что только для 12 станций из 22-х исследованных хотя бы один метод дает статистически значимые тренды. Все статистически значимые тренды отрицательны и их абсолютные величины лежат в пределах от 0.008 до 0.033 МГц/год. Исключение составляет станция Ашхабад, для которой получен очень высоких положительный тренд 0.044 МГц/год. Набор станций, использованных Cnossen and Franzke [2014], отличается от набора станций, проанализированного в наших работах, описанных выше. Сравнение трендов foF2 для станций, вошедших в оба набора, приведено в табл. 4. Легко видеть, что для станции Томск получены одинаковые величины около -0.025 МГц/год, тогда как для остальных четырех станций отрицательные тренды, полученные в наших работах, заметно выше, чем тренды, приведенные Cnossen and Franzke [2014].

Константинова и Данилов [2015] и Данилов и Константинова [20156] подробно проанализировали причины различия трендов, полученных в их публикациях и в работах Bremer et al. [2012], Milich and Bremer [2013] и Cnossen and Franzke [2014]. Первая причина состоит в том, что в указанных работах для выделения трендов использовались все ряды исходных данных с начала наблюдений. Если, как показали Константинова и Данилов [2015], основное положение используемого ими подхода, о том, что тренды параметров слоя F2 стали проявляться после примерно 1980 г. (см. выше в предыдущем параграфе) справедливо, включение в анализ данных до 1980 г. существенно занижает получаемый тренд. Этот вывод иллюстрирует рис. 7, взятый из указанной работы.

На рисунке 7 кресты обозначают усредненные по 113 ионосферным станциям величины $\Delta hmF2$ согласно Mielich and Bremer [2013]. Сплошная линия – линейная аппроксимация этой величины. Ее наклон дает тренд k(hm) = -0.14 км в год. Штриховой линией показана линейная аппроксимация точек после 1981 г., выполненная Константиновой и Даниловым [2015]. Она дает тренд k(hm) = -0.40 км в год.

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

Таблица 4. Тренды *foF*2 в МГц/в год согласно Cnossen and Franzke [2014] (ЕЕМD) и Данилову и Константиновой [20136]



Рис. 7. Изменение величины ΔhmF2 со временем (см. текст).

Второй и третьей причинами различия трендов, получаемых разными группами авторов, является отсутствие учета зависимости трендов foF2 и hmF2 от времени суток и сезона. Выше мы уже писали о том, что величины k(foF2) демонстрируют хорошо выраженный суточный ход с наибольшими отрицательными трендами в околополуденный период (1000–1600 LT) и небольшими трендами обоих знаков, близкими к нулю, в ночное время, а также сезонный ход с наибольшими отрицательными весной и зимой и наименьшими — летом.

Очевидно из самых общих соображений, что в таком случае совместное использование для поиска трендов данных для всех LT (как это делается в работах [Bremer et al., 2012; Mielich and Bremer, 2013; Cnossen and Franzke, 2014]) будет давать низкие величины трендов по сравнению с относительно высокими трендами, существующими в околополуденное время.

Совершенно так же обстоят дела с сезонными вариациями. Как и в случае с суточными вариациями k(foF2), очевидно, что использование исходных данных, усредненных за год, должно давать меньшие отрицательные тренды foF2, чем тренды, наблюдаемые в зимне-весенние месяцы.

Из-за двух последних причин Bremer et al. [2012], Mielich and Bremer [2013] и Cnossen and Franzke [2014] получают, фактически, тренды, усредненные за весь год и за все сутки. Именно поэтому эти тренды меньше, чем максимальные тренды, наблюдаемые в околополуденные часы в зимне-весенние месяцы. Вопрос о том, что более правильно — получать усредненные по LT и месяцам очень маленькие тренды, или выделять периоды местного времени и сезона, когда тренды могут быть значительны, может быть предметом обсуждения. Нам представляется правильным второй подход, поскольку он позволяет рассмотреть возможные механизмы уменьшения *foF2* и *hmF2*. В частности, как будет показано ниже, анализ сезонных вариаций k(foF2) показал, что наиболее вероятной причиной отрицательных трендов *foF2* является уменьшение количества атомного

кислорода в термосфере.

Следует отметить еще два важных момента. Первый касается определения высот hmF2 из ионограмм вертикального зондирования. Elias et al. [2016] поставили под сомнение возможность использования величин hmF2, полученных из ионограмм методом Shimazaki [1955]. Но во всех упомянутых в этом параграфе работах использовались величины hmF2, полученные именно этим методом. К сожалению, при исследовании трендов невозможно использовать более сложные методы пересчета величин M3000, получаемых непосредственно из ионограмм, в hmF2, поскольку такие методы требуют информации о слое E и других параметрах, которых нет при анализе трендов.

Согласно Elias et al. [2016] возможные ошибки в определении hmF2 связаны с вековыми вариациями геомагнитного поля. На низких геомагнитных широтах, а также в области Южно-Атлантической Аномалии эти ошибки могут приводить к кажущимся трендам hmF2 (никак не связанным с охлаждением и оседанием термосферы) порядка 1 км за десятилетие. Однако, в средних широтах эти ошибки существенно меньше и не должны существенно влиять на определение реальных изменений hmF2 из-за охлаждения и оседания термосферы. Следует отметить также, что Scotto [2013] анализировал точности определения hmF2 и возможности нахождения долговременных трендов и пришел к выводу, что тренды hmF2 могут быть определены, если они превышают 1.4 км за десятилетие.

Завершая этот параграф, следует отметить, что существует подход к определению трендов критических частот слоев *E*, *F*1 и *F*2, развиваемый в работах [Mikhailov, 2002; Mikhailov and Perrone, 2016, Mikhailov et al. 2017; Perrone and Mikhailov, 2016]. Этот подход основывается на концепции геомагнитного контроля трендов. Для получения трендов авторы указанного подхода проводят сглаживание используемого индекса солнечной активности и анализируемой величины (*foE*, *foF*1 или *foF*2) для конкретной рассматриваемой ситуации (месяц года, LT) за 132 месяца и находят коэффициент корреляции между получаемыми рядами данных. Высокий коэффициент корреляции приводит их к выводу, что тренды всех трех указанных параметров малы и малозначимы. Обсуждение этого подхода, его методов и результатов требует отдельного подробного исследования и выходит за рамки данной статьи. Наш метод в основном близок к «классическому» подходу, применявшемуся многими исследовательскими группами, и основываемые выше результаты основаны на использовании этого метода.

Резюмируя сказанное в данном параграфе, следует отметить следующее. Большая серия работ, выполненная авторами, основана на самосогласованной концепции. Суть этой концепции состоит в том, что до 1980 г. не было значимых трендов параметров ионосферных слоев и поиск этих трендов следует проводить для периода после 1980 г. Предполагается также, что характер зависимости анализируемых ионосферных параметров от индекса солнечной активности *F*10.7 не изменялся со временем, за исключением, возможно относительно короткого периода глубокого минимума СА в 2008–2009 гг.

В рамках указанной концепции обнаружены отрицательные тренды критической частоты и высоты слоя F2 на всех исследованных станциях, а также наличие существенных вариаций трендов foF2 сезоном и временем суток. Различие с результатами двух групп авторов, проводивших детальный анализ трендов, объясняется отсутствием в работах этих групп учета указанных суточных и сезонных вариаций. Фактически они дают тренды, усредненные за сутки и за все сезоны, поэтому эти тренды меньше, чем максимальные тренды, получаемые нами для дневных зимних условий.

