

УДК 551.510.535

## МНОГОЛЕТНЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СЛОЯ F2

© 2020 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 19.11.2019 г.

После доработки 11.12.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

На большом массиве экспериментальных данных по наблюдениям ионосферной ст. Москва изучены особенности многолетних (1948–2015 гг.) временных рядов вариаций критических частот слоя F2 ионосферы во время возмущений. Показано, что такие параметры ионосферных возмущений как амплитуда и интенсивность статистически значимо увеличиваются, начиная с 70–80-х гг. Также увеличиваются годовые числа отрицательных ионосферных возмущений, не связанных с геомагнитной активностью. Обнаруженные эффекты могут быть обусловлены как геомагнитными трендами, так и антропогенной деятельностью.

DOI: 10.31857/S0016794020030165

### 1. ВВЕДЕНИЕ

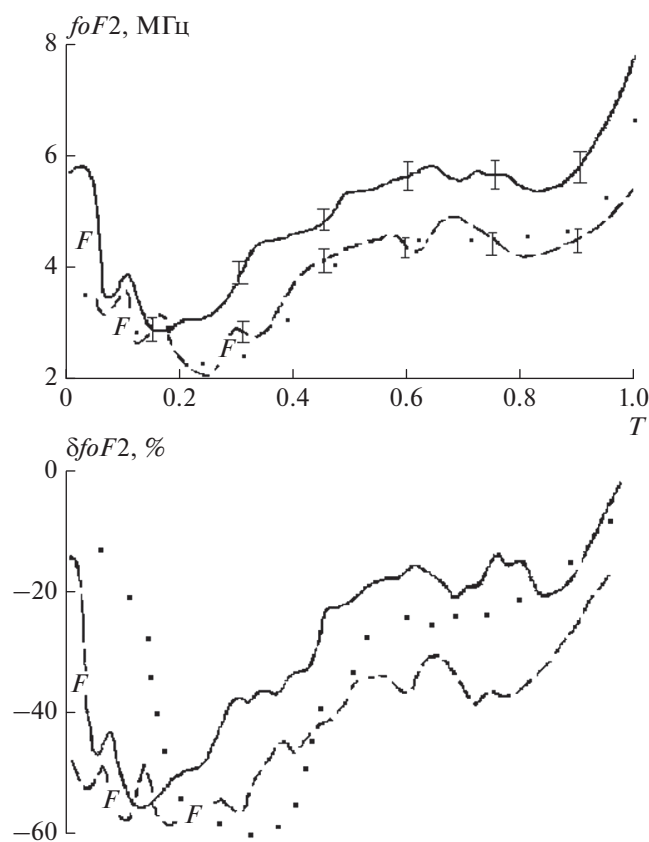
В последние годы, в связи с проблемой изменения климата на планете, в ионосферных исследованиях появилось большое количество работ, указывающих на статистически достоверные долговременные изменения ионосферных характеристик, в том числе, и параметров слоя F2. Интерес к проблеме трендов в верхних слоях атмосферы вызван двумя основными причинами. Во-первых, наличие изменений различных параметров слоев является, по-видимому, подтверждением того, что увеличение парниковых газов в атмосфере действительно происходит и влияет не только на нижние атмосферные слои, но и на всю толщу атмосферы в целом. Во-вторых, изучение трендов параметров верхней атмосферы и ионосферы, как показывают имеющиеся экспериментальные данные и расчеты на основе сложных современных моделей, позволяет оценить масштабы изменений важных в прикладном плане параметров верхней атмосферы и ионосферы. Если изменения этих параметров будут продолжаться, то придется учитывать их при решении прикладных вопросов, таких например, как движения низкоорбитальных спутников, входа в атмосферу спускаемых космических аппаратов, радиосвязи, радионавигации и др.

В обзоре [Данилов, 2012] рассмотрены современные взгляды на долговременные изменения параметров верхней атмосферы и ионосферы. В ряде работ предполагается, что одной из возмож-

ных причин наблюдаемых трендов в ионосфере являются изменения температуры и газового состава термосферы вследствие антропогенной деятельности. Описана концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения в атмосфере количества парниковых газов, которая впервые была сформулирована и обоснована группой ученых [Laštovička et al., 2008].

