

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ МЕДИАНЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ

© 2020 г. М. Г. Деминов¹, *, Г. Ф. Деминова¹

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 20.04.2020 г.

После доработки 12.05.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

На основе сопоставления скользящих средних за 12 мес. значений потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см $F107$ и ионосферного индекса солнечной активности T установлен эффективный индекс солнечной активности T_F . Индекс T_F определен как полином второй степени от $F107$ с коэффициентами, которые не зависят от времени, и предназначен для использования в задачах прогноза медианы критической частоты $F2$ -слоя $foF2$ по известным моделям ионосферы вместо индексов T , $F107$ или международного числа солнечных пятен Ri . Индекс T_F применим для любого уровня солнечной активности и всего периода измерений $F107$. Индекс T_F не зависит от геомагнитной активности по определению. Индекс T может зависеть от геомагнитной активности из-за зависимости медианы $foF2$ от этой активности. Получено, что скользящий средний за 12 месяцев индекс геомагнитной активности Ap_{12} и разность $\Delta T = T - T_F$ уменьшались со временем в интервале 1954–2019 гг., но для ΔT эта тенденция была скорее качественной. В результате, линейная зависимость ΔT от Ap_{12} практически отсутствовала для этого интервала: коэффициент корреляции между ними был меньше 0.1.

DOI: 10.31857/S0016794020050053

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 – скользящее среднее за 12 мес. 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 другие скользящие средние за 12 мес. солнечные (Ri , $F107$) или ионосферные (T , IG) индексы солнечной активности. Здесь Ri – новая версия международного числа солнечных пятен, $F107$ – поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см. Включение индекса Ri в рассмотрение оправдано и тем, что

после 2015 г. прежний индекс R_z не поддерживается [Clette et al., 2015]. Для использования индексов Ri или $F107$ в уравнении (1) получают уравнения регрессии, отражающие зависимости R_z от Ri или $F107$ [Bilitza, 2018; Гуляева, 2016]. Многочисленные исследования показали, что точность вычисления параметров ионосферы и термосферы с помощью индекса $F107$ уменьшается для периодов продолжительной низкой солнечной активности [Lühr and Xiong, 2010; Chen et al., 2011; Bilitza et al., 2012; Solomon et al., 2013; Emmert et al., 2014; Qian et al., 2014; Danilov and Konstantinova, 2020]. В свою очередь, ошибки вычисления $foF2$ с помощью индекса Ri увеличились существенно для последнего солнечного цикла 24 [Деминов и др., 2020]. В результате, солнечные индексы Ri и $F107$ перестали быть адекватными индикаторами солнечной активности для $foF2$ в последние десятилетия.

Ионосферные индексы T и IG построены по экспериментальным данным медиан $foF2$ ряда ионосферных станций для замены солнечного индекса R_z в уравнении (1) с целью обеспечения минимальных ошибок вычисления $foF2$ по эмпирическим моделям [Liu et al., 1983; Caruana, 1990]. Поэтому обычно ионосферные индексы точнее

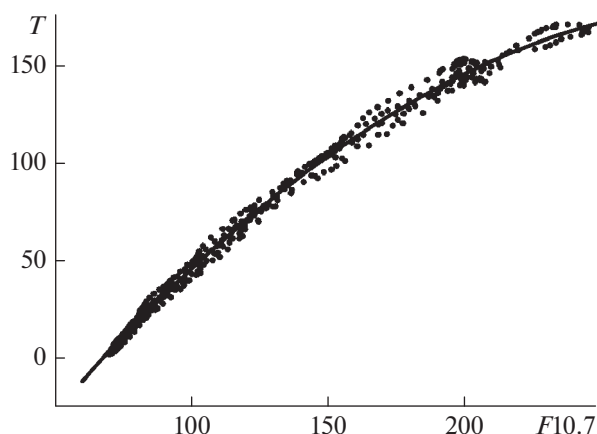


Рис. 1. Связь между индексами T и $F107$ по экспериментальным данным за 1954–1996 гг. (точки) и на основе уравнения регрессии (2) – сплошная линия.

солнечных индексов [Liu et al., 1983; Caruana, 1990], но в задачах долгосрочного прогноза ионосферы это преимущество ионосферных индексов может быть нивелировано неточностью прогноза ионосферных индексов [Zakharenkova et al., 2013].