3.4 Оценки уменьшения количества атомного кислорода

Изменение состояния термосферы и средней атмосферы, вызванное увеличением количества CO₂ в атмосферном газе (см. выше Введение), 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 *F*1 и *F*2.

Данилов и Константинова [2014] подробно рассмотрели вопрос о трендах величины [O]. Ранее Данилов и Константинова [2013а] на основании анализа данных системы SPIDR обнаружили хорошо выраженный сезонный ход трендов foF2: летом тренды оказались значительно меньше, чем в зимневесенний период (см. выше 3.1). К такому же выводу привел и более детальный анализ сезонных вариаций на основании месячных медиан из банка Damboldt and Suesmann [2012] (см. выше 3.2).

Детально рассмотрев этот вопрос, Данилов и Константинова [2014] пришли к выводу, что

температура вряд ли играет главенствующую роль в происходящем процессе. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Согласно современным представлениям [Richards, 2011; Heirl et al., 1997] константы скорости основных ионно-молекулярных реакций

$$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N(\gamma_1) \bowtie O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O(\gamma_2)$$

зависят от ионной температуры Ті следующим образом:

 γ_1, γ_2 обратно пропорциональны Ti при Ti < 1000 K и

 γ_1, γ_2 прямо пропорциональны Ti при Ti > 1000 K.

Среднегодовая ионная температура на высотах слоя *F*2 как раз соответствует примерно 1000 К, причем зимние значения несколько ниже, а летние — несколько выше. Коэффициент рекомбинации β пропорционален γ_1 , γ_2 и, соответственно электронная концентрация обратно пропорциональна β : $q = \beta \cdot Ne$.

Таким образом, летом уменьшение температуры в результате общего процесса охлаждения верхней атмосферы должно приводить даже к небольшому увеличению электронной концентрации (и, следовательно, *foF2*), а не к ее уменьшению (отрицательный тренд). Зимой зависимость γ_1 , γ_2 от Т очень слаба (γ_1 , $\gamma_2 \sim T^{-(0.4-0.5)}$), а потому трудно ожидать заметного температурного эффекта в *foF2* изза изменения величин γ_1 , γ_2 . В свете сказанного на роль «главного кандидата», вызывающего сезонные изменения *foF2*, претендует нейтральный состав термосферного газа.

Итак, результаты исследований сезонных вариаций трендов foF2 указывают на то, что в последние десятилетия в результате оседания и охлаждения верхней атмосферы происходит изменение нейтрального состава термосферы на высотах максимума слоя F2, приводящее к уменьшению критической частоты foF2 (а, следовательно, и электронной концентрации NmF2).

Электронная концентрация в максимуме слоя F2 пропорциональна отношению [O]/[N₂]. Слой F2 «плавает» на уровне более или менее постоянного давления [Rishbeth and Edwards, 1989]. За счет этого величина NmF2 должна была бы оставаться относительно постоянной, даже при оседании термосферы за счет охлаждения. Однако, зависимость NmF2 от концентрации атомного кислорода более сложна. Согласно работе [Mikhailov et al., 1995] величина электронной концентрации в максимуме слоя F2

$$NmF2 \sim [O]^{0.65} \cdot ([O]/[N_2])^{0.65}$$

В этом случае при сохранении максимума слоя F2 на уровне постоянного давления второй сомножитель в формуле меняться практически не будет. Изменение NmF2 возможно только за счет изменения концентрации О. Поскольку газы в термосфере распределяются по барометрическому закону, изменение [O] должно происходить во всей толще термосферы выше уровня гомопаузы (около 120 км).

Таким образом, сезонные вариации *foF2*, полученные авторами, дают серьезные основания предположить, что со временем изменяется абсолютная величина концентрации атомного кислорода [O], что и приводит к отрицательным трендам *foF2*.

Важным подтверждением указанного вывода об уменьшении [O] явился совместный анализ трендов обоих параметров слоя F2. Данилов и Константинова [20166] рассмотрели изменение зависимости критической частоты слоя F2 от его высоты hmF2. Было получено, что наклон k зависимости foF2 от hmF2 систематически уменьшается от более раннего ("эталонного") периода 1958–1980 гг. к более поздним периодам 1988–2010, 1998–2010 и 1998–2014 гг.

Примеры зависимостей *foF2* от *hmF2* для периодов 1958–1980 гг. и 1998–2010 гг. для ситуации 14JF (станций Slough и Juliusruh) приведены на рис. 8. Хорошо видно, что в обоих случаях наклон k зависимости *foF2* от *hmF2* (он показан возле кривых на рисунках в единицах МГц/км) в период 1998–2010 гг. существенно меньше, чем в «эталонный» период 1958–1980 гг.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова



Рис. 8. Примеры изменения зависимости *foF2* от *hmF2* по данным системы "SPIDR" для января-февраля и двух станций. Кружки соответствуют «эталонному» периоду 1958–1980 гг., а ромбы — периоду 1998–2010 гг.

Подробная сводка полученных для всех месяцев величин k для трех станций и четырех временных интервалов приведена в серии таблиц в работе Данилова и Константиновой [20166]. Указанные таблицы показывают, что число случаев, когда найденная величина k нарушала полученную тенденцию уменьшения k от более ранних периодов к более поздним невелико и приходится, главным образом, на период 1998–2014 гг., на который приходится глубокий минимум солнечной активности, который может существенно искажать результаты. Что же касается остальных трех рассмотренных периодов, то для них указанная тенденция выражена очень хорошо.

Два указанных параметра слоя F2 по-разному зависят от концентрации атомного кислорода: foF2 пропорциональна [O] в степени, близкой к единице, а hmF2 пропорциональна lg [O] [Mikhailov et al., 1995] (подробный анализ можно найти в указанной выше работе авторов). Поэтому при уменьшении [O] величина foF2 должна уменьшаться сильнее, чем hmF2 и, следовательно, наклон зависимости foF2 от hmF2 должен уменьшаться. Но именно это и происходит, как показано выше. Таким образом, обнаруженное уменьшение k подтверждает уменьшение со временем концентрации атомного кислорода в термосфере, полученное ранее на основании сезонного хода трендов foF2.

Рассмотрим другие аргументы в пользу предположения об уменьшении концентрации атомного кислорода в термосфере.

На основе длинного ряда (1966–1992 гг.) масс-спектрометрических экспериментов на геофизических ракетах МР-12 Похунков и др. [2009] получили отрицательный тренд концентрации атомного кислорода на высотах 120–150 км порядка 1% в год. Хотя радиочастотный масс-спектрометр, использовавшийся в указанных экспериментах, может давать ошибки при измерении активных оставляющих О и О₂ за счет рекомбинации и диссоциации на стенках анализатора прибора, Похунков и др. [2009] считают, что они смогли ввести соответствующую корректировку и учесть указанные эффекты.

Выше в данном параграфе подробно говорилось о проблеме высоких скоростей увеличения количества двуокиси азота на высотах 80–110 км, в два раза превышающих рост CO₂, предсказываемый моделями. Emmert [2012] предположил, что такое увеличение может быть связано с усилением турбулентной диффузии в области турбопаузы (100–120 км). Если такое усиление существует, то турбулентная диффузия должна переносить больше молекул двуокиси углерода из верхней мезосферы в нижнюю термосферу, откуда начинается распределение концентрации каждой компоненты по своему барометрическому закону. В этом случае концентрация CO₂ во всей толще атмосферы выше гомопаузы должна увеличиваться.

