

УДК 523.9-7,523.98

НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ОТ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА И ЕЕ РАЗЛИЧИЕ ДЛЯ РАЗНЫХ 11-ЛЕТНИХ ЦИКЛОВ

© 2021 г. А. И. Лаптухов¹, *, В. А. Лаптухов¹, **

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

*e-mail: a.laptukhov@mail.ru

**e-mail: vladgh23z@gmail.com

Поступила в редакцию 30.11.2020 г.

После доработки 21.03.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Установлена статистическая нелинейная немонотонная зависимость среднесуточных величин солнечной “постоянной” от суточных чисел Вольфа. Предложен физический механизм этой нелинейной зависимости. Показано, что поток излучения Солнца для 11-летних циклов с высокой и низкой активностью существенно разный и, кроме того, он выше на фазе роста, чем на фазе спада цикла. Эти особенности надо учитывать при восстановлении солнечной “постоянной” на основе суточных чисел Вольфа.

DOI: 10.31857/S0016794021050084

1. ВВЕДЕНИЕ

Как хорошо известно, температура солнечного пятна (≈ 4500 К) существенно ниже температуры окружающей фотосферной плазмы (≈ 6000 К). Поэтому плотность потока лучистой энергии приблизительно в три раза меньше, чем из соседних областей вне пятна [Лифшиц, 1986]. При росте активности Солнца число пятен на его поверхности и характеризующие их числа Вольфа W увеличиваются, и поэтому, казалось бы, поток энергии от Солнца S (солнечная “постоянная”) должен уменьшаться. Но среднегодовые изменения кривых $S(t)$ и $W(t)$ в 11-летнем цикле солнечной активности происходят с высоким положительным коэффициентом корреляции $KK = 0.94$ (см. ниже). Это указывает на то, что с ростом активности Солнца его светимость в среднем увеличивается. Это хорошо видно и из сравнения динамики суточных значений $S(t)$ и $W(t)$ за 1975–2010 гг. на рис. 5 из работы [Кузнецов, 2010]. Кроме того, такой вывод согласуется и с тем известным фактом, что в длительные периоды глубокого минимума солнечной активности типа Маундеровского климат был более холодным, чем в периоды высоких максимумов [Борисенков, 1988]. Но, как показано в работе [Кондратьев и Никольский, 1978], поток энергии от Солнца, измеряемый в атмосфере Земли с помощью ракет на высотах 26–33 км (“метеорологическая солнечная постоянная”), с ростом солнечной активности умень-

шается. Поэтому вопрос о том, как именно зависит величина потока солнечной лучистой энергии S от активности Солнца (например, чисел Вольфа W) требует тщательного специального исследования с использованием данных измерений солнечной “постоянной” на космических аппаратах (КА), вне атмосферы Земли. Эта задача рассматривалась нами в 2012 г. на основе данных измерений солнечной постоянной на КА за 1976–2010 гг. С тех пор появились новые данные, на основе которых можно получить более точную зависимость $S(W)$. Далее, исходные данные о солнечной постоянной были скорректированы их авторами, и в настоящее время мы имеем два временных ряда: первоначальный $S_0(t)$ и скорректированный $S_n(t)$. Помимо этого, в 2015 г. международной командой исследователей Солнца во главе с профессором Clette F. была выполнена глубокая ревизия и рекалибровка чисел Вольфа. Суть этой ревизии изложена в работе Clette et al. [2014] (<http://www.sidc.be/silso/newdataset>). Наиболее существенным изменением в значениях числа солнечных пятен является выбор нового эталонного наблюдателя, А. Вольфера (наблюдатель с 1876 по 1928 г.), а не самого Р. Вольфа. Это означает отказ от общепринятого масштабного коэффициента Цюриха 0.6, что эквивалентно смене единицы измерения и увеличению масштаба всех чисел солнечных пятен в $1/0.6 = 5/3$ раза.

Цель настоящей работы – выяснить, насколько повлияют на полученную ранее зависимость $S(W)$ новые данные за 2011–2018 гг., а также коррекция исходных данных о потоке солнечной энергии и числах Вольфа. Кроме того, авторы предполагают найти более точную статистическую нелинейную немонотонную зависимость светимости Солнца от его активности и определить различие этой зависимости как для разных 11-летних циклов, так и для фаз роста и спада этих циклов.