Анализ связей между ионосферными и солнечными индексами может позволить получить поправки к известным уравнениям регрессии, отражающим зависимости R_z от R_i или $F107$, для увеличения точности использования солнечных индексов. Так, учет этой поправки для зависимостей R_i и R_z от $F107$ позволил существенно увеличить точность использования индекса $F107$ как индикатора солнечной активности для $foF2$, которая стала отчетливо выше точности индекса R_i особенно в последние десятилетия [Деминов, 2016; Деминов и Деминова, 2019].

Возможен прямой путь увеличения точности ионосферных индексов на основе уравнений регрессии между ионосферными и солнечными индексами без использования известных связей между солнечными индексами. Решение этой задачи на основе анализа индексов T и $F107$ было главной целью данной работы. При этом мы стремились получить устойчивое уравнение регрессии, которое было бы применимо для всего периода измерения индекса $F107$ с достаточно высокой точностью. Анализ показал, что этим свойством обладает индекс $F107$ и не обладает индекс R_i . Это и определило выбор индекса $F107$ для решения данной задачи.

2. ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Анализ данных индексов солнечной активности показал, что в интервале 1954–1996 гг. связь между индексами этой активности была доста-

точно устойчивой [Деминов и Деминова, 2019]. Отметим, что этот интервал соответствует солнечным циклам 19–22. По данным индексов T и $F107$ для этого интервала было получено уравнение регрессии

$$T = -117 + 1.94F107 - 0.00313(F107)^2, \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $K = 0.998$ и среднеквадратичным отклонением вычисленных значений T от измеренных $\sigma = 4$. Более наглядно о степени точности уравнения (2) можно судить по данным на рис. 1.

Эффективный индекс солнечной активности T_F определен нами на основе уравнения (2):

$$T_F = -117 + 1.94F107 - 0.00313(F107)^2. \quad (3)$$

Он предназначен для замены индекса R_z на T_F в уравнении (1) для вычисления медианы $foF2$ по эмпирическим моделям IRI или NeQuick при любом уровне солнечной активности.

Известно, что индекс $F107$ не является адекватным индикатором солнечной активности для медианы $foF2$ при низкой солнечной активности (см., например, [Деминов и Деминова, 2019]). Анализ показал, что в индексе T_F этот недостаток выражен гораздо слабее. Для наглядности, на рис. 2 показаны зависимости индекса T от T_F и R_z^* для интервала 2009–2019 гг., который соответствует солнечному циклу 24. Этот цикл является самым низким за весь период измерений индекса $F107$ до настоящего времени. Индекс R_z^* определен на основе анализа связи между индексами R_z и R_i в интервале 1957–2014 гг. [Гуляева, 2016]:

$$R_z^* = 0.7R_i, \quad (4)$$

т.е. R_z^* это индекс R_z , который определен с помощью индекса R_i .

Статистические характеристики для данных на этом рисунке: $d(T - T_F) = -2$, $\sigma(T - T_F) = 5$, $d(T - R_z^*) = 4$, $\sigma(T - R_z^*) = 12$, где d – сдвиг, σ – среднеквадратичное отклонение одного индекса относительно другого. Из данных на этом рисунке и приведенных статистических характеристик следует, что для низкого солнечного цикла индекс T_F существенно точнее индекса R_z^* . Кроме того, для низкого солнечного цикла связь между индексами T и R_z^* перестает быть однозначной: фиксированному значению R_z^* могут соответствовать разные значения T на фазах роста и спада солнечного цикла, т.е. существует эффект гистерезиса. Этот эффект для солнечного цикла 24 более детально рассмотрен в работе [Деминов и др., 2020]. Сравнение со статистическими оценками для уравнения (2) показывает, что величина $\sigma(T - T_F)$ почти одинакова для интервалов 1954–1996 и 2009–2019 гг.: $\sigma(T - T_F) = 4-5$. Кроме того, $\sigma(T - T_F) = 4$ для всего интервала 1948–2019 гг.,