В то же время, усиление турбулентной диффузии должно приводить к обратному эффекту в распределении атомного кислорода. Дело в том, что образование атомов кислорода из молекул О₂ под действием солнечного излучения в континууме Шумана-Рунге (130–170 нм) происходит в основном выше уровня турбопаузы, на высотах 130–160 км. Время жизни атомов О на этих высотах велико, поэтому образовавшиеся атомы сносятся вниз процессами турбулентной диффузии и вертикального

переноса в область ниже турбопаузы, где на высотах 80–90 км происходит их гибель (соединение в молекулу O₂) в процессах рекомбинации трех тел.

При усилении турбулентной диффузии скорость переноса атомов О вниз должна возрастать, и равновесная концентрация выше уровня турбопаузы должна уменьшаться. В этом случае, так же, как и в случае с молекулами CO_2 , концентрация О должна в соответствии с барометрическим законом уменьшаться выше уровня гомопаузы. Таким образом, усиление турбулентности может объяснить и увеличение количества CO_2 и уменьшение количества О в термосфере. При этом концентрация атомов О в максимуме слоя ниже турбопаузы (~90 км) должна возрастать. Именно это обнаружили экспериментально Smith et al. [2010].

Данилов и Константинова [2014] привели ряд косвенных доказательств того, что происходит усиление турбулентности в районе турбопаузы. Не останавливаясь на них подробно, отметим следующее. Наблюдавшиеся в то время тренды ионосферных слоев E и D и величины [NO⁺]/[O₂⁺] в области E представляют собой согласованную картину, если предположить увеличение коэффициента турбулентной диффузии в области турбопаузы. Такое увеличение должно приводить к оттоку молекул NO из области E, приводя там к уменьшению [NO⁺]/[O₂⁺], в область D, приводя там к росту Ne. Оба явления действительно наблюдаются (см. ниже следующий параграф).

Серия работ [Данилов и Калгин, 1997; Danilov and Kalgin, 1992; 1996] была посвящена определению высоты турбопаузы и коэффициента турбулентной диффузии на основании ракетных масс-спектрометрических измерений концентраций отношения двух инертных газов Ar и N_2 в районе турбопаузы (на высотах 100–150 км). Не останавливаясь подробно на этой достаточно сложной проблеме и отсылая читателя к указанным публикациям, отметим главное. Анализ результатов измерений [Ar/N₂] за два десятилетия показал [Kalgin, 1998], что коэффициент турбулентной диффузии увеличивается со временем, а высота турбопаузы растет. Это является еще одним подтверждением (основанным на совершенно независимых от ионосферных измерений Ne и ионного состава данных) рассматриваемой концепции.

Наконец, в последнее время появился ряд экспериментальных данных, косвенно указывающих на то, что турбулентность в районе турбопаузы действительно должна усиливаться со временем. По современным представлениям турбулентность развивается в результате распада на высотах 100-130 км внутренних волн (АГВ и ВГВ), приходящих в нижнюю термосферу снизу, от различных источников на поверхности земли и в тропосфере. На высотах стратосферы имеется препятствие для дальнейшего проникновения волн вверх в виде системы зональной циркуляции. Известно, что ветры, направленные на запад, препятствуют проникновению волн, а ветры, направленные на восток, благоприятны для такого проникновения. В ходе охлаждения и оседания средней атмосферы ветры в стратосфере и нижней мезосфере становятся все более восточными (направленными на восток) и, соответственно, более благоприятными для проникновения внутренних волн на высоты турбопаузы. Это должно приводить к усилению турбулентной диффузии.

С необходимостью усиления турбулентной диффузии столкнулись и создатели современных моделей. На спутниках АСЕ и ТІМЕД были зарегистрированы высокие положительных трендах [CO₂] на высотах 80–110 км. Garsia et al. [2014] показали, что, чтобы объяснить такое увеличение [CO₂] с помощью модели WACCM, необходимо предположить, что коэффициент турбулентной диффузии растет со скоростью ~30% за десятилетие. На необходимость увеличения этого коэффициента в модели WACCM для объяснения увеличения [CO₂] указывали также Yue et al. [2016].

Таким образом, есть все основания полагать, что интенсивность турбулентной диффузии увеличивается со временем и это ведет к уменьшению количества атомного кислорода в термосфере как было предположено Даниловым и Константиновой [2013a, 2014]. Исходя из приведенной выше связи между NmF2 и [O] и отсутствия значимых трендов *foF2* в летний период, Danilov [2015] получил, что концентрация атомного кислорода на высотах области F уменьшается на 10% за десятилетие.

Прямых измерений атомного кислорода в термосфере не существует. Разными авторами делались различные оценки трендов [O] на основании разных наборов данных. Oliver [2014] получил нулевой тренд [O] на высоте 400 км на основании данных HP. На основании данных о трендах плотности Emmert et al. [2012] получили, что [O] на той же высоте уменьшается со скоростью 17% за десятилетие. На высоте 120 км Emmert [2015] получил отрицательный тренд концентрации атомного кислорода, равный 1.8–2.6 % за десятилетие.

Таким образом, как уже говорилось во Введении, анализ трендов параметров слоя F2

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

позволяет судить о долговременных изменениях, происходящих не только в ионосфере, но и в нейтральной атмосфере, в частности, об уменьшении количества атомного кислорода и усилении турбулентной диффузии.

4 ТРЕНДЫ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ Е

Данилов и Константинова [2018] сделали попытку применить описанный в параграфе 2 метод к анализу трендов критической частоты слоя E, *foE*. Первые указания на наличие положительного тренда критической частоты слоя E обнаружили Гивишвили и Лещенко [1993] по данным ст. Москва. Позднее анализ трендов *foE* проводился многими авторами. Наиболее полное исследование трендов как критической частоты, так и высоты слоя E было проведено Bremer [2001] на основании данных 71-й станции глобальной ионосферной сети. Изменение *foE* со временем согласно Bremer [2001] приведено на рис. 9. Видно, что наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый тренд *foE*, равный +0.013 МГц в год. Аналогичный анализ был выполнен в работе [Bremer, 2001] также для высоты слоя E, *hmE*. Оказалось, что слой E опускается (отрицательный тренд равен 0.029 км/год). Эти результаты были подтверждены в более поздней работе Bremer [2008].



Рис. 9. Изменение со временем критической частоты и высоты слоя Е согласно Bremer [2001].

Данилов и Смирнова [1997] предположили, что увеличение *foE* вызвано изменением ионного состава области *E*. Этот вопрос подробно исследовал Mikhailov [2006], который показал, что наблюдается количественное согласие между трендами $[NO^+]/[O_2^+]$, полученными в работе [Данилов и Смирнова, 1997], и трендами *foE*. Приведенное объяснение увеличения *foF*2 было принято также в работах [Laštovička et al., 2008; Bremer, 2001].

При поиске трендов критической частоты слоя *E*, *k*(*foE*), Данилов и Константинова [2018] использовали метод выделения трендов, использовавшийся авторами неоднократно и описанный выше в параграфе 2.

Ключевым моментом метода является предположение о том, что до примерно 1980 г. не было заметных систематических изменений (трендов) параметров слоев *F*2 и *E*. Аргументы, позволяющие сделать это предположение приведены в параграфе 2.

Важный результат, имеющий прямое отношение к обсуждаемой проблеме и приведенный на рис. 10, был получен Bremer [2008]. Усреднив данные наблюдений на 45 среднеширотных станциях, он получил, что до 1980 г. изменение со временем величины ΔfoE ничтожно мало и соответствует практически нулевому тренду *foE*. В то же время в интервалах 1979–1995 и 1995–2005 гг. указанное изменение хорошо выражено и соответствует положительному тренду 0.028 и 0.024 МГц в год. В то же время, линейная аппроксимация всего массива данных дает значительно меньший тренд (+0.0013 МГц в год). Рисунок 10 является прекрасным подтверждением рассматриваемой концепции "эталонного" периода 1957–1980 гг.



