

УДК 551.510.535

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СВОЙСТВ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СЛОЯ F_2 В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ

© 2021 г. Н. П. Сергеев*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

**e-mail: serg@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 12.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

На большом массиве экспериментальных данных по наблюдениям ионосферных станций вертикального зондирования, расположенных в различных регионах земного шара, изучены особенности многолетних (1948–2019 гг.) временных рядов относительных вариаций критических частот слоя F_2 ионосферы во время возмущений. Показано, что такие параметры ионосферных возмущений как амплитуды положительных возмущений, зарегистрированных на всех станциях, статистически значимо увеличиваются, начиная с 70–80-х гг. прошлого столетия. Также увеличиваются годовые числа ионосферных возмущений, не связанных с геомагнитной активностью. Обнаруженные эффекты могут быть связаны с атмосферными трендами естественного и антропогенного происхождения, в результате чего усиливается динамический режим на высотах F_2 -слоя.

DOI: 10.31857/S0016794021020152

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени известно, что тренды ионосферных характеристик чрезвычайно разнообразны и по знаку, и по величине. Более того, их характер, как и ожидалось, зависит от региона и различен для среднеширотной, высокоширотной и приэкваториальной ионосферы. Даже для близких географических широт наблюдались региональные различия, возможно, связанные с различиями в геомагнитной широте или различиями в климатических характеристиках нижележащей атмосферы. В ряде случаев наблюдались статистически незначимые, и даже нелинейные тренды. Стало очевидным, что в процессе анализа необходимо отфильтровывать влияние солнечной и геомагнитной активности, которые и сами по себе испытывают многолетние вариации. Предполагаемые причины климатических трендов параметров спокойной ионосферы – рост концентрации парниковых газов, уменьшение концентрации озона, вариации солнечной и геомагнитной активности, вековые вариации напряженности геомагнитного поля, изменения характера распространения внутренних атмосферных волн, прежде всего – планетарных.

Появилось много отечественных и зарубежных работ (см., например, обзоры [Данилов, 2012; Данилов и Константинова, 2020]) по самым различным аспектам проблемы, связанным как с по-

исками трендов различных параметров на основании многолетних рядов наблюдений, так и с теоретическим моделированием эффектов в атмосфере и ионосфере, вызываемых увеличением количества CO_2 . Много новых результатов было доложено на регулярно проводившихся симпозиумах по долговременным трендам. Основные выводы этих исследований, так или иначе имеющих отношение к теме нашей работы, состоят в следующем.

1. Согласно анализу эволюции орбит десятков тысяч спутников, происходит систематическое уменьшение плотности термосферы на высотах 400–600 км. Это уменьшение составляет 2–3% за десятилетие при средней и высокой солнечной активности и растёт до 6–7% за десятилетие в минимуме солнечной активности [Emmert et al., 2004; Keating et al., 2000; Marcos et al., 2005].

2. Измерения ионной температуры на высотах 200–300 км, где считается, что температуры ионов и нейтралов равны, на нескольких установках некогерентного рассеяния дают отрицательный тренд T , равный в среднем 20–30 К за десятилетие. В работе [Zhang et al., 2016] подробно рассмотрены результаты наблюдений на четырех установках НР (Millstone Hill, Chatanika, Sondrestrom и Saint Santin). Авторы пришли к выводу, что по данным некогерентного рассеяния наблюдаются гораздо более высокие отрицательные

тренды термосферной температуры, чем дают данные по торможению спутников и теоретические модели.

3. Большинство групп исследователей получено, что наблюдаются отрицательные тренды критической частоты и высоты ионосферного слоя $F2$. Анализ этих трендов, проведенный в работах [Данилов и Константинова, 2015, 2016], дает основания предположить, что со временем изменяется абсолютная величина концентрации атомного кислорода $[O]$, что и приводит к отрицательным трендам $foF2$.

4. Область F весьма чувствительна к динамическим процессам (прежде всего — вертикальным дрейфам плазмы, вызываемым горизонтальными ветрами). Яркие примеры этого мы видим во время ионосферных бурь, когда появляется буревая циркуляция и вертикальные потоки плазмы, приводящие к сильным изменениям всего глобального распределения $foF2$ и $hmF2$ (см, например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Qian et al., 2006]). Изменения системы горизонтальных ветров должны сильно влиять на параметры слоя $F2$ и могут приводить к гораздо большим трендам, чем ожидается только за счет охлаждения и оседания атмосферы.