Другая группа работ предполагает появление трендов в результате вариаций солнечной активности и других гелиогеофизических параметров [Mikhailov and Marin, 2000; Колесник и др., 2019]. Однако высказывавшиеся предположения, что наблюдаемые тренды ионосферных параметров являются отражением вековых вариаций геомагнитной активности, могут быть справедливы, видимо, лишь для данных до начала 1980-х годов. Наблюдаемые в последние десятилетия тренды как нейтральных, так и ионизованных компонент вызваны, скорее всего, трендами количества парниковых газов.

Есть и третья группа работ, в которых тренды объясняются как природными факторами, связанными с гелиогеофизической активностью, так и результатом бурной антропогенной деятельности [Деминов и др., 2002]. Исключение из долговременных изменений параметров ионосферы эффектов, связанных с солнечным воздействием на атмосферу через долговременные изменения солнечной и геомагнитной активностей, позволяет выделить почти линейные по времени трен-



**Рис. 1.** Пример многолетней изменчивости  $foF2$  и  $\delta foF2$  во время ионосферных возмущений 30.06–02.07.1957 г. (сплошная линия); 25–27.06.1981 г. (штриховая линия); 29.08.2010 г. (точечная линия). По горизонтальной оси – нормированная продолжительность возмущения; вертикальные отрезки – диапазон погрешности измерений  $foF2$ .

ды, которые не зависят от этих активностей. Свойства такого типа трендов для параметров ионосферы, термосферы и мезосферы приведены, например, в работе [Гивишвили, 2008].

Общей чертой этих работ является признание существования тренда в ионосферных параметрах вообще и на уровне слоя  $F2$ , в частности. И если уж статистически значимый тренд существует в спокойной ионосфере, то, очевидно, что он должен проявляться и в характеристиках ионосферных возмущений. Изучению этой проблемы и посвящена настоящая работа.

## 2. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ТРЕНДЫ В ВОЗМУЩЕННОМ $F2$ -СЛОЕ

К ионосферным возмущениям относят отклонения ионосферных параметров от их спокойного суточного хода, имеющие характерные временные масштабы от нескольких часов до до 1–3 сут, (на пике солнечной активности они могут длиться даже до 10 дней) и проявляющиеся на

расстояниях в сотни и тысячи километров. Возмущения области  $F$  развиваются глобально и характеризуются изменением критических частот и высот  $F2$ -слоя. В среднем возмущения в слое  $F2$  происходят 1–3 раза в месяц, частота их появления выше в годы максимальной солнечной активности, чем при низкой солнечной активности.

В работе использованы данные вертикального зондирования ионосферы ст. Москва за период 1948–2015 гг. Для исключения регулярных вариаций 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 ежечасные значения критической частоты слоя  $F2$ ;  $foF2_{\text{мед}}$  – скользящее медианное значение. Скользящая медиана вычислялась с окном скольжения 10 сут. Использование скользящей медианы исключает влияние сезонных и других регулярных изменений. Параметр  $\delta foF2$  используется в краткосрочном ионосферном прогнозировании как индекс ионосферных возмущений [Зевакина и др., 1990].

К анализу было привлечено 143 ионосферных возмущения. Наиболее многочисленный класс в рассмотренном массиве данных составляют отрицательные однофазные ионосферные возмущения, происходящие одновременно с магнитными бурями с постепенным началом. Сравнялись ионосферные возмущения, происходившие в 1950–1970 гг., с возмущениями 1971–1990 гг. и 1991–2015 гг. для максимально идентичных геофизических условий. На рисунке 1 приведен характерный пример такого анализа для летних отрицательных возмущений большой интенсивности, происходивших на фоне магнитных бурь с постепенным началом. Видно, что амплитуды возмущений 25–27.06.1981 г. и 29.08.2010 г. выше амплитуды возмущения 30.06.–02.07.1957 г. на ~10%, что превышает среднее квадратическое отклонение. Особенно четко этот эффект проявляется во время главной фазы возмущения, начинающейся спустя несколько часов после начала бури. Аналогичные результаты получены и для других групп возмущений. Изменения интенсивности всех типов ионосферных возмущений за рассматриваемый период лежат в диапазоне 8–15%. Подобные тренды имеют место независимо от уровня солнечной активности.