Рис. 10. Изменение ΔfoE согласно Bremer [2008] в различных временных интервалах.

Поскольку при поисках трендов k(foE) мы работали с месячными медианами foE, в качестве индикатора солнечной активности мы использовали 12-месячный сглаженный индекс $F10.7_{12}$, аналогично тому, как это делается в широко известной модели International Reference Ionosphere (IRI) для индекса солнечной активности R_{12} [Bilitza, 1990].

Для периода 1958–1980 гг., который считается «эталонным», строится зависимость *foE* от индекса солнечной активности $F10.7_{12}$. Как и в случае *foF2*, эта зависимость, как правило, хорошо выражена и имеет высокий коэффициент определенности R^2 , превышающий 0.9 и дающий статистическую значимость по критерию Фишера более 95% (в большинстве случаев – около 99% и выше).

Для периода после 1980 г. находятся отклонения ΔfoE измеренных величин foE от указанной эталонной зависимости для каждого года. Эти величины сглаживались с окном в 11 лет, и полученные сглаженные величины наносились на график как функция года. Наклон линейной аппроксимации полученной зависимости давал искомый тренд k(foE).

Данилов и Константинова [2018а] анализировали данные двух станций Европейского региона Juliusruh и Slough для всех месяцев год и 1200 LT. Более подробный анализ был проведен в следующей работе (Данилов и Константнова [2018б]). Были рассмотрены данные трех станций (добавилась станция Rome) для всех моментов LT, для которых для данного месяца имелись наблюдения *foE*.

Мы опишем здесь основные результаты более поздней работы.

Главой целью этой работы был анализ суточных и сезонных вариаций k(foE) и сравнение этих вариаций на трех стациях Европейского региона: Juliusruh, Sough и Rome. Выбор интервала последних лет, для которого определялся тренд, был несколько различен для разных станций, поэтому, следуя работе Данилова и Константиновой [20186] мы сначала опишем определение величин k(foE) отдельно для каждой станции, а потом проведем сравнение полученных результатов.

Данилов и Константинова [20186] подчеркивали, что работа носит чисто морфологический характер. Ее основной задачей было описать полученное поведение трендов *foE*, не претендуя на построение какой-либо физической картины. Авторы отметили, что полученные результаты представляют интерес сами по себе и могут указывать на неожиданные аспекты физической картины явления. В то же время, физика области *E* достаточно сложна (хотя бы потому, что в формировании этой области участвует несколько источников ионизации) и интерпретация полученных результатов потребует дополнительных сложных исследований.

Как уже упоминалось выше, что весь анализ трендов проводился для месячных медиан foE, что позволило анализировать как суточные, так и сезонные тренды k(foE).

4.1 Станция Juliusruh

Данные этой станции мы исследовали наиболее подобно, поскольку она представляется нам наиболее надежной из всех европейских (а, возможно, вообще из всех) ионосферных станций. Прежде, чем перейти к анализу трендов, полученных для этой станции, сделаем одно общее замечание, справедливое для всех рассмотренных станций.

Известно, что в средних широтах слой E существует не круглосуточно, а лишь в часы, когда светит Солнце, причем зенитный угол солнца не слишком велик. Наиболее благоприятные условия для существования слоя E реализуются в полдень местного времени, при этом период летнего солнцестояния наиболее благоприятен. В летние месяцы слой существует до 18–19 часов, однако, по мере удаления от полудня, величина *foE* монотонно уменьшается из-за увеличения зенитного угла солнца и соответствующего уменьшения скорости ионизации солнечным коротковолновым излучением.

В силу сказанного, слой E наблюдается не во все часы местного времени. Интервал наблюдений слоя центрирован на местный полдень и он тем шире (дальше простирается к утренним и вечерним часам LT), чем ближе к периоду летнего солнцестояния находится дата наблюдений. Так, в июне слой E наблюдается примерно с 06:00 LT до 18:00 LT, тогда как в декабре он виден на ионограммах примерно с 09:00 LT to 15:00 LT.

По мере удаления момента наблюдения от полудня в обе стороны величина *foE* уменьшается от примерно 3–3.5 МГц до 1.0–1.5 МГц и, соответственно, точность ее измерения падает. Это хорошо видно на «эталонных» зависимостях *foE* от $F10.7_{12}$. Так, эта зависимость для 12:00 LT июля месяца на ст. Juliusruh хорошо выражена, разброс точек относительно аппроксимирующей кривой мал и коэффициент определенности по критерию Фишера R^2 равен 0.95.

В то же время, для моментов LT, удаленных от полудня, и месяцев, удаленных от летнего солнцестояния, разброс точек становится сильнее, а величина R^2 уменьшается. Например, для той же ст. Juliusruh для 17:00 LT в августе (для более поздних часов данных нет) разброс точек гораздо сильнее и $R^2 = 0.62$. Для той же станции в 16:00 LT в апреле $R^2 = 0.68$.

Указанный факт важен для используемого метода определения трендов в одном отношении. Хорошо выраженная зависимость критической частоты от $F10.7_{12}$ для эталонного периода 1958–1980 гг. с высокой величиной R^2 показывает, что сделанный в рамках разработанной нами концепции (используемой для поиска трендов параметров как слоя F2, так и слоя E) выбор эталонного периода правилен. Относительно «плохие» зависимости с невысоким R^2 связаны с относительно низкой надежностью исходных данных.

Так же, как и в случае нахождения трендов параметров слоя F2, мы получали величину ΔfoE как разность между реально наблюдаемой медианой *foE* и величиной, получаемой для данного значения $F10.7_{12}$ для эталонного периода. Наклон зависимости ΔfoE от времени давал искомый тренд k(foE) в единицах МГц в год.

Характер изменения ΔfoE со временем до 1990–1995 гг. оказался различен для разных ситуаций (разных месяцев и моментов LT). В этот период наблюдались как уменьшения, так и увеличения ΔfoE в отдельные временные интервалы, однако, как правило, амплитуда этих изменений была значительно меньше, чем амплитуда падения ΔfoE в течение последних 15–20 лет.

Мы не знаем, чем обусловлено поведение ΔfoE со временем до 1990–1995 гг. Но для дальнейшего анализа очень важно, что для всех без исключения месяцев и моментов LT после этой даты наблюдалось хорошо выраженное монотонное (увеличение, или уменьшение, см. ниже) изменение ΔfoE . В связи с этим мы для целей единообразия, рассматривали для всех ситуаций на рассматриваемой станции изменение ΔfoE , начиная с 1994 г. (наиболее характерная дата начала монотонного изменения ΔfoE). Наклон этого изменения брался как тренд k(foE) для данной ситуации.

Анализ полученных величин k(foE) показал, что для ст. Juliusruh характерен сезонный ход тренда, причем характер этого хода зависит от местного времени: в часы, близкие к полудню, это ход почти отсутствует и во все месяцы тренд мал и по абсолютной величине не превышает 0.02 МГц в год. В утренние часы тренд относительно мал в период солнцестояния, но становится положительным ($k(foE) \sim 0.03-0.04$ МГц в год) в зимние месяцы. В вечерние часы тренд также меньше в летний период, но становится отрицательным (-(0.05-0.06) МГц в год) в зимние месяцы. Все указанные особенности поведения k(foE) видны на рис. 11.