В работе [Данилов и Ванина-Дарт, 2009] развивается идея о том, что тренды различных комбинаций параметров ионосферного слоя $F2$ могут служить индикатором трендов термосферной динамики. Полученные результаты указывают на то, что разброс величин $hmF2$ существенно возрос за период с 1950-х по 1990-е годы. Этот результат очень важен для развиваемой авторами концепции о том, что наблюдаемые тренды параметров слоя $F2$ вызваны изменениями в течение последних десятилетий системы термосферных ветров. Отмечается, что подобные изменения параметров глобальной циркуляции могут быть вызваны изменениями температурного режима термосферы и средней атмосферы, происходящими из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов [Laštovička et al., 2017].

Признание существования статистически значимого многолетнего тренда ионосферных процессов на уровне слоя $F2$, очевидно, проявляется и в характеристиках ионосферных возмущений.

Целью настоящей работы является продолжение исследования трендов параметров ионосферных возмущений [Сергеенко и др., 1996; Sergeenko and Givishvili, 1999; Сергеенко, 2020]. При этом будет рассмотрена эволюция свойств как магнито-ионосферных бурь и суббурь, так и всех возмущений, происходящих на спокойном геомагнитном фоне. Для всех типов возмущений будет оценена динамика амплитуды возмущений, а для возмущений, происходящих на спокойном геомагнитном фоне, будет изучено изменение их го-

довых чисел на интервале времени 1948–2019 гг. При этом исследования будут проведены по данным ионосферных станций, расположенных в разных регионах.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Использованы данные вертикального зондирования ионосферы станций вертикального зондирования Москва ($\varphi = 55.5$; $\lambda = 37.3$), Слоу ($\varphi = 51.5$; $\lambda = -0.58$), Чилтон ($\varphi = 51.6$; $\lambda = -1.30$) и Хобарт ($\varphi = -42.88$; $\lambda = 147.33$) за период 1948–2010 гг. Для исключения регулярных вариаций ежедневных критические частоты слоя $F2$ пересчитаны в относительные отклонения критических частот от скользящего медианного значения:

$$\delta foF2 = (foF2_{\text{тек}} - foF2_{\text{мед}}) / foF2_{\text{мед}}$$

$foF2_{\text{тек}}$ — наблюдаемые ежедневные значения критической частоты слоя $F2$; $foF2_{\text{мед}}$ — скользящее медианное значение. Скользящая медиана вычислялась с окном скользящего значения 10 сут. Использование скользящей медианы исключает влияние суточных и сезонных регулярных изменений. Параметр $\delta foF2$ используется в краткосрочном ионосферном прогнозировании как индекс ионосферных возмущений [Зевакина и др., 1990]. Значения $|\delta foF2| \geq 20\%$ считаются возмущенными.

Для анализа многолетние данные ежедневных наблюдений $foF2$ по всем станциям были пересчитаны в $\delta foF2$ и были определены максимальные положительные и минимальные отрицательные значения $\delta foF2(t)$ за все сутки на многолетнем интервале. На рисунке 1 приведен пример таких расчетов для ст. Хобарт (Австралия) за 1950–2019 гг.

Аналогичные расчеты были сделаны по данным наблюдений ст. Москва за 1948–2019 гг. и ст. Слоу за 1948–1995 гг. и ст. Чилтон за 1995–2019 гг. (ст. Слоу прекратила работу в 1995 г., близко к ней расположенная ст. Чилтон продолжила наблюдения). Далее по полученным массивам данных были определены максимальные за каждый год значения амплитуд положительных и отрицательных возмущений для зимнего (январь) и летнего (июль) сезонов. Результаты представлены на рис. 2.

Как показал анализ, тенденция такова, что интенсивность положительных возмущений увеличивается примерно с начала 80-х годов на всех трех станциях и в летний, и в зимний периоды, за исключением летнего сезона в Москве. Это увеличение положительных значений $\delta foF2$ достигает в последние десятилетия 200%, а на австралийской ст. Хобарт — даже еще выше.

