

СВЯЗЬ ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ IG И T С ИНДЕКСАМИ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2022 г. М. Г. Деминов¹, *, Г. Ф. Деминова¹, В. Х. Депуев¹, А. Х. Депуева¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

После доработки 27.12.2021 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Представлен анализ связи средних за месяц ионосферных индексов IG и T с индексами солнечной ($F107$) и геомагнитной (Ap) активности на основе массива данных этих индексов в интервале 1954–2020 гг., где $F107$ и Ap – средние за месяц поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и планетарный Ap -индекс геомагнитной активности. Получено, что индекс $F = (F107_0 + F107_{-1})/2$ обеспечивает более высокую корреляцию с ионосферными индексами, чем индексы $F107$ за данный ($F107_0$) или предыдущий ($F107_{-1}$) месяцы. Зависимости IG и T от F в виде полиномов второй степени позволяют воспроизвести 96% вариаций IG и 98% вариаций T для анализируемого интервала времени. Поэтому дополнительный вклад Ap в IG и T незначителен. Тем не менее, вклад Ap в T и IG зависит от времени года: он не значим для января и значим для июля. Это свойство годовой аномалии в параметрах ионосферы по индексу IG , по-видимому, выявлено впервые. Во всех рассмотренных случаях увеличение Ap приводит к уменьшению T и IG , т.е. к среднему (глобальному) уменьшению медианы концентрации максимума $F2$ -слоя, и, при прочих равных условиях, такое уменьшение более значительно для июля, чем для января. Свойства зависимостей индексов IG и T от F и Ap во многом подобны, но точности этих зависимостей для T больше, чем для IG .

DOI: 10.31857/S001679402204006X

1. ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые эмпирические модели, такие как IRI [Bilitza, 2018] или NeQuick [Nava et al., 2008], содержат так называемые карты ITU-R для вычисления медианных за месяц значений критической частоты $F2$ -слоя $foF2$. Эти глобальные карты построены для каждого месяца года, двух уровней солнечной активности ($R_z = 0$ и $R_z = 100$) и линейной интерполяции для промежуточных значений R_z :

$$foF2 = a_0 + a_1 R_z, \quad (1)$$

где R_z – международное число солнечных пятен (прежняя версия, которая включает классический Цюрихский ряд данных), a_0 и a_1 – коэффициенты, которые определяются на основе карт ITU-R для данного пункта, месяца года и мирового времени [Jones and Gallet, 1962, 1965]. В уравнении (1) вместо R_z могут быть использованы ионосферные (T или IG) индексы солнечной активности, которые являются безразмерными индексами. Индексы T и IG построены по экспериментальным данным медиан $foF2$ ряда ионосферных станций для замены солнечных индексов в эмпирических моделях с целью обеспечения ми-

нимальных ошибок вычисления $foF2$ по этим моделям [Liu et al., 1983; Caquana, 1990]. Поэтому обычно ионосферные индексы точнее солнечных индексов [Caquana, 1990], но в задачах долгосрочного прогноза ионосферы это преимущество ионосферных индексов может быть нивелировано неточностью прогноза ионосферных индексов [Zakharenkova et al., 2013]. Один из способов решения этой проблемы основан на определении связи ионосферных индексов с солнечными индексами на основе уравнений регрессии. На этом пути было получено, что индекс $F107$ (поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см) точнее индекса R_z для долгосрочного прогноза ионосферного индекса солнечной активности, например, индекса IG [Деминов, 2016].

Для долгосрочного прогноза $foF2$ обычно используют средние за 12 месяцев индексы T или IG [Bilitza, 2018; Деминов и Деминова, 2019]. Средний за месяц индекс T точнее среднего за 12 месяцев значения этого индекса для прогноза $foF2$ на 1–3 мес. вперед [Деминов и др., 2019]. Прогноз индекса T может быть выполнен на основе прогноза солнечного индекса $F107$, если известна устойчивая по времени связь индекса T с индек-