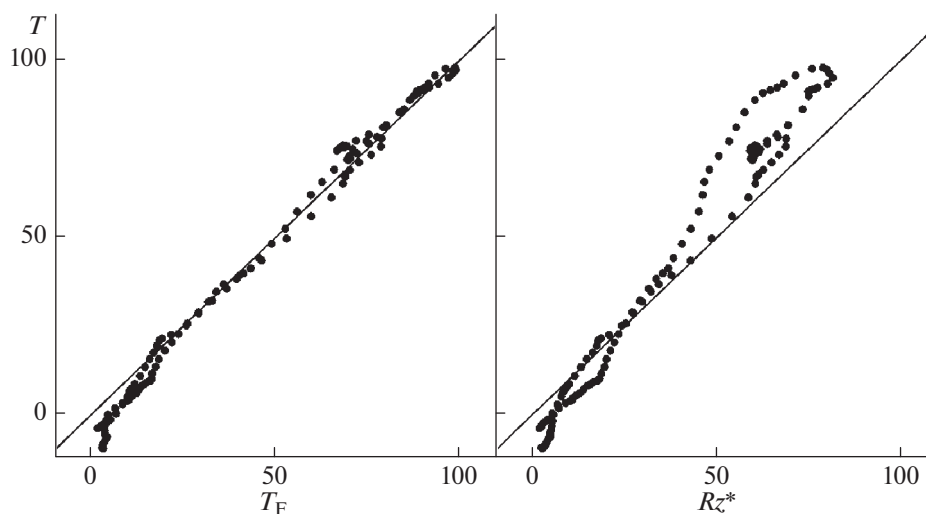


Рис. 2. Связь ионосферного индекса солнечной активности T с эффективным индексом этой активности T_F и индексом R_z^* по экспериментальным данным (точки) для интервала 2009–2019 гг.

т.е. для всего интервала измерений индекса $F107$. Отметим, что $d(T - T_F) = 0.03$ для интервала 1948–2019 гг., т.е. систематический сдвиг между индексами T и T_F практически отсутствует для этого интервала. Эти оценки позволяют утверждать, что эффективный индекс солнечной активности T_F может быть рекомендован в качестве индикатора солнечной активности для вычисления и прогноза медианы $foF2$ по эмпирическим моделям для любого уровня солнечной активности и всего периода измерений индекса $F107$ (в данном случае до 2019 г. включительно).

Ионосферный индекс T может зависеть от геомагнитной активности из-за возможной зависимости медианы $foF2$ от этой активности [Демин и др., 2017]. Индекс T_F не зависит от геомагнитной активности по определению (см. уравнение (3)). Поэтому можно предположить, что разница $T - T_F$ позволит выделить вклад геомагнитной активности в T , если он значим. Предварительный результат такого анализа для изменений скользящего среднего за 12 мес. индекса геомагнитной активности Ap_{12} и разности $\Delta T = T - T_F$ в интервале 1954–2019 гг. показан на рис. 3. Из данных на этом рисунке видно, что изменения Ap_{12} и ΔT со временем в годах носят сложный характер. Тем не менее, уравнения регрессии в виде полиномов второй степени отражают общую тенденцию этих изменений. Статистические характеристики для этих уравнений регрессии таковы. Стандартное отклонение $\sigma = 4$, коэффициент определенности $K = 0.5$ для зависимости Ap_{12} от времени в годах. Напомним, что коэффициент определенности — это коэффициент корреляции между измеренными и вычисленными по уравнению регрессии значениями, в данном случае, Ap_{12} . Стандартное

отклонение $\sigma = 4$, коэффициент определенности $K = 0.3$ для зависимости ΔT от времени в годах. Анализ показал, что зависимость Ap_{12} или ΔT от времени (в виде полинома второй степени) значима для использованного массива данных при доверительном уровне 95–99% по критерию Фишера, если соответствующий коэффициент определенности $K > 0.3$ – 0.4 . Следовательно, зависимость Ap_{12} от времени значима при доверительном уровне 99%, зависимость ΔT от времени не значима или слабо значима при доверительном уровне 95%. Линейная зависимость ΔT от Ap_{12} не значима, поскольку коэффициент корреляции между этими индексами $K(\Delta T, Ap_{12}) < 0.1$. Даже для интервала 2000–2018 гг., когда зависимость Ap_{12} от времени была наиболее отчетливой (см. рис. 3), $K(\Delta T, Ap_{12}) = 0.1$. Следовательно, линейная зависимость ΔT от Ap_{12} практически отсутствовала для интервала 1954–2019 гг. Тем не менее, наблюдалась общая тенденция к уменьшению индексов Ap_{12} и ΔT со временем в годах, но для ΔT этот результат был скорее качественным.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосферный индекс T может принимать отрицательные значения при низкой солнечной активности, и минимальные значения T достигали почти -10 для низкого солнечного цикла 24 (см. рис. 2). Возможные причины этого заложены в уравнении (1), коэффициенты которого были получены по данным медиан $foF2$, по-видимому, за 1954–1958 гг. [Jones and Gallet, 1962, 1965; Jones and Obitts, 1970]. В этом уравнении принята линейная зависимость $foF2$ от R_z . Эта зависимость нелинейная, замена R_z на T позволяет до некото-