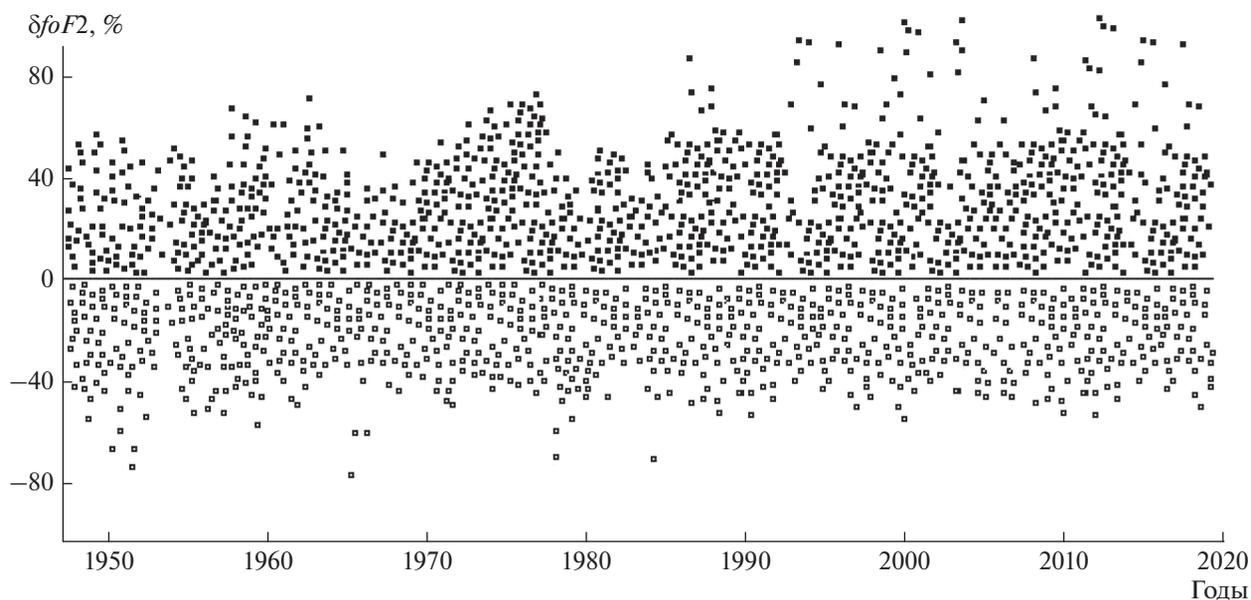


Рис. 1. Максимальные (точки) и минимальные (кружки) за каждые сутки 1950–2019 гг. значения $\Delta foF2$, рассчитанные для ст. Хобарт (Австралия).