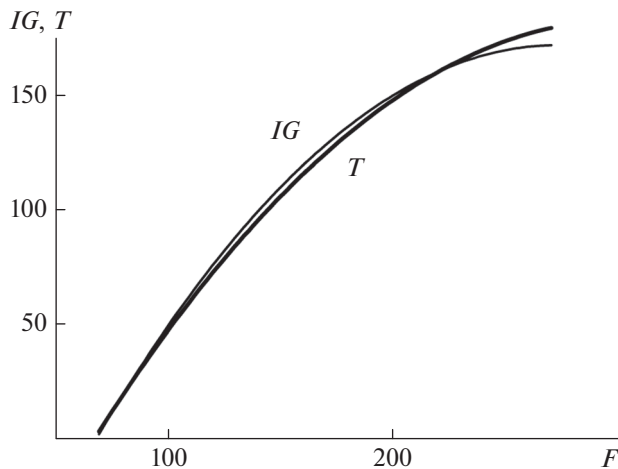


Рис. 1. Зависимости ионосферных индексов T и IG от индекса солнечной активности F по уравнениям регрессии (2) и (3) — толстая и тонкая линии.

сом $F107$. Выполненный нами поиск такой связи для среднего за месяц индекса T показал, что связь T с индексом $F107$ является основной [Деминов и др., 2021]. Дополнительный вклад индекса геомагнитной активности Ap в T незначителен. Тем не менее, вклад Ap в T зависит от времени года: он не значим для января и значим для июля. Это свойство годовой аномалии в параметрах ионосферы по индексу T было выявлено, по-видимому, впервые [Деминов и др., 2021].

Индекс T построен по данным медиан $foF2$ во все часы мирового времени каждой из ионосферных станций, выбранных для анализа [Caquana, 1990]. Индекс IG построен по данным медиан $foF2$ ионосферных станций в полдень [Liu et al., 1983]. Наборы ионосферных станций, использованных для вычисления T и IG , не совпадают. По этим причинам зависимости индексов T и IG от солнечной и геомагнитной активности могут различаться. Степень этого отличия по данным средних за месяц индексов T и IG , по-видимому, ранее не анализировалась. Решение этой задачи было главной целью данной работы. Ниже последовательно представлены результаты анализа связи индексов T и IG с индексом $F107$ и возможной связи T и IG с индексами геомагнитной активности.

2. СВЯЗЬ ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ С ИНДЕКСОМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для определения этой связи были использованы средние за месяц данные индексов $F107$, T и IG в интервале 1954–1996 гг., для которого связь ионосферных индексов с индексами солнечной активности была достаточно устойчивой по вре-

мени. По этим данным были получены коэффициенты уравнений регрессии:

$$T = -120 + 2F - 0.0033F^2, \quad (2)$$

$$IG = -134 + 2.24F - 0.0041F^2, \quad (3)$$

где $F = (F107_0 + F107_{-1})/2$, $F107_0$ и $F107_{-1}$ — индексы $F107$ в данный и предыдущий месяцы. Эти уравнения обладают достаточно высокой точностью, тем не менее, точность уравнения (2) несколько выше: $K = 0.992$, $\sigma = 7.1$ для уравнения (2) и $K = 0.986$, $\sigma = 9.4$ для уравнения (3). В этих уравнениях использован индекс F , поскольку он обеспечивает более высокую корреляцию с ионосферными индексами, чем индексы $F107_0$ или $F107_{-1}$. По оценкам, замена в этих уравнениях индекса F на индексы $F107_0$ или $F107_{-1}$ приводит к увеличению σ примерно на 30% и 20% для уравнений (2) и (3). Уравнение (2) совпадает с уравнением, приведенным в работе [Деминов и др., 2021].

Индексы T и IG , вычисленные по уравнениям (2) и (3) для фиксированного индекса F , почти совпадают в интервале $70 < F < 250$: абсолютная разница не превышает 4 единиц (или 3%). Более наглядно это следует из данных на рис. 1. Из данных на рисунке видно, что только при очень высоком уровне солнечной активности ($F > 250$) разница между индексами T и IG становится значительной. Анализ показал, что использование в уравнениях регрессии (2) и (3) полиномов второй степени оптимально, поскольку дальнейшее увеличение степени полиномов не приводит к заметному увеличению точности этих уравнений.