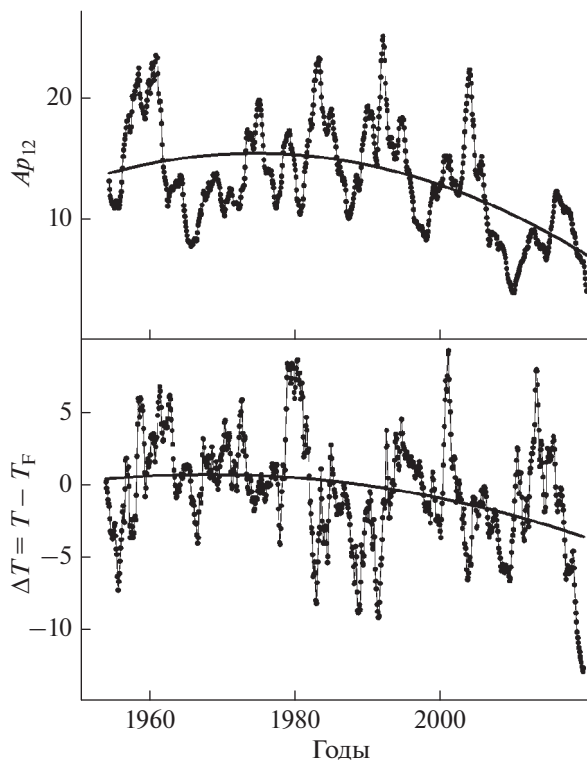


Рис. 3. Изменения со временем в годах индекса геомагнитной активности A_{p12} и отклонения ионосферного индекса T от эффективного индекса T_F по экспериментальным данным (точки) и аппроксимации этих изменений полиномами второй степени (сплошные линии).

рой степени устранить данный недостаток уравнения (1). При этом индекс T может стать отрицательным для согласования с измеренными значениями $foF2$ при постоянных коэффициентах уравнения (1) для данного пункта и месяца года. Выше отмечалось, что эти коэффициенты были получены по данным Rz и медиан $foF2$, по-видимому, за 1954–1958 гг. Среднее значение геомагнитного индекса $A_{p12} = 16$ для этого интервала соответствует повышенной геомагнитной активности, среднее значение $A_{p12} = 8$ в интервале 2009–2019 гг., что соответствует низкой геомагнитной активности (см. рис. 3). Обычно, но не всегда, увеличение геомагнитной активности приводит к уменьшению медианы $foF2$ [Демин и др., 2017]. Следовательно, коэффициенты уравнения (1) были получены для пониженных значений $foF2$ относительно спокойного уровня. Поэтому при низкой геомагнитной активности эти коэффициенты будут завывать значения $foF2$, что будет приводить к более низким значениям T для согласования с данными измерений. В результате, самые низкие значения индекса T в солнечном цикле 24 наблюдались в минимумах этого цикла и достигали почти -10 (см. рис. 2). Индекс T_F получен

на основе индекса T , поэтому он также может принимать отрицательные значения. Из уравнения (3) следует, что $T_F < 0$ для $F107 < 67.7$. Такие низкие значения $F107$ встречаются крайне редко, поэтому обычно $T_F > 0$. Например, даже для низкого солнечного цикла 2009–2019 гг. было выполнено условие $T_F > 1.5$. Для второй половины 2019 г. приблизительно $T_F = 3$, индекс T достигал значения -9.8 , и величина $\Delta T = T - T_F$ достигла рекордно низкого значения -12.8 (см. рис. 3). Следует отметить, что разница между индексами T и T_F для очень низкой солнечной активности обычно не приводит к существенным ошибкам при вычислении медиан $foF2$ по уравнению (1) с заменой Rz на T_F , поскольку в правой части уравнения (1) первый член преобладает над вторым для этих условий.