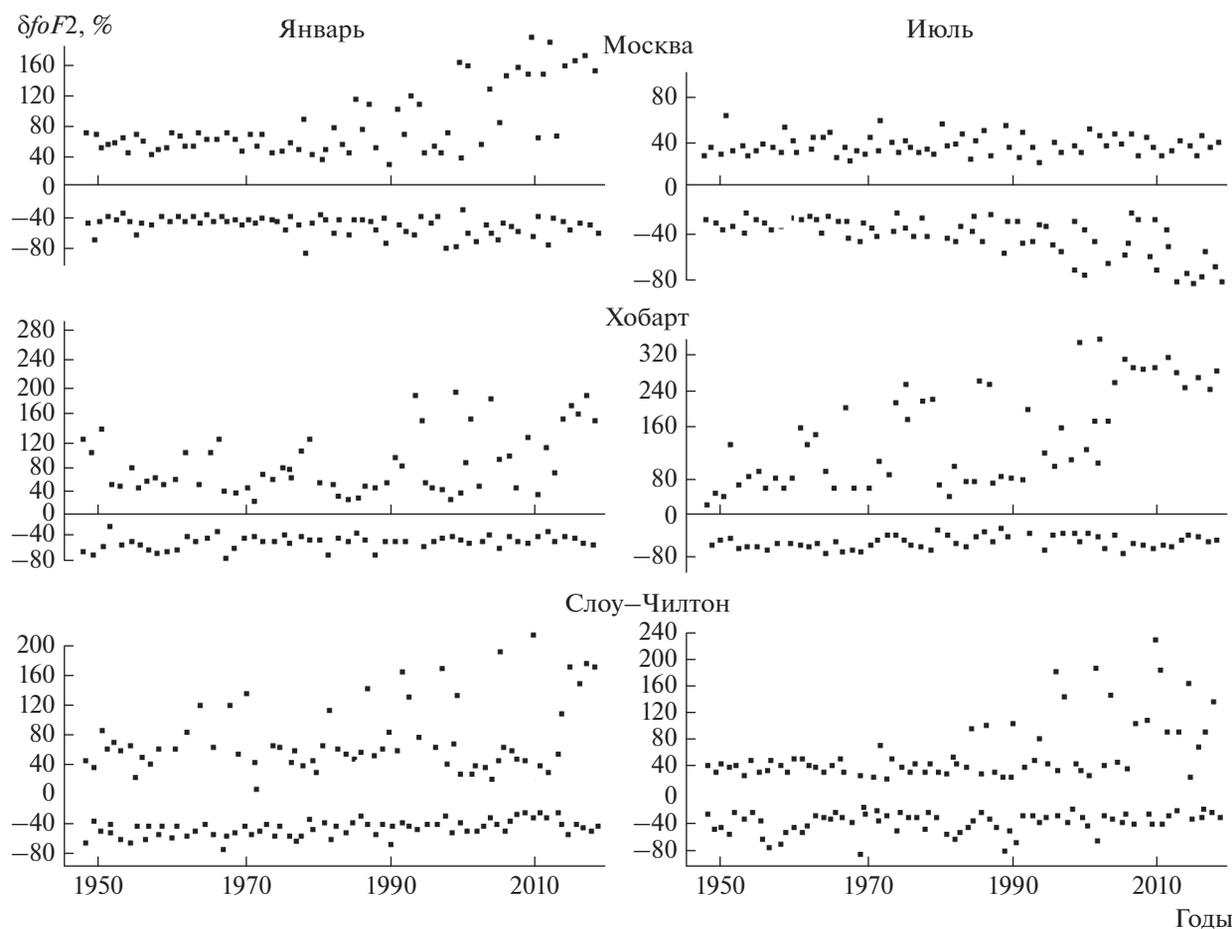


Рис. 2. Изменения максимальных за каждый год с 1950 по 2019 гг. значений амплитуды положительных и отрицательных возмущений вариаций критической частоты слоя $F2$ для января и июля.

Для отрицательных возмущений на станциях Хобарт и Слоу/Чилтон трендов $\delta foF2$ не выявлено. На ст. Москва на рис. 2 отчетливо виден тренд в сторону увеличения интенсивности отрицательных возмущений начиная с 80-х годов. Ранее аналогичный тренд по данным ст. Москва был отмечен и в равноденствие [Сергеенко, 2020]. Этот эффект в трендах отрицательных возмущений объяснялся главным образом уменьшением концентрации атомного кислорода $n(O)$ в фоновой ионосфере на высоте главного максимума.

3. МНОГОЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ ЧИСЛА ДНЕЙ С ИОНОСФЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Важной характеристикой изменчивости ионосферы на многолетнем интервале является общее число возмущенных дней в год. За период 1948–2019 гг. по полученным данным для всех станций было посчитано число дней с положительными и отрицательными возмущениями в слое $F2$ различной интенсивности. Чтобы проследить долговременную динамику этой характеристики, подсчитывалось число возмущений за год. При этом рассматривались только те возмущенные дни, которые не были связаны с магнитными бурями, но проявлялись достаточно четко, т.е. $\delta foF2_{\max} > |20\%|$ и продолжительностью не менее 5 ч.

Чтобы исключить из анализа ионосферные бури, происходящие на фоне геомагнитных, в работе использовались данные о магнитных возмущениях за период 1878–1975 гг. [Афанасьева и Шевнин, 1978], опубликованные каталоги наблюдений “Космические данные” за 1976–2000 гг., а также каталог магнитных бурь, представленный на сайте ИЗМИРАН (www.izmiran.ru), с помощью которых отождествлялись ионосферные возмущения, происходящие одновременно с магнитными бурями.

На рисунке 3а и 3б приведено распределение годового числа дней с положительными и отрицательными ионосферными возмущениями, происходящими на спокойном геомагнитном фоне за весь период наблюдения ионосферных станций Москва, Хобарт, Слоу и Чилтон в июле и январе. Из рисунка 3а видно, что число положительных возмущений над Москвой в последние годы летом не намного уменьшалось, а количество отрицательных ионосферных возмущений имеет тренд в сторону увеличения на ~ 10 бурь (при среднеквадратическом отклонении 7.15), что является значимым трендом. А на станциях Хобарт и Слоу/Чилтон многолетний тренд как отрицательных, так и положительных возмущений четко направлен в сторону увеличения.