Обозначим через T_F и IG_F индексы T и IG , которые вычисляются по известному индексу F с помощью уравнений (2) и (3) соответственно. Индексы T_F и IG_F получены по данным 1954–1996 гг. Анализ показал, что индекс T_F применим для всего периода измерений индекса F [Деминов и др., 2021]. Этот вывод справедлив и для индекса IG_F . Например, для интервала 1954–2020 гг. коэффициент корреляции индекса T с индексом T_F равен 0.989 ($\sigma = 7.8$), коэффициент корреляции IG с IG_F равен 0.981 ($\sigma = 10.9$). По данным этих коэффициентов корреляции можно заключить, что уравнения (2) и (3) позволяют воспроизвести 98% вариаций T и 96% вариаций IG для интервала 1954–2020 гг. Следовательно, связь индексов T и IG с индексом солнечной активности F является основной.

3. СВЯЗЬ ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ С ИНДЕКСОМ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Выше отмечалось, что связь ионосферных индексов T и IG с индексом солнечной активности F является основной. Эта связь описывается урав-

нениями регрессии (2) и (3), и вычисленные по этим уравнениям ионосферные индексы обозначены через T_F и IG_F . На остатки $\Delta T = T - T_F$ и $\Delta IG = IG - IG_F$ приходится меньше 5% вариаций индексов T и IG , если основываться на данных измерений этих индексов за 1954–2020 гг.

Тем не менее, эти остатки могут зависеть от геомагнитной активности через уравнения регрессии:

$$\Delta T = a_1 + b_1 (Ap - Ap_{\text{mid}}), \quad (4)$$

$$\Delta IG = a_2 + b_2 (Ap - Ap_{\text{mid}}), \quad (5)$$

где a_1 , b_1 , a_2 , b_2 – коэффициенты уравнений регрессии; Ap – средний за месяц Ap -индекс геомагнитной активности; Ap_{mid} – среднее для рассматриваемого интервала времени значение Ap . Например, $Ap_{\text{mid}} = 15$ для 1954–1996 гг. и $Ap_{\text{mid}} = 10$ для 1996–2020 гг. Анализ показал, что зависимости ΔT и ΔIG от Ap значимы не во всех случаях и уровень этих значимостей зависит от месяца года и диапазона изменений Ap -индекса. Анализ показал, что для выделения устойчивых зависимостей ΔT и ΔIG от Ap целесообразно использовать не месяц года, а три месяца года, центрированные на данный месяц [Демин и др., 2021]. Например, параметры уравнений регрессии (4) и (5) для января получены по данным ионосферных индексов и индексов солнечной и геомагнитной активности за декабрь, январь и февраль; для июля они получены по данным за июнь, июль и август. Ниже январь, апрель, июль и октябрь являются такими центрированными месяцами, что соответствует четырем сезонам. Это обеспечивает увеличенное число данных в анализируемых массивах ионосферных индексов и индексов солнечной и геомагнитной активности для выбранного (центрированного) месяца. Зависимости ΔT и ΔIG от Ap практически отсутствуют при очень низкой геомагнитной активности ($Ap < 7$). Поэтому в массиве данных для вычисления коэффициентов уравнений (4) и (5) оставлялись данные, которые удовлетворяли дополнительному условию

$$Ap > 7. \quad (6)$$

Это условие было использовано нами при анализе зависимости ΔT от Ap [Демин и др., 2021].

В таблице 1 приведены параметры уравнений регрессии (4) и (5) для перечисленных месяцев, полученные по данным об ионосферных индексах и индексах солнечной и геомагнитной активности за 1954–1996 гг. при дополнительном условии (6). Анализ показал, что для приведенных в табл. 1 данных зависимости (4) и (5) значимы (при доверительном уровне 95% по критерию Фишера [Ramachandran and Tsokos, 2009]), если коэффициент корреляции $K > 0.25$ –0.3. Из данных в табл. 1 следует, что для интервала 1954–1996 гг. зависимости (4) и (5) не значимы для ян-

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии (4) и (5) для ΔT и ΔIG : коэффициенты корреляции K , стандартные отклонения σ , коэффициенты b_1 и b_2 в этих уравнениях и число измерений N для четырех месяцев в интервале 1954–1996 гг.