Рис. 11. Сезонные вариации *k*(*fo*E) для разных моментов LT на ст. Juliusruh.

В недавних работах Mikhailov et al. [2017] Lastovicka et al. [2016] также анализировались тренды *foE* методами, отличающимися между собой и отличными от метода, использованного в данной работе. В обеих указанных работах рассматривался только момент 12:00 LT и июнь месяц. При этом был сделан вывод о том, что тренды *foE* малы. Как видно из рис. 11 этот вывод согласуется с нашими результатами — для этих условий k(foE) = -0.0075 МГц в год. Однако для других месяцев и других моментов местного времени, как следует из рис. 11, тренды k(foE) могут быть значительными по абсолютной величине как отрицательными, так и положительными.

Рисунок 11 показывает, что есть систематическая зависимость тренда *foE* от местного времени для данного месяца. Это положение наглядно иллюстрирует рис. 12, где приведены величины k(foE) в зависимости от LT для июня, августа и октября. Аналогичная картина наблюдается и для всех других месяцев, но, чтобы не перегружать рисунок, мы приводим данные для указанных трех месяцев. Чтобы не увеличивать количество рисунков, мы привели также на рис. 12 зависимость k(foE) от LT для ст. Rome, которая будет обсуждаться ниже в 4.3.



Рис. 12. Зависимость *k*(*foE*) от местного времени для разных месяцев для станции Juliusruh (кружки) и Rome (ромбы).

Рисунок 12 демонстрирует очень интересную и неожиданную зависимость тренда foE от местного времени: в утренние часы тренд положителен и значителен по абсолютной величине, в околополуденные часы тренд мал (близок к нулю), а вечерние часы тренд отрицателен и также значителен. Это обстоятельство важно для понимания природы тренда. Мы вернемся к этому вопросу в 4.4.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

4.2 Cmanuus Slough

Характер изменения величины ΔfoE со временем для станции для ст. Slough оказался сложнее, чем для ст. Juliusruh. Для околополуденных часов этот характер для обеих станций близок. Наблюдаются интервалы с увеличением и уменьшением ΔfoE , однако, начиная с некоторого момента до конца исследуемого периода, наблюдается четко выраженное уменьшение ΔfoE , соответствующее небольшому по абсолютной величине отрицательному тренду. Примеры изменения ΔfoE для всех трех станций можно найти в работе Данилова и Константиновой [20186]. Для определения k(foE) мы, как и в случае станции Julusruh, брали интервал с 1994 г.

Оказалось, что на ст. Slough для изменения ΔfoE со временем характерна одна особенность. Примерно с 1995 по 2000 гг. происходит резкое изменение (скачок) величины ΔfoE в течение относительно короткого временного интервала. Этот скачок направлен вниз для утренних часов и вверх – для вечерних. Очень важно, что для всех месяцев и для 09:00 LT и для 15:00 LT скачок кончается в 2000 г., после чего начинается монотонное изменение (рост в утренние часы и падение – в вечерние) ΔfoE .

Обсуждение возможной причины указанного скачка можно найти в работе Данилова и Константиновой [20186]. Здесь отметим только, что для утренних и вечерних часов на ст. Slough величина k(foE) определялась как наклон зависимости ΔfoE от времени, начиная с 2000 г.

Было обнаружено, что для ст. Slough наблюдается та же картина суточного и сезонного года k(foE), что и для станции Juliusruh: в период, близкий к летнему солнцестоянию, величина k(foE) отрицательна и мала по абсолютной величине, слабо изменяясь с LT. В зимние месяцы величины k(foE) положительны и достаточно велики, причем в утренние часы они лежат в области положительных значений k(foE), а в вечерние – в области отрицательных, достигая по абсолютной величине 0.04–0.05 МГц в год. Пример изменения k(foE) в течение года для разных моментов LT приведен на рис. 13.

Сравнение рисунков 11 и 13 указывает на удивительное подобие сезонного и суточного хода k(foE) для ст. Juliusruh и Slough. Для обеих станций отсутствует сезонный ход в полуденные часы, при этом сами величины k(foE) малы. В утренние часы тренды foE положительны, а в вечерние - отрицательны и достаточно велики. При этом и для утренних, и для вечерних трендов характерен хорошо выраженный сезонный ход с меньшими абсолютными величинами в летние месяцы и существенным ростом этих величин к зимним месяцам.



Рис. 13. Сезонные вариации *k*(*fo*E) для разных моментов LT на ст. Slough.

Мы сравнили величины ΔfoE для анализируемого периода для двух указанных станций и обнаружили хорошо выраженную корреляцию. В качестве иллюстрации на рис. 14 приведен пример такого сравнения для мая и августа. Видно, что коэффициенты корреляции достаточно высоки.



Рис. 14. Сопоставление величин ΔfoE для станций Juliusruh и Slough для мая и августа.

Такое совпадение суточно-сезонного хода и абсолютных величин k(foE) для двух станций позволяет считать, что, не смотря на сложности и несколько различный подход к выделению трендов для двух станций, полученные тренды реальны, поскольку случайное совпадение их поведения по нескольким параметрам маловероятно.

4.3 Станция Rome

Поведение ΔfoE со временем напоминает поведение этой величины для 12:00 LT на ст. Juliusruh. Примеры можно найти в статье Данилова и Константиновой [20186]. До 1990–1995 гг. величина ΔfoE колеблется, но с небольшой амплитудой, не превышающей 0.15 МГц в апреле и 0.04 МГц в ноябре. После 1990–1995 гг. наблюдается падение величины ΔfoE , однако это падение невелико и соответствует небольшому тренду, не превышающему по абсолютной величине 0.01 МГц/год. Так же ведут себя величины ΔfoE на ст. Rome и в другие месяцы и моменты LT.

Чтобы сохранить единство подхода, тренд k(foE) для ст. Rome определялся по изменению ΔfoE с 1994 гг., как это делалось для ст. Juliusruh. Результаты приведены в таблице 5. Как следует из этой таблицы, изменение k(foE) носит достаточно хаотичный характер. Почти для каждого момента LT наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения k(foE), однако их абсолютная величина мала (менее 0.01 МГц в год). В отличие от ст. Juliusruh и Slough, не наблюдается ни выраженного сезонного, ни выраженного суточного хода тренда *foE*. Выше на рис. 12 мы привели изменение k(foE) с LT для ст. Rome для двух месяцев. Хорошо видно, что эти величины меняются слабо (лежат в пределах ± 0.01 МГц в год) на фоне сильных суточных вариаций k(foE) на ст. Juliusruh, изменяющихся от плюс (0.02–0.04) МГц в год в утренние часы до минус 0.05–0.06 вечером.

| | Местное время | | | | | | | |
|---------|---------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--|
| Месяц | 07:00 | 09:00 | 11:00 | 12:00 | 14:00 | 15:00 | 17:00 | |
| январь | | 0.0049 | - 0.0003 | 0.0014 | -0.0003 | 0.0025 | | |
| февраль | | -0.0011 | -0.0026 | -0.0041 | -0.0016 | -0.0084 | | |
| март | 0.0012 | - 0.0030 | - 0.0045 | - 0.0048 | -0.0033 | -0.0034 | 0.0088 | |
| апрель | 0.0053 | 0.0017 | - 0.0006 | 0.0027 | -0.0010 | -0.0036 | 0.0050 | |
| май | 0.0073 | 0.0051 | 0.0019 | - 0.0006 | 0.0025 | -0.0019 | 0.0031 | |
| июнь | 0.0046 | 0.0015 | 0.0011 | 0.0001 | -0.0037 | -0.0068 | -0.0057 | |
| июль | 0.0036 | - 0.0004 | - 0.0054 | - 0.0056 | -0.0078 | -0.0095 | -0.0053 | |