Рисунок 3б иллюстрирует, что зимой на всех станциях наблюдаются долговременные тренды

количества положительно возмущенных дней на спокойном геомагнитном фоне. Трендов количества отрицательных возмущений не наблюдалось.

Природа возмущений на спокойном геомагнитном фоне полностью не изучена, вполне возможно они связаны с другими природными явлениями. Тем не менее, в слое $F2$ происходят описанные выше возмущения. Их продолжительность может достигать 1.0–1.5 сут, интенсивность — $\delta foF2_{\max} \sim 40\text{--}50\%$, по типу они относятся, как правило, к однофазным возмущениям.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные в публикациях [Roble and Dickinson, 1989; Rishbeth, 1990] расчеты показывают, что климатические изменения могут быть связаны с изменением газового состава и температуры атмосферы, которые проявляются не только в спокойной ионосфере, но и в возмущенных условиях. Приведенные в настоящей работе результаты показали, что последствия трендов в слое $F2$ в спокойных условиях проявились в долговременной эволюции параметров ионосферных возмущений.

Ионосферные возмущения составляют целый комплекс аномальных явлений, возникающих в ионосфере в результате усиления солнечного излучения из активных областей. Поступление солнечной энергии в область F происходит, главным образом, через авроральную зону. Как показывают оценки, передача энергии в ионосферу в виде джоулева тепла и энергии авроральных частиц происходит непрерывно на уровне 3 эрг/см² с, а в возмущенные периоды возрастает до 30 эрг/см² с [Акасофу и Чепмен, 1975]. Наиболее сложными являются возмущения области F . Они протекают по-разному в различных регионах земного шара.

В практике краткосрочного прогнозирования ионосферной бури называют значительное уменьшение или увеличение электронной концентрации на высотах 200–1000 км, продолжающееся более 5 ч. Буря часто состоит из серии суббурь, поэтому теоретические исследования направлены в основном на исследование суббури в ионосфере как одного из проявлений магнитосферной суббури — комплекса геофизических явлений, связанных с диссипацией энергии, накопленной и поступающей в магнитосферу из солнечного ветра. Электрическое поле магнитосферной конвекции приводит в движение ионосферную плазму, которая посредством соударений изменяет крупномасштабное движение нейтральных составляющих. Наблюдения нейтрального ветра в высоких широтах показывают, что направление и скорость его сильно зависят от уровня геомагнитной активности [Rees, 1971; Hedin et al., 1991]. Изменение плотности и температуры