Месяцы	ΔT				ΔIG			
	K	σ	b_1	N	K	σ	b_2	N
Январь	0.13	6.9	–0.21	121	0.22	9.2	–0.50	121
Апрель	0.36	6.7	–0.53	124	0.34	9.1	–0.67	124
Июль	0.43	6.2	–0.73	125	0.39	7.9	–0.82	125
Октябрь	0.33	6.8	–0.58	127	0.25	8.5	–0.54	127

варя и значимы для остальных рассмотренных месяцев. Для всех рассмотренных случаев $b_1 < 0$ и $b_2 < 0$, т.е. увеличение Ap приводит к уменьшению ΔT и ΔIG . Между величинами K и b существует определенная связь: увеличенным значениям K соответствуют увеличенные значения модулей b_1 и b_2 , когда зависимости ΔT и ΔIG от Ap становятся более отчетливыми. Поэтому зависимости ΔT и ΔIG от Ap наиболее отчетливы для июля. Годовой компонент в зависимостях ΔT и ΔIG от Ap с минимумом в январе и максимумом в июле более отчетлив для индекса ΔT , чем для ΔIG : для ΔT коэффициент корреляции K и модуль коэффициента b_1 в июле в 3.3–3.4 раза больше, чем в январе; для ΔIG коэффициент K и модуль коэффициента b_1 в июле в 1.8–1.6 раза больше, чем в январе. Кроме того, во все месяцы года стандартные отклонения σ для ΔIG больше, чем для ΔT , и эта разница составляет 25–35%.

Интервал 1954–1996 гг. соответствует относительно высоким солнечным циклам и повышенной геомагнитной активности ($Ap_{\text{mid}} = 15$). Интервал 1996–2020 гг. в значительной степени соответствует низким солнечным циклам и пониженной геомагнитной активности ($Ap_{\text{mid}} = 10$). Для сравнения, в табл. 2 приведены параметры уравнений регрессии (4) и (5), полученные по данным об ионосферных индексах и индексах солнечной и геомагнитной активности за 1996–2020 гг. при дополнительном условии (6). Из данных в табл. 2 следует, что для интервала 1996–2020 гг. зависимости (4) и (5) не значимы для января и апреля и значимы для июля и октября. Для всех рассмотренных случаев $b_1 < 0$ и $b_2 < 0$, т.е. увеличение Ap приводит к уменьшению ΔT и ΔIG . Кроме того, во все месяцы года стандартные отклонения σ для ΔIG больше, чем для ΔT .

Объединяя эти результаты, можно утверждать, что в зависимостях ΔT и ΔIG от Ap существуют годовой и полугодовой компоненты. Годовой компонент в зависимостях ΔT и ΔIG от Ap с минимумом в январе и максимумом в июле является устойчивой характеристикой ионосферных ин-

Таблица 2. Параметры уравнений регрессии (4) и (5) для ΔT и ΔIG : коэффициенты корреляции K , стандартные отклонения σ , коэффициенты b_1 и b_2 в этих уравнениях и число измерений N для четырех месяцев в интервале 1996–2020 гг.

Месяцы	ΔT				ΔIG			
	K	σ	b_1	N	K	σ	b_2	N
Январь	0.19	7.7	−0.46	44	0.08	12.0	−0.31	44
Апрель	0.15	7.6	−0.33	58	0.18	9.2	−0.49	58
Июль	0.36	8.6	−0.92	45	0.35	9.0	−0.96	45
Октябрь	0.54	7.2	−1.15	55	0.31	11.5	−0.91	55