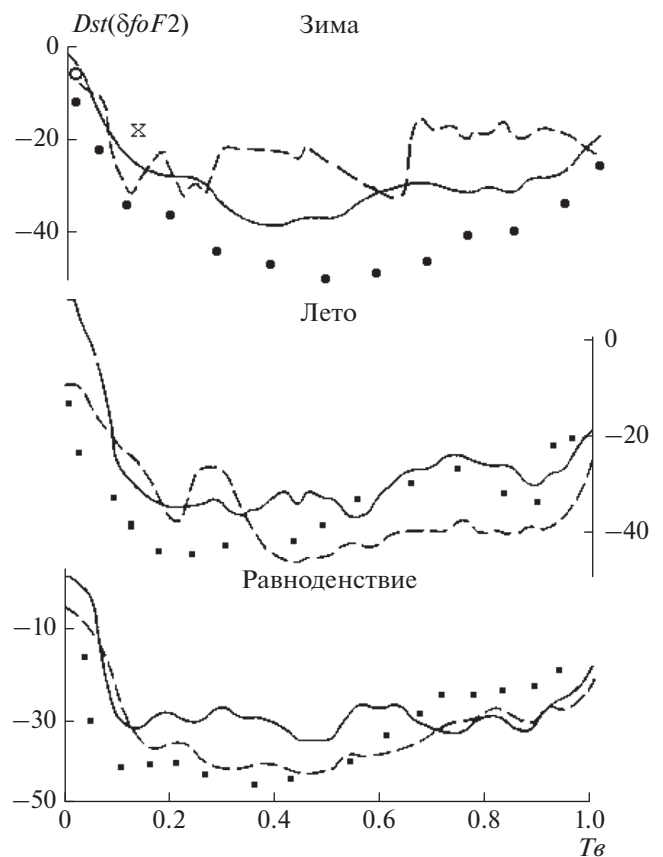
Тенденция такова, что интенсивность бурь регулярно и заметно возрастает летом и в равноденствие, но чуть реже – зимой. Чтобы проследить, насколько закономерны выявленные тренды, и оценить среднюю амплитуду долговременных изменений, из имеющегося массива данных по вариациям  $\delta foF2(t)$  были выделены регулярные составляющие вариаций критической частоты слоя

$F2$  во время бурь  $Dst(\delta foF2)$  по методу, развитому в работе [Зевакина и др., 1990].  $Dst(\delta foF2)$ -вариации, полученные для возмущений периода 1971–1990 и 2000–2015 гг., сравнивались с таковыми за интервал 1956–1974 гг. Результаты анализа приведены на рис. 2. Подтверждаются выводы, полученные при рассмотрении эволюции амплитуды отдельных бурь: летом и в равноденствие средняя интенсивность отрицательных возмущений возросла на 8–15%, зимой их амплитуда увеличилась на 5–7% в последний интервал 2000–2015 гг. В целом же можно сказать, что тенденция многолетних изменений амплитуды отрицательных однофазных возмущений состоит в росте их интенсивности в среднем за весь рассматриваемый многолетний период наблюдения на ~10%.  $Dst$ -вариация является основной составляющей (до 85%), определяющей интенсивность ионосферных бурь [Зевакина и др., 1990]. Она обусловлена главным образом изменениями концентраций атомного кислорода  $n(O)$  и молекулярного азота  $n(N_2)$  на высоте главного максимума. Другие составляющие возмущенных ионосферных вариаций (суточная  $SD$  и иррегулярная  $DI$ ) составляют гораздо меньшую долю изменчивости амплитуды возмущения 10–15% и определяются в основном динамическими процессами. Следовательно, анализ  $Dst(\delta foF2)$ -вариации дает представление о наиболее характерных многолетних изменениях в процессах, связанных с ионосферными бурями вообще, и с вариациями отношения  $n(O)/n(N_2)$  в частности.

На рисунке 3 приведено многолетнее изменение с 1946 по 2010 гг. максимальных за сутки отрицательных значений  $\delta foF2$  (точки) для апреля месяца. Показан линейный тренд, видно, что он четко направлен в сторону уменьшения. На рисунке также приведен временной ряд значений  $\Sigma kp$ , который почти не обладает трендом за этот период (слабый отрицательный), что может косвенно свидетельствовать, что многолетнее систематическое увеличение амплитуды отрицательных возмущений не связано с увеличением геомагнитной активности.