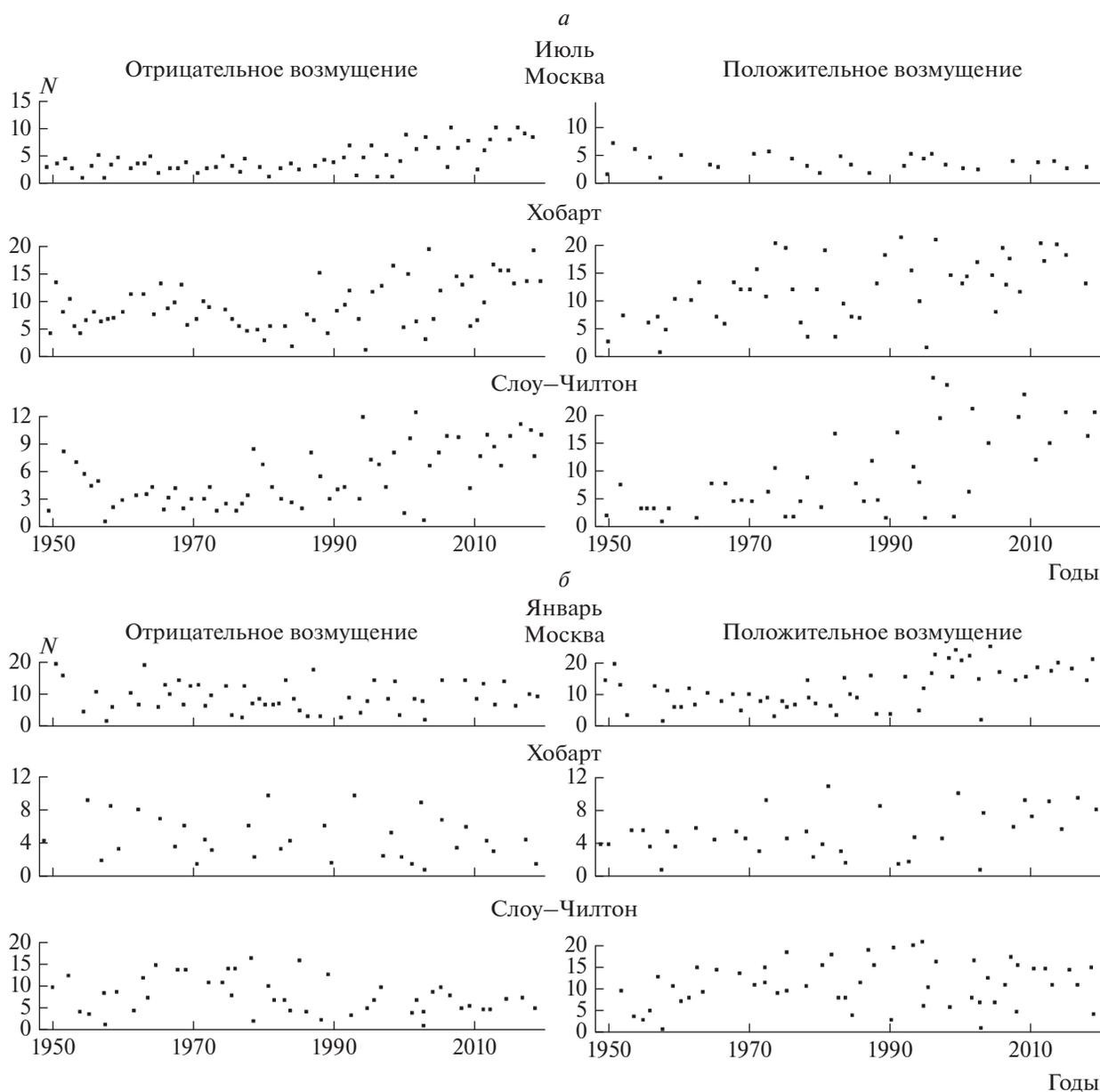


Рис. 3. (а) — Число ежегодных возмущенных дней в летнее время (июль); (б) — число ежегодных возмущенных дней в зимнее время (январь).

атмосферы должно влиять на такие процессы, как диссоциация или рекомбинация молекул и атомов кислорода, а также диффузия отдельных составляющих атмосферы [Chandra and Spencer, 1976; Bremer et al., 2012].

Физическая природа наблюдаемых долговременных изменений параметров ионосферных возмущений может быть связана с факторами как естественного, так и антропогенного происхождения. Генезис наблюдаемых долговременных изменений положительных и отрицательных возмущений различен, поскольку их механизмы и причины различны.

4.1. Отрицательные возмущения

В работе [Сергеенко, 2020] показано, что увеличивающийся тренд амплитуды отрицательных возмущений связан в наибольшей степени с изменением нейтрального состава во время магнитосферных возмущений и, в особенности, от отношения $[O]/[N_2]$. Отмечаемый эффект многолетних изменений свойств отрицательных ионосферных возмущений сводится к многолетнему уменьшению содержания атомного кислорода на высотах слоя F_2 в спокойных условиях. Более высокая интенсивность отрицательных бурь по-

следних лет должна быть обусловлена более низким отношением $[O]/[N_2]$ в сравнении с бурями до 80-х годов. На первый взгляд, это противоречит данным [Roble and Dickinson, 1989; Семенов и др., 1996], согласно которым в последние десятилетия фоновые (невозмущенные) значения $[N_2]$ понизились более заметно, чем $[O]$. Однако во время интенсивных бурь в результате разогрева атмосферы происходит дополнительное увеличение температуры нейтрального газа на 100–400 К. Согласно многочисленным экспериментальным данным, это приводит к возрастанию $[N_2]$ на средних широтах в 5–10 раз при практически мало изменяемой концентрации $[O]$ [Щепкин и Климов, 1980]. Иначе говоря, многолетнее падение фонового содержания $[N_2]$ компенсируется многократным его увеличением в процессе бури, тогда как для $[O]$ такой компенсирующий механизм отсутствует. Именно по этой причине в многолетних трендах отношения $[O]/[N_2]$ для возмущенных условий падение фоновой концентрации $[O]$ в спокойных условиях имеет существенно более важное значение, чем соответствующее уменьшение $[N_2]$. Этот вывод подтверждают и изменения годовых чисел ионосферных возмущений, происходящих на спокойном геомагнитном фоне: наблюдаемое увеличение количества отрицательных возмущений объясняется все тем же падением фоновой концентрации $[O]$.