дексов T и IG : коэффициенты корреляции K и модули коэффициентов b в июле гораздо больше, чем в январе. Полугодовой компонент в зависимостях ΔT и ΔIG от Ap с максимумами в апреле и октябре менее стабилен. Например, для апреля эти зависимости значимы в интервале 1954–1996 гг. и не значимы в интервале 1996–2020 гг. В целом, характеры зависимости индексов T и IG от индексов F и Ap совпадают: увеличение F и уменьшение Ap приводят к увеличению как T , так и IG . Кроме того, для всех рассмотренных случаев значимые зависимости ΔT от Ap соответствовали значимым зависимостям ΔIG от Ap . Тем не менее, для всех рассмотренных случаев стандартные отклонения уравнений регрессии (2) и (4) для индекса T меньше соответствующих стандартных отклонений уравнений регрессии (3) и (5) для индекса IG . Следовательно, дисперсия в зависимостях ионосферных индексов от солнечной и геомагнитной активности для индекса T меньше, чем для индекса IG . Кроме того, коэффициенты корреляции индекса T с индексами солнечной и геомагнитной активности больше соответствующих коэффициентов корреляции индекса IG для всех значимых зависимостей ионосферных индексов от солнечной и геомагнитной активности, приведенных выше, т.е. в целом зависимость от солнечной и геомагнитной активности для индекса T более отчетлива, чем для индекса IG .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосферные индексы T и IG во многом подобны, поскольку они предназначены для замены индекса R_z в одном и том же уравнении (1). Так, зависимости индексов T и IG от геомагнитной активности значимы (или не значимы) для одних и тех же геофизических условий. Тем не менее, в целом точности уравнений регрессии в зависимостях ионосферных индексов от солнечной и геомагнитной активности для индекса T больше, чем для индекса IG : для индекса T меньше стандартные отклонения этих уравнений и больше коэффициенты корреляции между изме-

ренными и вычисленными по этим уравнениям значениями T . Возможная причина этого связана с методиками получения индексов T и IG по данным медиан $foF2$ ряда ионосферных станций. Индекс T построен по данным медиан $foF2$ во все часы мирового времени каждой из ионосферных станций, выбранных для анализа. Индекс IG построен по данным медиан $foF2$ ионосферных станций в полдень. Использование уравнения (1) для всех часов суток при вычислении индекса T по данным медиан $foF2$, по-видимому, обеспечивает более точную зависимость этого индекса от солнечной и геомагнитной активности, чем индекса IG .

Уравнения (2) и (3) дают связь ионосферных индексов T и IG с индексом солнечной активности F , в котором учтена предыстория изменения этой активности. Если обозначить через T_F и IG_F индексы T и IG , которые вычисляются по известному индексу F с помощью уравнений (2) и (3), то T_F и IG_F можно использовать как эффективные индексы солнечной активности для прогноза индексов T и IG . Коэффициенты уравнений (2) и (3) можно считать постоянными величинами, что и позволяет использовать индексы T_F и IG_F для прогноза ионосферных индексов T и IG на основе прогноза индекса солнечной активности $F107$ с учетом предыстории изменения $F107$. Для средних за месяц значений индекса T эта предыстория была учтена в работе [Деминов и др., 2021]. Для средних за месяц значений индекса IG она учтена, по-видимому, впервые.

Остатки $\Delta T = T - T_F$ и $\Delta IG = IG - IG_F$ могут зависеть от Ap -индекса геомагнитной активности, где T и IG — экспериментальные значения ионосферных индексов, полученные на основе медиан $foF2$ ряда ионосферных станций, T_F и IG_F — значения T и IG , вычисленные по уравнениям (2) и (3) по известному индексу солнечной активности F . Возможность зависимости ΔT и ΔIG от Ap обусловлена тем, что медиана $foF2$ зависит не только от солнечной, но и от геомагнитной активности [Деминов и др., 2017]. Анализ зависимостей ΔT и ΔIG от Ap позволил выявить устойчивый годовой компонент в этих зависимостях: в январе эти зависимости не значимы и обычно слабо выражены, в июле они значимы и достаточно отчетливы. При этом во всех анализируемых случаях увеличение Ap приводит к уменьшению ΔT и ΔIG и, следовательно, к среднему (глобальному) уменьшению $foF2$. Годовой компонент в зависимостях ΔT и ΔIG от Ap является одним из свойств годовой аномалии в параметрах ионосферы, когда средние (глобальные) параметры ионосферы в январе отличаются от этих параметров в июле при прочих равных условиях [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. Годовая аномалия в зависимости ΔT от Ap была выделена нами ранее [Деминов и др., 2021].

Годовая аномалия в зависимости ΔIG от Ap выделена, по-видимому, впервые. Считают, что эта аномалия в конечном итоге обусловлена эллиптичностью орбиты Земли (расстояние Солнце—Земля минимально в начале января и максимально в начале июля), но конкретные проявления этой эллиптичности для параметров ионосферы в значительной степени остаются загадкой [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Brown et al., 2018].