Таблица 5. Величины k(foE) для ст. Rome

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

| август | 0.0046 | - 0.0020 | - 0.0094 | -0.0128 | - 0.0082 | -0.0101 | 0.0054 |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|
| сентябрь | 0.0084 | 0.0012 | - 0.0044 | - 0.0082 | -0.0083 | -0.0056 | 0.0139 |
| октябрь | | 0.0039 | - 0.0092 | - 0.0097 | -0.0067 | -0.0061 | |
| ноябрь | | 0.0025 | -0.0034 | - 0.0035 | -0.0047 | -0.0008 | |
| декабрь | | 0.0051 | 0.0011 | -0.0025 | -0.0025 | 0.0016 | |

Таким образом, для ст. Rome отсутствуют сколь-нибудь значительные тренды *foE* даже в период после 1994 г., когда на ст. Juliusruh и Slough наблюдаются относительно большие тренды, демонстрирующие хорошо выраженный суточный и сезонные ход.

4.4 Краткое обсуждение результатов

Как уже указывалось в начале этого параграфа, работа Данилова и Константиновой [20186] не претендует на глубокий анализ физических процессов, которые могли бы объяснить полученные в статье морфологические результаты. Поэтому ниже мы просто просуммируем кратко эти результаты и выскажем несколько наиболее общих соображений по поводу того, что они могут означать.

Из полученных в указанной работе результатов нам представляются наиболее важными три.

Первое — наличие трендов на ст. Juliusruh, которые демонстрируют хорошо выраженный и статистически обоснованный суточный и сезонный ход. Сезонный ход состоит в том, что в период летнего солнцестояния для каждого из рассмотренных моментов LT величина k(foE) по модулю минимальна и существенно возрастает к зимним месяцам (см. рис. 11). Суточный ход k(foE) состоит в том, что в утренние часы величина k(foE) положительна (достигает +(0.02–0.04) МГц в год), а в вечерние часы – отрицательна (опускается до –(0.04–0.06) МГц в год).

Полученный суточный ход k(foE), на наш взгляд, говорит о том, что указанные тренды не могут быть обусловлены какими-то процессами, прямо связанными с солнечным ионизующим излучением, поскольку последнее контролируется зенитным углом Солнца, а он симметричен относительно полудня. Иначе говоря, зенитный угол будет одним и тем же в 09:00 LT и в 15:00 LT, а полученные нами величины k(foE) для этих моментов отличаются и по знаку, и по абсолютной величине.

Предположение, на которое наталкивает этот факт, состоит в том, что основную роль в указанном суточном поведении k(foE) играют динамические процессы, например, горизонтальный ветер, который может быть противоположно направлен в утренние и вечерние часы и менять свою интенсивность от зимы к лету. Вопрос о том, как подобные изменения горизонтального ветра могут реализоваться в виде полученных нами сезонных и суточных вариаций трендов *foE*, требует отдельного глубокого аэрономического исследования.

Второе — очень близкие результаты, полученные по k(foE) для двух станций, Juliusruh и Slough. Несмотря на трудности, связанные с анализом величин ΔfoE для станции Slough, и суточный и сезонный ход k(foE) для обеих станций получился одинаковым. При этом не только совпали направления изменения тренда от утренних часов к вечерним и от лета к зиме, но оказались близки даже абсолютные величины k(foE) в соответствующие месяцы и моменты LT (см. рис. 11, 13 и 14). Это, на наш взгляд, является важным подтверждением правильности применяемого метода нахождения трендов и полученных результатов.

Третье — существенное отличие поведения тренда k(foE) на ст. Rome от его поведения на двух других рассмотренных станциях. Фактически изменение ΔfoE в период после 1994 г. не приводит к заметным (превышающим по абсолютной величине 0.01 МГц в год) трендам ни в один из рассмотренных месяцев или моментов LT (см. Таблицу 5).

Такое различие в получаемых величинах трендов k(foE) и их поведении заставляет обратить внимание на тот факт, что станции Juliusruh и Slough находятся практически на одной широте, а ст. Rome расположена существенно южнее. Поскольку все три станции находятся в одном (Европейском) регионе, такое различие может быть существенным, только если играет роль расстояние вдоль меридиана до области аврорального овала. Возможные физические механизмы, для которых такое различие может быть принципиально важным, также требуют отдельного аэрономического рассмотрения, выходящего за рамки данной статьи.

Завершая это краткое обсуждение, следует обратиться к возможному вкладу в полученные результаты изменений магнитной активности. В упомянутой во Введении недавней статье Mikhailov

et al. [2017] получено, что поведение *foE* в течение всего рассматриваемого периода хорошо коррелирует со сглаженным за 132 месяца скользящим индексом *Ap*.

Мы проводили сравнение с магнитной активностью не исходных величин foE, а величин ΔfoE , поскольку из них уже «убрана» зависимость критической частоты от солнечной активности.

Поскольку мы работаем с месячными медианами *foE*, для сравнения с магнитной активностью мы использовали 12-месячный сглаженный индекс Ap, аналогично тому, как это делается в широко известной модели International Reference Ionosphere (IRI) для индекса солнечной активности R_{12} [Bilitza, 1990]. Именно этот индекс, обозначаемый ниже как Ap_{12} , использовался в данной работе.

В период после 1990–1995 гг., для которого в данной работе получились значимые тренды *foE*, величина Ap_{12} для большинства месяцев систематически уменьшалась. Если формально посчитать для этого периода индекс корреляции между ΔfoE и Ap_{12} , мы, естественно, получим высокие по абсолютной величине коэффициенты корреляции *R*. Так, для ст. Juliusruh для 15:00 LT величина *R* в зависимости от месяца меняется от 0.85 до 0.98.

Однако нам представляется случайным тот факт, что именно в период, для которого наблюдаются выраженные тренды *foE* (1994–2015 гг.), происходит также монотонное уменьшение Ap_{12} . Дело в том (см. выше 4.1 и 4.2), что в рассмотренный период величины k(foE) имеют разные знаки в вечернее и утреннее время. Таким образом корреляция между ΔfoE и Ap_{12} будет положительна в вечерние, отрицательна в утренние и мала в околополуденные часы. Кроме того, она будет сильно меняться с сезоном, увеличиваясь по модулю зимой и почти исчезая летом, когда тренды малы. Нам представляется такое сложное влияние магнитной активности на тренды *foE* маловероятным.

Кроме того, мы не обнаружили корреляции между ΔfoE и Ap_{12} в другие временные интервалы или какой-либо системы ее изменения. Величина R меняет знак от месяца к месяцу, во многих случаях оказывается близкой к нулю — словом ведет себя хаотичным образом. Например, для периода 1974–1994 гг. (ст. Juliusruh, 15:00 LT) величина R составляет – 0.47 в феврале, 0 в марте, + 0.69 в апреле, + 0.05 в июле и – 0.05 в августе.

Все сказанное позволяет нам считать, что изменения магнитной активности не являются причиной обнаруженных нами трендов *foE*. Однако, как мы уже указывали выше статья Данилова и Константиновой [20186] не претендует на глубокий анализ физических процессов в области *E*, которые могли бы привести к найденным в этой статье трендам и их морфологическим особенностям.