4.2. Положительные возмущения

Как показал анализ многолетнего поведения положительных возмущений, в последние десятилетия также увеличились амплитуды положительных возмущений, зарегистрированных на всех обсерваториях зимой и летом, за исключением летних условий по наблюдениям в Москве, когда наоборот – увеличилась интенсивность отрицательных ионосферных возмущений в среднем на 10–15%.

В отличие от отрицательных бурь, физическая природа положительных ионосферных возмущений никак не связана с изменением отношения $[O]/[N_2]$. Известно, что область F весьма чувствительна к динамическим процессам, яркие примеры этого мы видим во время ионосферных бурь, когда появляется буревая циркуляция и вертикальные потоки, приводящие к сильным изменениям всего глобального распределения $foF2$ и $hmF2$ [Qian et al., 2006]. Именно эти усиления возмущенных ветров и ответственны за формирование положительных ионосферных бурь [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Дующие из разогретых высоких широт к экватору нейтральные ветры приводят ионосферную плазму в движение вдоль силовых линий геомагнитного поля, геометрия которого такова, что на средних широтах плазма

поднимается вверх на высоты, где скорость ее комбинации уменьшается и концентрация электронов увеличивается. В низких широтах наклон силовых линий относительно земной поверхности уменьшается до нулевого на экваторе, ионосферная плазма перемещается практически горизонтально ветрами.

Вариации величины скоростей ветра на высотах $F2$ при различной степени возмущений можно оценить из уравнения движения. Меридиональная U и зональная V составляющие скорости ветра могут быть записаны следующим образом без учета вязкости:

$$U = (1 + b)^{-1} [F_x / (R \sin^2 I) + b F_y / a],$$

$$V = (1 + b)^{-1} [F_y / R - b F_x / a],$$

где $b = a^2 / R \sin^2 I$; $a = 2\Omega \sin \varphi$; Ω – угловая скорость вращения Земли; φ – широта; $R = n_i \sum v_{ik} \mu_{ik} / \rho$, n_i – концентрация ионов, v_{ik} – частота соударений ионов с нейтральными частицами, μ_{ik} – приведенная масса, ρ – плотность нейтрального газа. Уравнения для сил градиентного давления на единицу массы:

$$F_x = -\rho^{-1} \partial p / \partial x, \quad F_y = -\rho^{-1} \partial p / \partial y \quad (1)$$

могут быть записаны так:

$$F_x = -g \frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad F_y = -g \frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}$$

где h – высота точки на изобарической поверхности; T – температура.

В работах [Keating et al., 2000; Emmert et al., 2004; Marcos et al., 2005] на основе анализа более чем 10000 орбит спутников показано, что плотность термосферного газа ρ систематически уменьшается на высоте ~400 км в пределах 1.7–7.4% за десятилетие. Таким образом, долговременные изменения температуры и плотности нейтрального газа в результате парникового эффекта существенно изменяют движущие силы и соответственно усиливают динамический режим в слое $F2$, как это следует из (1).

Изменения системы горизонтальных ветров должны сильно влиять на параметры слоя $F2$ и могут приводить к большим многолетним трендам. В работе [Данилов, 2020] развивается идея о том, что тренды различных параметров ионосферного слоя $F2$ могут служить индикатором трендов термосферной динамики. При этом указанные изменения могут быть как односторонне направленными, так и имеющими колебательный характер, например, более частая смена направления зонального или меридионального ветра на противоположный. Подобные изменения параметров глобальной циркуляции могут происходить вследствие изменений температурного ре-

жима и плотности термосферы и средней атмосферы, происходящих из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов [Laštovička, 2017].

Во время магнитосферных бурь и суббурь амплитуды скоростей нейтрального ветра значительно увеличиваются по отношению к фоновым значениям. Из-за нелинейной зависимости температуры от магнитной активности меридиональная составляющая ветра существенно увеличивается, что и приводит к значительному росту электронной концентрации на уровне слоя F_2 .