### 3. ЧИСЛО ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

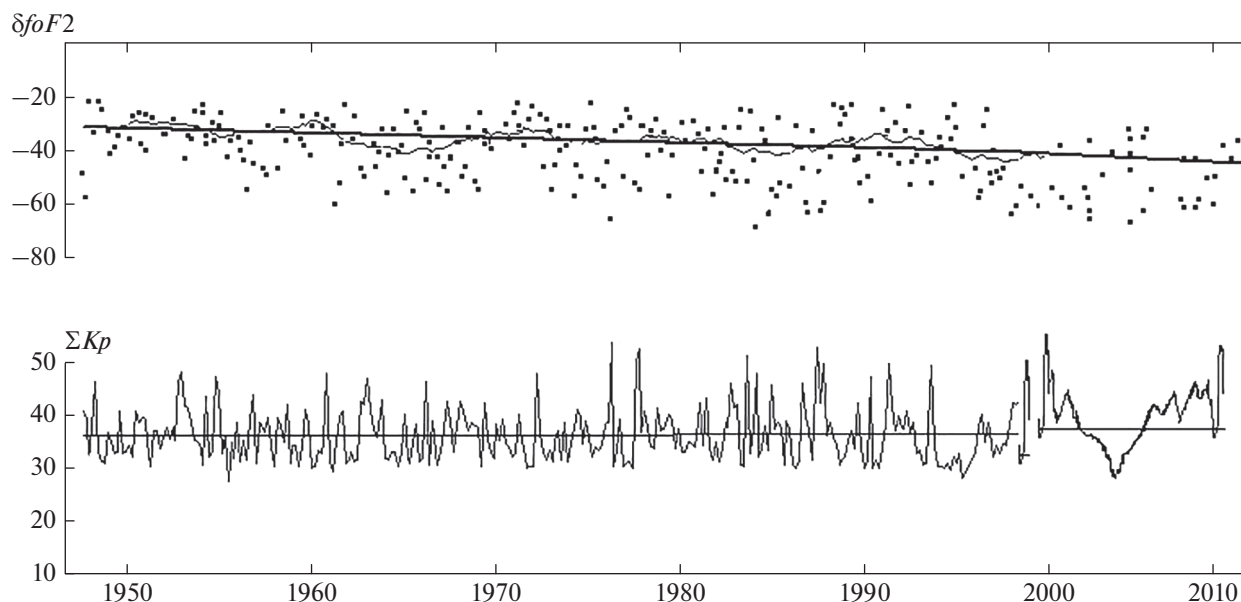
Важной характеристикой изменчивости ионосферы является общее число ионосферных возмущений в месяц (год). За указанный многолетний период был составлен каталог ионосферных возмущений в слое  $F2$  различной интенсивности. Чтобы проследить долговременную динамику этой характеристики, подсчитывалось число возмущений за год. При этом рассматривались только те возмущения, которые не были связаны с магнитными бурями, но проявлялись достаточно четко, т.е.  $\delta foF2_{max} > |20\%|$  и их продолжительность была более 5 ч.



**Рис. 2.** Многолетняя динамика  $Dst$ -вариаций ионосферных возмущений с одним активным периодом: 1956–1970 гг. — сплошная линия; 1971–1990 гг. — штриховая и 1991–2015 гг. точечные линии. По горизонтальной оси — нормированная продолжительность возмущения.

Чтобы исключить из анализа ионосферные бури, происходящие одновременно с геомагнитными, в работе использовались данные о числе магнитных возмущений за период 1878–1975 гг. [Афанасьева и Шевнин, 1978] и опубликованные данные наблюдений за 1976–2000 гг. [Космические данные, 1976–2000], а также каталог магнитных бурь, представленный на сайте ИЗМИРАН до 2015 г. ([www.izmiran.ru](http://www.izmiran.ru)), с помощью которых отождествлялись ионосферные бури.