5 ТРЕНДЫ В ОБЛАСТИ **D**

Тренды в нижней части ионосферы (области *D*) были детально рассмотрены Laštovička [2001] и Laštovička and Bremer [2004]. Эти тренды выражаются в увеличении концентрации электронов на фиксированных высотах. Такое увеличение было впервые получено по наблюдениям отражения радиоволн на фиксированных частотах (первой были публикации Таубенхайм и др. [1988] и Taubenheim et al. [1990]). В дальнейшем подобные измерения слегка модифицированным методом, который был назван методом стандартных фазовых высот, проводились в течении двух десятилетий [Peters and Eintzian, 2016]. Строго говоря, указанным методом получают тренды высоты отражения радиоволн фиксированной частоты в низкочастотном диапазоне. Радиоволны этой частоты отражаются от уровня с $Ne \sim 500$ электронов см⁻³. Подробное описание метода и результатов можно найти в работе [Peters et al, 2015].

Ракетные измерения электронной концентрации в области *D* очень трудны. Зондовые измерения на этих высотах не надежны. Выявить тренды *Ne* можно только на основании анализа измерений, полученных методом распространения радиоволн на ракетах. Подобный анализ был выполнен в работах [Данилов и Смирнова, 1999; Danilov, 2000] на основании компиляции всех таких измерений. Было получено, что на высотах 75–80 км за период 1960–1980 гг. (период для которого имелись измерения указанным выше методом) произошло значительное (в несколько раз) увеличение электронной концентрации, причем степень увеличения зависела от сезона и широты.

Аналогичный анализ был проведен австрийской группой авторов [Friedrich and Torkar, 2001] на основании анализа ракетных измерений только этой группы тем же методом. Эти результаты были подтверждены в недавней работе Friedrich and Pock [2016]. Был получен положительный тренд *Ne* на высотах 75–95 км, равный 1 % в год. Хотя амплитуды эффекта в публикациях австрийской и российской групп были получены различными, качественно результаты совпали, указывая на рост электронной концентрации со временем на фиксированной высоте в верхней части области *D*.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

Причина наблюдаемого поведения области D со временем ясна в рамках рассматриваемой в данной работе концепции. Вертикальный профиль величины Ne в области D монотонно растет вверх. 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 Ne смещается вниз, и при этом очевидным образом на каждой фиксированной высоте величина электронной концентрации повышается.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено краткое суммирование результатов серии работ авторов, опубликованных в течение предыдущих лет и посвященных долговременным трендам параметров ионосферных слоев. Описан метод выделения трендов, разработанный авторами и использованный в указанных работах.

Основные результаты всей серии работ можно кратко просуммировать следующим образом. В слое F2 получены отрицательные тренды *foF2* и *hmF2*. Для *foF2* обнаружено существование существенно зависимости от времени суток и сезона: величины k(foF2) выше в дневное время, чем ночью и зимой выше, чем летом.

На основании долговременных изменений foF2 и зависимости foF2 и hmF2 сделан важный вывод о том, что в ходе охлаждения и оседания верхней атмосферы уменьшается количество атомного кислорода.

Найдена зависимость трендов критической частоты слоя E от времени суток и сезона для двух станций: Juliusruh и Slough. При этом знак тренда k(foE) для утренних и вечерних часов, а абсолютная величина тренда увеличивается от периода летнего солнцестояния к зиме. Для более низкоширотной станции Rome не найдено значительных трендов критической частоты слоя E.

ЛИТЕРАТУРА

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Долговременные тренды свойств ионосферы и термосферы средних широт, Докл АН., 333(1), 86-89, 1993.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б., Пространственные и временные вариации отношения foF2(ночь)/foF2(день): уточнение ряда эффектов, Геомагнетизм и аэрономия, 48 (2), 228-240, 2008а.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б., Критические частоты *foF2* как индикатор трендов термосферной динамики, Геомагнетизм и аэрономия, 48 (6), 810-822, 2008б.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б., Разброс величин *hmF*2 как индикатор трендов термосферной динамики, Геомагнетизм и аэрономия, 49 (1), 58-62, 2009.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б., Сравнение величин *foF2* в дневное время и после захода Солнца, Геомагнетизм и аэрономия, 50 (1), 61- 66, 2010.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота, Геомагнетизм и аэрономия, 53 (3), 361-372, 2013а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 2. Высота слоя, Геомагнетизм и аэрономия, 53 (4), 486-499, 2013б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Уменьшение атомного кислорода атомного кислорода в верхней атмосфере, Геомагнетизм и аэрономия, 54 (2), 239-245, 2014.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Вариации трендов *foF2* сезоном и временем суток, Геомагнетизм и аэрономия, 55 (1), 56–63, 2015а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Сравнение трендов параметров слоя F2, полученных разными авторами, Геомагнетизм и аэрономия, 55 (4), 473–482, 2015б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Тренды критической частоты *foF2* после 2009 г., Геомагнетизм и аэрономия, 56 (3), 324–332, 2016а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Изменение связи между foF2 и hmF2 со временем, Геомагнетизм и аэрономия, 56 (5), 612-614, 20166.

- Данилов А. Д., Константинова А. В., Долговременные тренды критической частоты слоя Е, Геомагнетизм и аэрономия, 58 (),...., 2018а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Суточные и сезонные вариации критической частоты слоя Е, Геомагнетизм и аэрономия, 58 (),, 2018б.
- Данилов А. Д., Смирнова Н.В., Долговременные тренды ионного состава области *E*, Геомагнетизм и аэрономия, 37 (4), 43-49, 1997.
- Данилов А. Д., Смирнова Н. В., Долговременные тренды электронной концентрации в области D: экспериментальные данные, Геомагнетизм и аэрономия, 39 (2), 107-112, 1999.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Выбор рядов исходных данных при определении трендов параметров слоя F2 ионосферы, Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 3. С. 361.
- Похунков А. А, Рыбин В. В., Тулинов Г. Ф., Исследование количественных характеристик долговременных изменений параметров верхней атмосферы Земли за период 1966-1992 гг., Космические исследования, 47 (6), 515-526, 2009.
- Таубенхайм И., фон Коссарт Г., Ентциан Г., Глобальные изменения климата и нижняя ионосфера. Тез. 3го Семинара КАПГ по метеорологическим эффектам в ионосфере (София, 31 октября – 4 ноября 1988 г.).
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990. Greenbelt, Maryland: National Space Science Data Center, NSSDC/WDC-A-R&S 90–22. 1990.
- Bremer J., Trends over the ionospheric E and F regions over Europe, Ann. Geophysicae, 16, 986-996, 1998.
- Bremer J., Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations, Adv. Space Res., 28 (7), 997-1006, 2001.
- -Bremer J., Long-term trends in the ionospheric E and F1 regions, Ann. Geophysicae, 26, P. 1189–1197, 2008.
- Bremer J., Damboldt T., Mielich J., Suessmann P. Comparing long-term trends in the ionospheric F2 region with two different methods, J. Atm. Sol.-Terr. Phys., 77, 174–185, 2012.
- Damboldt T., Suessmann P., Consolidated database of worldwide measured monthly medians of ionospheric characteristics *foF2* and M(3000)F2, INAG Bulletin on the Web, INAG-73. 2012.
- -Danilov A.D., New ideas on the D-region modeling, Advances in Space Research. V. 25, Issue 1, P. 5-14, 2000
- Danilov A.D., Time and spatial variations in the ratio of nighttime and daytime critical frequencies of the F2 layer, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 70, 1201-1212, 2008.
- -Danilov, A.D., Seasonal and diurnal variations in *foF2* trends, J. Geophys. Res., 120, doi 10.1002/2014JA020971, 2015.
- Danilov A. D, Kalgin Yu. A., Seasonal and latitudinal variations of eddy diffusion coefficient in the mesosphere and lower thermosphere, J. Atmos. Terr. Phys., 54 (11/12), 1481-1489, 1992.
- Danilov A. D, Kalgin Yu. A., Eddy diffusion studies in the lower thermosphere, Adv. Space Res., 17 (11), 17-24, 1996.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V., Trends in the F2 layer parameters at the end of the 1990s and the beginning of the 2000s, J. Geophys. Res., 118 (12), 5947–5964, doi:10.1002/jgrd.50501, 2013.
- Donaldson J.K., Wellman T.J., Oliver W.L., Long-term change in thermospheric temperature above Saint Santin, J. Geophys. Res., 115(A11305), 2010.
- Elias A. G., de Haro Barbas B. F., Shibasaki K., Souza J. R. Effect of solar cycle 23 in *foF2* trend estimation, , Planets and Space, 2014, 66:111
- Elias A., de Haro Barbas B. F., Zossy B. S., Saavedra Z., Earth's magnetic field effect on MUF calculation and consequences for hmF2 trend estimates, Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- 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., Thermospheric mass density: A review, Advances in Space Research 56 (2015) 773-824
- -Friedrich M., Torkar K.M., Long-term trends and other residual features of the lower ionosphere, Proc. 15th