На основе анализа ежедневных значений концентраций максимума $F2$ -слоя $NmF2$ пары ионосферных станций Боулдер—Хобарт в полдень было получено, что суммарное значение $NmF2$ по этим станциям в январе больше, чем в июле, и эта разница при умеренной геомагнитной активности больше, чем при низкой активности [Демин и Демина, 2021]. Причинами зависимости амплитуды годовой аномалии в $NmF2$ на средних широтах от уровня геомагнитной активности, по-видимому, являются асимметрия зима/лето в частоте возникновения суббурь и годовая асимметрия в плотности термосферы [Демин и Демина, 2021]. Первый фактор определяет более высокую частоту суббурь местной зимой [Tanskanen et al., 2011; Newell et al., 2001, 2010], с которыми связана генерация крупномасштабных ВГВ в авроральной области [Hunsucker, 1982; Hocke and Schlegel, 1996]. Второй фактор обеспечивает увеличенные амплитуды ВГВ на средних широтах в январе через уменьшение затухания ВГВ, поскольку коэффициент молекулярной вязкости обратно пропорционален плотности термосферы [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. В свою очередь, такие ВГВ являются наиболее частой причиной увеличенных значений $NmF2$ на средних широтах в полдень [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

Увеличение амплитуды годовой аномалии в $NmF2$ с ростом геомагнитной активности может происходить не только за счет увеличения $NmF2$ в январе, которое рассмотрено выше, но и за счет уменьшения $NmF2$ в июле из-за изменения температуры и состава термосферы. На средних широтах отрицательная фаза ионосферной бури, т.е. уменьшение $NmF2$ из-за изменения температуры и состава термосферы в периоды магнитных бурь, является основной и наиболее продолжительной по времени характеристикой этой бури [Buonsanto, 1999]. Уменьшение $NmF2$ из-за изменения температуры и состава термосферы может происходить не только в периоды магнитных бурь, но и в периоды продолжительной повышенной геомагнитной активности, что может соответствовать условиям, для которых получена медиана $NmF2$ (или медиана $foF2$) и, как следствие, ионосферные индексы T и IG . При прочих равных условиях, средние (глобальные) уменьшения $NmF2$ относительно фона из-за изменения температуры и состава термосферы с ростом геомагнитной активности

будут максимальны в июле, когда средняя температура и плотность термосферы минимальны из-за эллиптичности орбиты Земли. Итак, годовая аномалия в зависимости ионосферных индексов от геомагнитной активности может быть обусловлена наложением двух основных эффектов из-за эллиптичности орбиты Земли: уменьшение затухания ВГВ с максимумом в декабре, приводящее к глобальному увеличению $NmF2$, изменения температуры и состава термосферы относительно фона с максимумом в июле, приводящие к глобальному уменьшению $NmF2$. Данное предположение является предварительным даже на качественном уровне и требует специального анализа.

5. ВЫВОДЫ

Представлен анализ связи средних за месяц ионосферных индексов T и IG с индексами солнечной ($F107$) и геомагнитной (Ap) активности на основе массива данных этих индексов в интервале 1954—2020 гг., где $F107$ и Ap — средние за месяц поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и планетарный Ap -индекс геомагнитной активности. Получены следующие выводы.

1. Индексы T и IG во многом подобны. Так, зависимости индексов T и IG от геомагнитной активности значимы (или не значимы) для одних и тех же геофизических условий. Тем не менее, в целом точности уравнений регрессии в зависимостях ионосферных индексов от солнечной и геомагнитной активности для индекса T больше, чем для индекса IG .

2. Индекс $F = (F107_0 + F107_{-1})/2$ обеспечивает более высокую корреляцию с ионосферными индексами, чем индексы $F107$ за данный ($F107_0$) или предыдущий ($F107_{-1}$) месяцы. Зависимости T и IG от F в виде полиномов второй степени позволяют воспроизвести 98% вариаций T и 96% вариаций IG для анализируемого интервала времени. Коэффициенты этих полиномов сохраняются практически постоянными для разных циклов солнечной активности, что позволяет использовать индекс F для прогноза индексов T и IG .