На рисунке 4а приведено распределение годового числа положительных и отрицательных ионосферных возмущений, происходящих на спокойном геомагнитном фоне, за весь период наблюдения ионосферной ст. Москва. Также приведены линии, показывающие долговременные тренды рассматриваемых параметров за период наблюдения почти 70 лет. Из рисунка видно, что число положительных возмущений уменьшалось к 2015 г., а количество отрицательных ионосферных возмущений имеет тренд в сторону увеличения на ~12 бурь (при среднеквадратическом



**Рис. 3.** Тренд максимальных суточных значений  $\delta foF2$  во время всех отрицательных возмущений в апреле месяце с 1946 по 2010 гг. Внизу – временной ход суммарных суточных значений  $\Sigma Kp$ -индексов. Прямые линии – линейный тренд, тонкая линия – сглаженный ход (с окном 11 значений)  $\delta foF2(t)$ .

отклонении 7.15), что является значимым трендом. При этом нижняя граница диапазона изменения числа этих возмущений увеличилась с 14 до 22, а верхняя – с 28 до 45.

На рисунке 4б приведены временные ряды числа положительных и отрицательных возмущений  $foF2$ , происходящих на спокойном геомагнитном фоне в каждом апреле месяце с 1946 по 2015 гг. Рисунок также иллюстрирует рост числа отрицательных возмущений при слабом уменьшении положительных.

Природа рассмотренных возмущений 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 к отрицательным однофазным возмущениям.

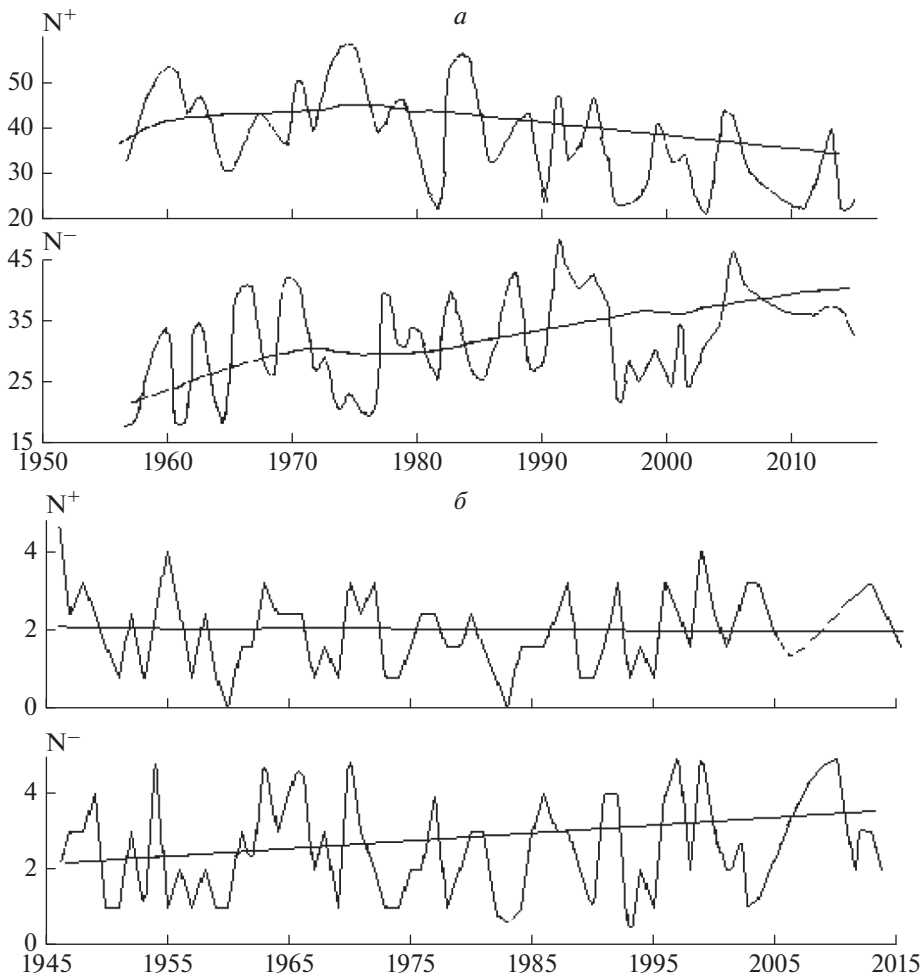
#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ трендов климатического масштаба показал, что эффекты долговременных изменений параметров ионосферы и верхней атмосферы статистически значимы, они являются одной из составляющих общих климатических изменений, происходящих в земной атмосфере. Приведенные в работах [Roble and Dickinson, 1989; Rishbeth, 1990] расчеты показывают, что такие изменения могут быть связаны с изменением газового состава атмосферы, которое проявляется не только в спокойные, но и в возмущенные периоды. Об

этом свидетельствует комплекс эффектов, описываемых в работах [Bremer, 1992; Данилов, 2012; Sergeenko and Givishvili, 1999].