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programs and Related Research, Biarritz, France, 28-31 May 2001 (ESA SP-471, August 2001).

- -Frierdich 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 (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- -Garsia R., Lopez-Puertas M., Funke B., Kinnison D. E., Marsh D. R., Smith A. K., Gonzales-Galindo F., On the distribution of CO2 and CO in the mesosphere and lower thermosphere, J. Geophys. Res., 119, 5700-5718, 2014.
- -Hierl P. M., Dotan I., Seeley J. V., Van Doren J. M., Morris R. A., Viggiano A. A., Rate constants for the reactions of O⁺ with N₂ and O₂ as a function of temperature (300–1800 K), J. Chem. Phys., 106,. 3540, doi:10.1063/1.473450, 1997.
- Kalgin Y. A. Dynamical aspect of long-term trend of the neutral atmosphere composition at turbopause region, in Proc. Int. Workshop "Cooling and Sinking of the Middle and Upper Atmosphere", Moscow. 1998, P. 26– 27.
- -Khaitov R., Kolesnik S., Sarychev V., Seasonal, diurnal variations in critical frequency of the F2-layer over middle latitudes, Paper presented at the 7th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos-Aires, Argentina. September 11-14, 2012).
- Lastovicka J., Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 71, 1514–1528, 2009.
- Lastovicka J., A review of recent progress in trends in the upper atmosphere, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 163, 2-13, 2017.
- Laštovička J., Bremer J. An overview of long-term trends in the lower ionosphere below 120 km, Surveys of Geophysics, 25 (1), 69–99, 2004.
- Lastovicka J., Mikhailov A.V., Ulich T., et al., Long-term trends in *foF2*: a comparison of various methods, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 68, 1854-1870, 2006.
- Lastovicka J., Akmaev R. A., Beig G. et al., Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere, Ann. Geophysicae, 26 (5), 1255-1268, 2008.
- Mielich J., Bremer J., Long-term trends in the ionospheric F2 region with two different solar activity indices, Ann. Geophys., 31, 291—3036 2013.
- Mikhailov A. V., The geomagnetic control of the F2-later parameter long-term trends, Phys. Chem. Earth., 27, 595-606, 2002.
- Mikhailov A.V., Perrone L., Geomagnetic control of the mid-latitude *foF1* and *foF2* long-term variations: Recent observations in Europe, J. Geophys. Res. 121, 7193–7203, doi: 10.1002/2016JA022716, 2016.
- Mikhailov A. V., Skoblin M. G., and Forster M., Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes, Ann. Geophys., 13 (5), 532–540, 1995.
- -Mikhailov A.V., Perrone L., Nusinov A.A., A mechanism of mid-latitude noontime foE long-term variations inferred from European observations, J. Geophys. Res., 122, doi: 10.1002/2017JA023909, 2017.
- Oliver, W. L., Holt, J. M., Zhang, S.-R., and Goncharenko, L. P. (2014). Longterm trends in thermospheric neutral temperature and density above Millstone Hill. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 119(9), 79407946.
- Perrone L., Mikhailov A., Geomagnetic control of the midlatitude *foF1* and *foF2* long-term variations: Recent observations and interpretation, Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- Peters D. H. W., Entzian G., Long-term variability of 50 years of standard phase height measurements at Kuhlunsborn, Mecklenburg, Germany, Adv. Space res. 55, 1764-1774, 2015.
- Peters D. H. W., Entzian G., Standard Phase Height Measurements, Trends and Long-Term Variability of Temperature Over Europe, Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- Richards P. G., Reexamination of ionospheric photochemistry, J. Geophys. Res., 116. (A08307), doi:10.1029/2011JA016613, 2011.
- -Rishbeth H., Edwards R. The isobaric F2-layer, J. of Atmos. and Terr. Phys. V. 51, Issue 4, P. 321-338, 1989

- -Roinen L., Ulich T., Laine M., Rey N., Rouset H.I., Time-varying ionosonde trend: Case study of Sodankula Observatory hmF2, Paper presented at the 8th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Cambridge, England, July 27—31, 2014), 2014.
- -Rojas Villaba E., Milla M., A long-term trend study of the F-region peak height above Jicamarca, Paper presented at the 7th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos-Aires, Argentina, September 11-14, 2012).
- Scotto C., The accuracy of data from ionosondes for the estimation of hmF2 and the identification of global change in the ionosphere, Adv. Space Res. 52 (2013) 569–574
- Sharma K., Chandra S., Long-term changes in the ionosphere at low latitudes: impact of greenhouse gases Paper presented at the 7th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Buenos-Aires, Argentina, September 11-14, 2012).
- Smith, A. K., Marsh D. R., Mlynczak M. G., Mast J. C., Temporal variations of atomic oxygen in the upper mesosphere from SABER, J. Geophys. Res., 115 (D18309), doi:10.1029/2009JD013434, 2010
- Solomon S. C., Qian L., and Roble R. G., New 3D Simulations of Climate Change in the Thermosphere, J Geophys. Res. 120 (3), 2183-2193, 2015.
- Solomon S, Liu H, March D., Mcinemdy J., Qian L., Vitt F., Thermosphere-Ionosphere Response to Atmospheric Climate Change Modeled by WACCM-X, Paper presented at the 9th Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- Taubenheim J., von Cossart G., Eintzian G, Evidence of CO₂-induced progressive cooling of the middle atmosphere derived from radio observations, Adv. Space Res., 10 (10), 171-174, 1990.
- Yue J., Jan Y, Rezak 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 (Kuhlungsborn, Germany, September 19-23, 2016).
- Zhang S.R., Holt J.M., Millstone Hill ISR observations of upper atmospheric long-term changes: height dependency, J. Geophys. Res., 116, doi:10.1029/2010JA016414, 2011.

LONG-TERM TRENDS IN THE IONOSPHERE LAYERS PARAMETERS

A. D. Danilov, A.V. Konstantinova

A generalized description of publications of the authors dealing with long-term variations (trends) in ionospheric F2, E, and D layers is presented The main results obtained for each layer are summarized and the concept developed by the authors and used to reveal the indicated trends is described.

KEYWORDS: IONOSPHERE, TRENDS

32