3. Дополнительный вклад Ap в индексы T и IG незначителен и зависит от сезона: для анализируемого интервала времени он не значим для января и значим для июля. Это свойство годовой аномалии в параметрах ионосферы по индексу IG , по-видимому, выявлено впервые. Во всех рассмотренных случаях увеличение Ap приводит к уменьшению T и IG , т.е. к среднему (глобальному) уменьшению медианы концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$, и, при прочих равных условиях, такое уменьшение более значительно для июля, чем для января.

4. Годовая аномалия в зависимости индексов T и IG от Ap с максимумом в июле может быть обу-

словлена наложением двух основных эффектов из-за эллиптичности орбиты Земли: уменьшение затухания крупномасштабных гравитационных волн (ВГВ) на средних широтах с максимумом в декабре, приводящее к глобальному увеличению *NmF2*; изменения температуры и состава термосферы относительно фона с максимумом в июле, приводящие к глобальному уменьшению *NmF2*. Данное предположение является предварительным даже на качественном уровне и требует специального анализа.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные об индексах солнечной активности были взяты с сайтов (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdcd1>) (WDC for Solar-Terrestrial Physics, UK), (www.spaceweather.gc.ca/solarflux) (Space Weather, Canada), (www.sws.bom.gov.au/HF_Systems) (Space Weather Services, Australia). Данные об индексах геомагнитной активности были взяты с сайта isgi.unistra.fr (International Service of Geomagnetic Indices, ISGI).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00050 (по части учета геомагнитной активности) и при поддержке Российского научного фонда РНФ в рамках научного проекта № 20-72-10023 (по части учета солнечной активности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с. 1988.
- Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космич. исслед. Т. 54. № 1. С. 3–9. 2016.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза критической частоты *F2*-слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 191–198. 2019.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для *NmF2* от солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 2. С. 224–231. 2021.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Денуев В.Х., Денуева А.Х. Зависимость медианы критической частоты *F2*-слоя на средних широтах от геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 4. С. 74–81. 2017.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Денуев В.Х., Денуева А.Х. Связь среднего за месяц ионосферного индекса *T* с индексами солнечной и геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 6. С. 735–740. 2021.
- Деминов М.Г., Михайлов А.В., Михайлов В.В., Шубин В.Н., Цыбуля К.Г. Ионосферное моделирование и прогнозирование / Системный мониторинг ионосферы. Сб. науч. трудов. Ред. Н.Г. Котонаева. М.: ФИЗМАТЛИТ. С. 286–343. 2019.
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. P. 1–11. 2018.
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international reference ionosphere model // Ann. Geophysicae. Discuss., 2018.
<https://doi.org/10.5194/angeo-2018-97>
- Buonsanto M. Ionospheric storms – a review // Space Sci. Rev. V. 88. P. 563–601. 1999.
- Caruana J. The IPS monthly T index // Solar-Terrestrial Prediction: Proc. Workshop at Leura, Australia (October 16–20, 1989). V. 2. P. 257–263. 1990.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1985 // Ann. Geophysicae. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- Hunsucker K. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. P. 293–315. 1982.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // ITU Telecommun. J. V. 29. P. 129–147. 1962.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods, 2. Control of instability // ITU Telecommun. J. V. 32. P. 18–28. 1965.
- Liu R., Smith P., King J. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR atlas // Telecommun. J. V. 50. № 8. P. 408–414. 1983.
- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. P. 1856–1862. 2008.
- Newell P.T., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M. The role of the ionosphere in aurora and space weather // Rev. Geophys. V. 39. № 2. P. 137–149. 2001.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // J. Geophys. Res. V. 115. A03216. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014805>
- Ramachandran K.M., Tsokos C.P. Mathematical statistics with applications. Oxford: Elsevier Academic Press, 824 p. 2009.
- Rishbeth H., Müller-Wodarg I.C.F. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the *F2*-layer // Ann. Geophysicae. V. 24. № 12. P. 3293–3311. 2006.
- Tanskanen E.I., Pulkkinen T.I., Viljanen A. et al. From space weather toward space climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008 // J. Geophys. Res. V. 116. A00134. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015788>
- Zakharenkova I.E., Krankowski A., Bilitza D., et al. Comparative study of foF2 measurements with IRI-2007 model predictions during extended solar minimum // Adv. Space Res. V. 51. P. 620–629. 2013.