В работе [Гивишвили и др., 1996] обобщены экспериментальные данные спектрофотометрических наземных измерений интенсивности эмиссии ОН и его вращательной температуры в свечении ночного неба за период 1948–1994 гг., полученные на станциях Звенигород и Абастумани, а также зарубежные данные. Обнаружены статистически значимые линейные тренды температуры в стратосфере, мезосфере, мезопаузе, на уровне основания термосферы, в термосфере, что говорит об очевидности глобальных климатических изменений во всей толще земной атмосферы. Как отмечалось выше, часть исследователей связывает изменения ионосферных параметров с антропогенным фактором, другая группа работ, также отмечая существование значимых трендов  $foF2$ , связывает их с солнечным воздействием через долговременные изменения солнечной и геомагнитной активностей [Деминов и др., 2002]. Однако приведенные в работе [Деминов и др., 2002] расчеты показывают, что учет солнечной и геомагнитной активности не исчерпывает полностью величину многолетнего тренда, наблюдаемого в слое  $F2$ .

Приведенные в настоящей работе результаты показали, что последствия трендов в слое  $F2$  проявились в эволюции свойств ионосферных возмущений: в эпоху 71–90-х и 2000–2015 гг. по сравнению с эпохой 60–70-х гг. увеличились амплитуда и интенсивность отрицательных ионо-



**Рис. 4.** (а) – распределение годового числа положительных  $N^+$  и отрицательных  $N^-$  ионосферных возмущений, не связанных с геоэффективными источниками на Солнце и их средних многолетних трендов; (б) – временной ход числа положительных  $N^+$  и отрицательных  $N^-$  возмущений в апреле месяце с 1945 по 2015 гг. Прямые линии – линейный тренд.

сферных возмущений в среднем на 10–15%. Также увеличилось годовое число отрицательных возмущений, происходящих на фоне спокойного магнитного поля.

Физическая природа наблюдаемых долговременных изменений параметров ионосферных возмущений может быть связана с факторами как естественного, так и антропогенного происхождения. Известно, что характер протекания и интенсивность ионосферных бурь в наибольшей степени зависят от изменения нейтрального состава во время магнитосферных возмущений и в особенности от отношения  $[O]/[N_2]$ . Поэтому, как ни покажется парадоксальным, но в конечном счете отмечаемые эффекты многолетних изменений свойств ионосферных возмущений сводятся, по-видимому, к уменьшению содержания атомного кислорода на высотах слоя  $F2$  в нормальных условиях. В самом деле, поскольку при-

веденные в примере бури происходили при сходных (солнечных и магнитосферных) условиях, то более высокая интенсивность бури 1981 г. должна быть обусловлена более низким отношением  $[O]/[N_2]$  в сравнении с бурей 1957 г.

На первый взгляд, это противоречит данным [Roble and Dickinson, 1989], согласно которым в последние десятилетия фоновые (невозмущенные) значения  $[N_2]$  понизились более заметно, чем  $[O]$ . Дело, однако, в том, что во время интенсивных бурь, примеры которых обсуждаются, в результате разогрева атмосферы происходит 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  $[O]$ . Иначе говоря, многолетнее падение фонового содержания  $[N_2]$  компенсируется многократным его уве-