Из данных на рис. 2 можно видеть, что максимальные значения индексов T и T_F почти совпадают ($T_{\max} = 98$, $T_{F\max} = 99$), и они больше $Rz_{\max}^* = 82$ для низкого солнечного цикла 24. Занижение высоты солнечного цикла по индексу Ri относительно высоты этого цикла по индексу $F107$ (и по величине ультрафиолетового излучения Солнца) является характерной особенностью последних низких солнечных циклов, что связывают с уменьшением магнитного поля Солнца в этот период [Livingston et al., 2012; Svalgaard and Hansen 2013; Balogh et al., 2014]. Высокая точность индекса T_F относительно индекса Rz^* является отражением этого свойства последних низких солнечных циклов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сопоставления скользящих средних за 12 мес. значений потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см $F107$ и ионосферного индекса солнечной активности T установлен эффективный индекс солнечной активности T_F . Индекс T_F определен как полином второй степени от $F107$ с коэффициентами, которые не зависят от времени, и предназначен для использования в задачах прогноза медианы критической частоты $F2$ -слоя $foF2$ по известным моделям ионосферы вместо индексов T , $F107$ или международных чисел солнечных пятен Rz или Ri (прежняя и новая версии). Получены следующие выводы.

1. Индекс T_F применим для любого уровня солнечной активности и всего периода измерений $F107$ с 1948 г. по настоящее время. Точность индекса T_F сохраняется высокой для всего периода измерений $F107$, включая период низкого солнечного цикла 24. Точность индекса Ri гораздо ниже точности T_F для солнечного цикла 24.

2. Индекс T_F не зависит от геомагнитной активности по определению. Индекс T может зависеть от геомагнитной активности из-за зависимости медианы $foF2$ от этой активности. Получено, что скользящий средний за 12 месяцев индекс геомагнитной активности Ap_{12} и разность $\Delta T = T - T_F$ уменьшались со временем в интервале 1954–2019 гг., но для ΔT эта тенденция была скорее качественной. В результате, линейная зависимость ΔT от Ap_{12} практически отсутствовала для этого интервала: коэффициент корреляции между ними был меньше 0.1.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят SIDC, Бельгия, за индексы R_z и R_i – относительные числа солнечных пятен (<http://sidc.oma.be/silso/>); SWC, Канада, за данные $F107$ – потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (<ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/>); SWS, Австралия, за данные T – ионосферного индекса солнечной активности (http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/); WDC for Geomagnetism, Япония, за данные Ap -индекса (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plus в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 3. С. 59–68. 2016.
- 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., Денуева А.Х., Денуев В.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. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза критической частоты F2-слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 191–198. 2019.
- Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. Индексы солнечной активности для параметров ионосферы в циклах 23 и 24 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 1. С. 3–8. 2020.
- Balogh A., Hudson H.S., Petrovay K., von Steiger R. Introduction to the solar activity cycle: Overview of causes and consequences // Space Sci. Rev. V. 186. № 1. P. 1–15. 2014.
- Bilitza D., Brown S.A., Wang M.Y., Souza J.R., Roddy P.A. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 86. P. 99–106. 2012.
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. 2018. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- 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.
- Chen Y., Liu L., Wan W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. V. 116. № A04304. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016301>
- Clette F., Cliver E.W., Lefèvre L., Svalgaard L., Vaquero J.M. Revision of the sunspot number(s) // Space Weather. V. 13. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015SW001264>
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in foF2 and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Res. V. 65. P. 959–96516. 2020.
- Emmert J.T., McDonald S.E., Drob D.P., Meier R.R., Lean J.L., Picone J.M. Attribution of interminima changes in the global thermosphere and ionosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 119. P. 6657–6688. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019484>
- 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.
- Jones W.B., Obits D.L. Global representation of annual and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954–1958 // US Institute for Telecommunication Science, Research Report OT/ITSRR 3. 1970. P. 1–46. 1970.
- 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.
- Livingston W., Penn M.J., Svalgaard L. Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux // Astrophys. J. Lett. V. 757. № L8. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8>
- Lühr H., Xiong C. IRI-2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum // Geophys. Res. Lett. V. 37. № L23101. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL045430>
- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 15. P. 1856–1862. 2008.
- Qian L., Solomon S.C., Roble R.G. Secular changes in the thermosphere and ionosphere between two quiet Sun periods // J. Geophys. Res.–Space. V. 119. P. 2255–2262. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019438>
- Solomon S.C., Qian L., Burns A.G. The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24 // J. Geophys. Res.–Space. V. 118. P. 6524–6535. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50561>
- Svalgaard L., Hansen W.W. Solar activity – past, present, future // J. Space Weather Space Clim. V. 3. № A24. 2013. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013046>
- 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.