Таким образом, многолетние тренды положительных и отрицательных возмущений свидетельствуют с очевидностью об изменениях в термосфере, связанных с изменением концентрации парниковых газов, последующими изменениями температуры, плотности термосферы. Эти изменения приводят к усилению динамического режима в слое F_2 , меридиональной и зональной компонентам термосферного ветра, оказывающим влияние на формирование трендов положительных возмущений, которые отмечены в настоящей работе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ многолетних (~70 лет) временных рядов параметров ионосферных возмущений слоя F_2 показал, что зависимость $\delta foF_2(t)$ имеет статистически значимый тренд. Показано, что интенсивность ионосферных возмущений, а также годовые числа ионосферных возмущений статистически значимо увеличиваются начиная с конца 80-х годов. Причина наблюдаемых долговременных изменений параметров ионосферных возмущений может быть связана как с трендами солнечной и геомагнитной активности, так и с антропогенной деятельностью.

Хотя качественно картина существенно прояснилась за последние годы, остаются еще нерешенные проблемы. Одна из них состоит в том, что реально наблюдаемые тренды ионосферных и термосферных параметров больше, чем дают самые совершенные на сегодня модели. Эти модели дают примерно такое изменение, которое реально наблюдается сегодня, но для случая удвоения количества парниковых газов, а реальное увеличение, например, количества двуокиси углерода пока еще в несколько раз меньше.

Большая амплитуда положительных возмущений свидетельствует о том, что сильные изменения происходят и в динамике термосферных ветров. По-видимому, этот фактор и является решающим в объяснении больших, чем ожидаемые, трендов в слое F_2 , при все еще недостаточном для таких изменений наблюдаемым концентрациям парниковых газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир. 509 с. 1975.
- Афанасьева В.И., Шевнин А.Д. Некоторые статистические характеристики магнитной активности / Геомагнитная активность и ее прогноз. М.: Наука. С. 5–33. 1978.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 527 с. 1988.
- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Разброс величин hmF_2 как индикатор трендов термосферной динамики // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 49. № 1. С. 58–62. 2009.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов foF_2 с сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 55. № 1. С. 56–63. 2015.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Изменение связи между foF_2 и hmF_2 со временем // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 56. № 5. С. 612–614. 2016.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 60. № 3. С. . 2020.
- Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеев Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы (Материалы мирового центра данных Б). М.: МГК при През. АН СССР. 71 с. 1990.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н., Фишкова Л.М., Лысенко Е.В., Перов С.П., Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Сергеев Н.П. Об изменении климата верхней и средней атмосферы // Докл. Академии наук. Т. 349. № 1. С. 108–110. 1996.
- Сергеев Н.П. Многолетняя эволюция параметров ионосферных возмущений слоя F_2 // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 60. № 3. С. 337–343. 2020.
- Сергеев Н.П., Кулешова В.П., Лукьянова Л.Н. Долговременные ионосферные тренды в возмущенном F_2 -слое // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 36. № 3. С. 127–131. 1996.
- Щепкин Л.А., Климов Н.Н. Термосфера Земли. М.: Наука. 220 с. 1980.
- Bremer J., Damboldt T., Mielich J., Suessmann P. Comparing long-term trends in the ionospheric F_2 region with two different methods // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 77. P. 174–185. 2012.
- Chandra S., Spencer N.W. Thermospheric storms and related ionospheric effects // Ibid. V. 81. N 28. P. 5018–5026. 1976.
- Emmert J.T., Picone J.M., Leon 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.
- Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G. et al. Revised global model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations // J. Geophys. Res. V. 96. № 5. P. 7657–7688. 1991.
- Keating G.M., Tolson R.N., 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 atmospheres // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 163. P. 2–13. 2017.
- *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.
- *Qian L., Roble R.G., Solomon S.C., Kane T.J.* Calculated and observed climate change in the thermosphere, and a prediction for solar cycle 24 // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. № L23705. 2006.
- *Rees D.* Global temperature and density structure in the lower thermosphere // *J. Brit. Inter. Soc.* V. 24. № 11. P. 643–658. 1971.
- *Roble R.G., Dickinson R.E.* How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and termosphere? // *Geophys. Res. Lett.* V. 16. № 12. P. 1441–1444. 1989.
- *Rishbeth H.* A greenhouse effect in the ionosphere? // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 7. P. 945–948. 1990.
- *Sergeenko N.P., Givishvili G.V.* Climatic trends at upper atmosphere // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 1. № 3. P. 219–222. 1999.
- *Zhang S.R., Holt J.M., Erickson P.J., Goncharenko L.P., Nocolls M.J., McCreedy M., Kelly J.* Ionospheric ion temperature climate and upper atmosphere long-term cooling // *J. Geophys. Res.* V. 121. № 9. P. 8951–8968. 2016.