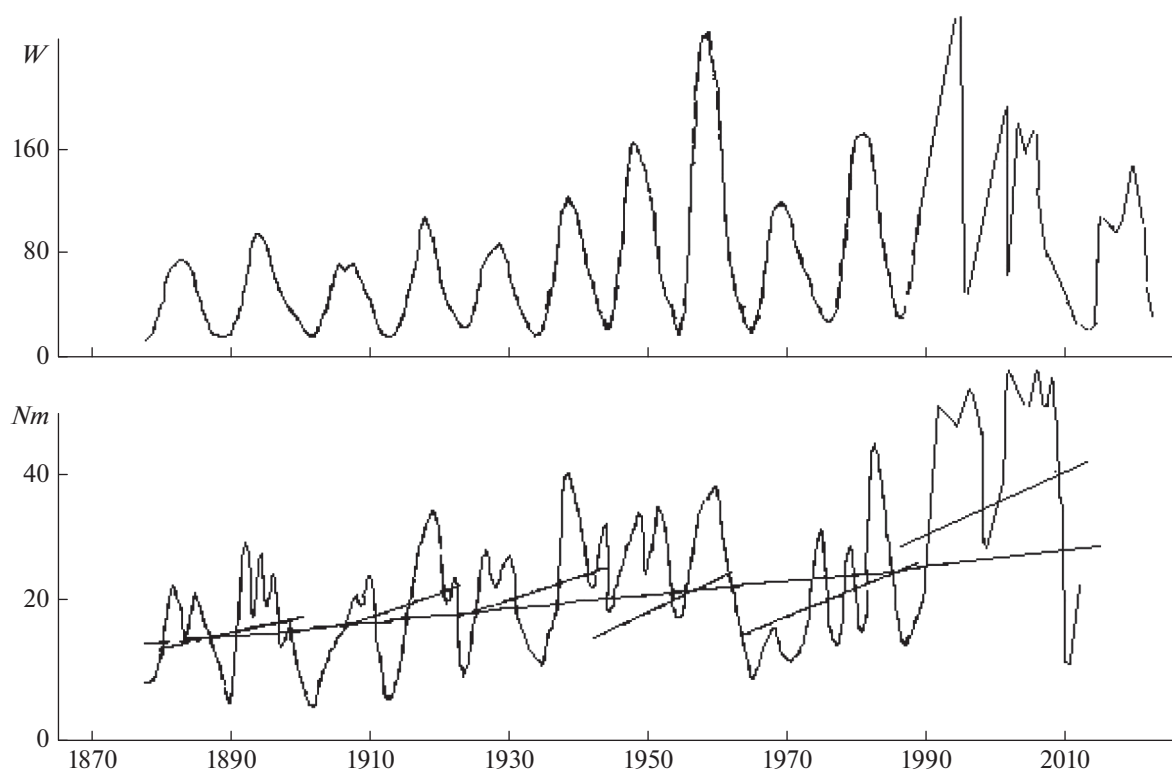


Рис. 5. Распределения среднегодовых чисел солнечных пятен  $W$  и годовых чисел магнитных бурь  $Nm$ .

личением 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  $[O]$  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 и одновременное падение положительных возмущений объясняется все тем же падением фоновой концентрации  $[O]$ .

Следует отметить важное обстоятельство: наблюдаемые тренды оказались выше, нежели рассчитанные. Модельные расчеты [Roble and Dickinson, 1989] выполнялись в предположении об удвоении концентрации парниковых газов  $CO_2$  и  $CH_4$  вблизи поверхности Земли. Однако, по данным [The Global Climatic System, 1988–1991], среднее увеличение концентраций этих газов составляет для двуоксида углерода на  $\sim 12\%$  в период с 1958 по 1990 гг., а для метана — на  $\sim 11\%$  с 1978 по 1989 гг. Следовательно, если бы уменьшение температуры и пропорциональные изменения в содержании  $O$ ,  $O_2$  и  $N_2$  были бы связаны только с ростом концентрации  $CO_2$  и  $CH_4$ , соответствующий

отклик в ионосфере должен быть примерно на порядок слабее. Отсюда следует, что либо существует некий дополнительный (не связанный с  $CO_2$  и  $CH_4$ ) источник возмущений термического режима и газового состава мезо-термосферы, либо существуют неучтенные пока механизмы влияния содержания  $CO_2$  и  $CH_4$  на среднюю и верхнюю атмосферу Земли.

Рассматривая тренды ионосферных возмущений, нельзя не обратиться к долговременным изменениям магнитной активности. Можно предположить, что такой тренд является фрагментом общей вековой вариации, которая наблюдается в изменениях параметров солнечной и магнитной активностей. На рисунках 5а, 5б приведены распределения среднегодового числа солнечных пятен  $W$  и годового числа магнитных бурь  $Nm$  за период почти 150 лет. Для солнечных и магнитных выборок данных такой анализ возможен поскольку солнечный и геомагнитный контроль начался на много лет раньше, чем регулярные ионосферные наблюдения.

Видно из рис. 5, что линейный тренд числа геомагнитных возмущений за период с 1960 по 2010 гг. положительный, так же как и тренд солнечной активности. Также очевидны  $\sim 20$ -летние периоды в вариациях солнечной и геомагнитной активностей. Период мировых ионосферных наблюдений приходится на последние циклы сол-

нечной и геомагнитной активности в период их роста. Поэтому безусловно, что изученные в этой работе многолетние тренды ионосферных возмущений частично обусловлены этим геомагнитным ростом, по крайней мере, для таких параметров как рост амплитуды и длительности отрицательных бурь в слое  $F2$ . Однако тренды числа ионосферных возмущений, не связанных с геомагнитными бурями, свидетельствуют с очевидностью об изменении температуры и концентраций основных составляющих термосферы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ многолетних (~70 лет) временных рядов параметров ионосферных возмущений слоя  $F2$  показал, что  $\delta foF2(t)$  имеет статистически значимый тренд. Показано, что такие параметры ионосферных возмущений как амплитуда и интенсивность, а также годовые числа отрицательных ионосферных возмущений статистически значимо увеличиваются начиная с 70–80-х гг. Причина наблюдаемых долгосрочных изменений параметров ионосферных возмущений может быть связана как с трендами солнечной и геомагнитной активности, так и с антропогенной деятельностью.

Дальнейший ионосферный мониторинг поможет внести ясность в понимание изучаемых явлений и, по-видимому, ответит на вопрос о необходимости введения в существующие прогностические атмосферно-ионосферные модели эволюционирующих параметров.

Изучение этих трендов также имеет значение при планировании различных аспектов техногенной деятельности в околоземном космическом пространстве (функционирование ИСЗ и радиопизических систем различного назначения).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева В.И., Шевнин А.Д. Некоторые статистические характеристики магнитной активности // Сб.: Геомагнитная активность и ее прогноз. М.: Наука. С. 5. 1978.
- Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семёнов А.И., Сергеенко Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 32. № 3. С. 329–339. 1996.
- Гвишвили Г.В. Долговременные вариации параметров низкотемпературной плазмы / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Гл. ред. Фортон В.Е.. сер. Б. Т. 1–3: Ионосферная плазма. Ч. 1. Отв. ред. Кузнецов В.Д., Ружин Ю.Я. С. 468–482. 2008.
- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- Деминов М.Г., Аннакулиев С.К., Гарбацевич А.В., Деминов Р.Г. Зависимость долговременных изменений критической частоты  $F2$ -слоя на средних широтах от геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 42. № 6. С. 766–770. 2002.
- Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеенко Н.П. Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы (Материалы мирового центра данных Б). М.: МГК при През. АН СССР. 71 с. 1990.
- Колесник С.А., Пикалов М.В., Колмаков А.А. Особенности долгопериодных трендов основных параметров  $F2$  области ионосферы в Томске / Тр. конф. РРВ–26, 1–6 июля 2019, Казань Секция 1. Распространение радиоволн и дистанционное зондирование. Т. 1. С. 196–202. 2019.
- Космические данные. Месячный обзор. ИЗМИР АН СССР. М.: Наука. 1976–1989 гг.
- Bremer J. Ionospheric trends in mid-latitudes as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect // J. Atmos. Terr. Phys. V. 54. № 11/12. P. 1501–1515. 1992.
- The Global Climatic System. Climatic System Monitoring. December 1988–May 1991. World Meteorological Organization. World Climate data and Monitoring Programm. United Nations environment Programm. Printed in Italy by: Centroofset. Siena. P. 71. 1992.
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G. et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // Ann. Geophysicae. V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008.
- Mikhailov A.V., Marin D. Geomagnetic control of the  $foF2$  long-term trends // Ann. Geophysicae. V. 18. № 6. P. 653–665. 2000.
- Roble R.G., Dickinson R.E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // 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. 1990.
- Sergeenko N.P., Givishvili G.V. Climatic trends at upper atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 1. № 3. P. 219–222. 1999.