Распространено ошибочное мнение, что связь солнечной постоянной S с числами Вольфа W или другими индексами солнечной активности можно считать линейной. Эта предполагаемая линейная связь учитывается в многочисленных работах по восстановлению в прошлом суммарного излучения Солнца (солнечной постоянной) на основе известных индексов солнечной активности (см., например, работу [Wu et al., 2018] и литературу в ней). Поэтому установление реальной нелинейной и немонотонной зависимости $S(W)$ важно как при корректном решении таких задач, так и при оценке точности их решения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ СРЕДНЕГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Суточные данные о солнечной постоянной с 1976 по 2018 гг. были взяты с сайта (<ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/DataPlots/>). Здесь приведены два ряда суточных измерений солнечной постоянной: первоначальный $S_o(t)$ (original VIRGO scale) и скорректированный $S_n(t)$ (new VIRGO scale). Эти ряды отличаются друг от друга, прежде всего, переводным множителем $S_n = 0.9962133S_o$, который приблизительно соответствует различию на значительную постоянную величину ($S_n - S_o \cong -5.17$ Вт/м²). Кроме того, имеются переменные величины, которые изменяются во времени с ярко выраженным 11-летним периодом и амплитудой ~ 0.1 Вт/м². Суточные значения скорректированных в июле 2015 г. чисел Вольфа W за 1818–2020 гг. были взяты с сайта (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>) см. также (<http://rrr.sidc.be/silso/newdataset>).

Чтобы иметь общую картину изменения этих трех величин S_n , S_o , W , мы вычислили их средние по году значения и привели к одинаковому масштабу по формулам: $S_1 = 100(S_{nN} - 1360)$, $S_2 = 100(S_{oN} - 1365.1)$. Здесь S_{nN} и S_{oN} есть соответственно среднегодовые значения величин S_n и S_o для года с номером N . Среднегодовые значения чисел Вольфа W_N оставили без изменений. Результаты вычислений приведены на рис. 1.

Коэффициенты корреляции кривых W_N с S_{nN} (или S_1) и W_N с S_{oN} (или S_2) одинаковы и равны

$KK = 0.936$, что указывает на существенную связь потока солнечного излучения с числами Вольфа. Коэффициент корреляции среднегодовых значений величин S_{nN} и S_{oN} равен единице с точностью

не меньше 6 знаков. Если вычислить $S_2^* = 100(S_{oN} - 1365.173)$, то эта новая кривая практически совпадет с кривой S_1 , т.е. их различие такого же порядка, как и толщина линии. Это указывает на то, что, по крайней мере, для среднегодовых значений новый ряд данных S_{nN} практически отличается от первоначального S_{oN} только на постоянную величину, равную -5.173 Вт/м². С другой стороны, для суточных величин эта разность может дополнительно отличаться на небольшую величину порядка ± 0.1 Вт/м². С учетом этого ниже мы будем использовать только один ряд – новый ряд данных $S_n(t) = S(t)$. При этом нижний индекс ‘ n ’ для простоты записи условимся опускать.

3. МЕТОД РАСЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ СОЛНЕЧНОЙ “ПОСТОЯННОЙ” С ЧИСЛАМИ ВОЛЬФА

Используемый ниже метод похож на тот, который мы ранее применяли в работе [Лаптухов и Лаптухов, 2010]. Кратко суть метода состоит в следующем. Пусть в моменты времени t_k , $k = 1, 2, \dots, K$ нам известны суточные значения чисел Вольфа W_k и среднесуточные величины полной плотности потока электромагнитного излучения Солнца (солнечной “постоянной”) S_k . Определим целочисленный индекс (номер ячейки) $K_W = [(W_k + 14)/15] = 0, 1, 2, \dots$. Здесь W_k – суточные числа Вольфа, а квадратные скобки обозначают целую часть числа, например, $[7.99] = 7$, $[0.14] = 0$. Проведем сортировку всего массива данных по ячейкам с номерами K_W следующим образом: по известному значению W_k вычислим число K_W и величину S_k помещаем в ячейку с номером K_W . При этом все случаи с числами Вольфа, удовлетворяющие неравенству $15K_W - 14 \leq W_k \leq 15K_W$, попадут в ячейку с номером $K_W = 1, 2, 3, \dots$. В ячейке с номером $K_W = 0$ будут только случаи с $W_k = 0$ и соответствующие им числа S_k . Чисел $W_k = 0$ в анализируемом массиве много, и поэтому имеет смысл выделить их в отдельную ячейку. Для каждой из этих ячеек подсчитываем сумму всех значений S_k , попавших в рассматриваемую ячейку, число таких событий и среднее для этой ячейки значение величины потока излучения Солнца $S = S_k(K_W)$. Таким образом, мы построили функцию $S_k(K_W)$ статистической зависимости потока излучения Солнца S от определенных выше модифицированных чисел Вольфа K_W . Более удобно использовать функцию S_W зависимости S от W_c в виде $S = S_k(K_W) = S_W(W_c)$, где W_c – это центральное

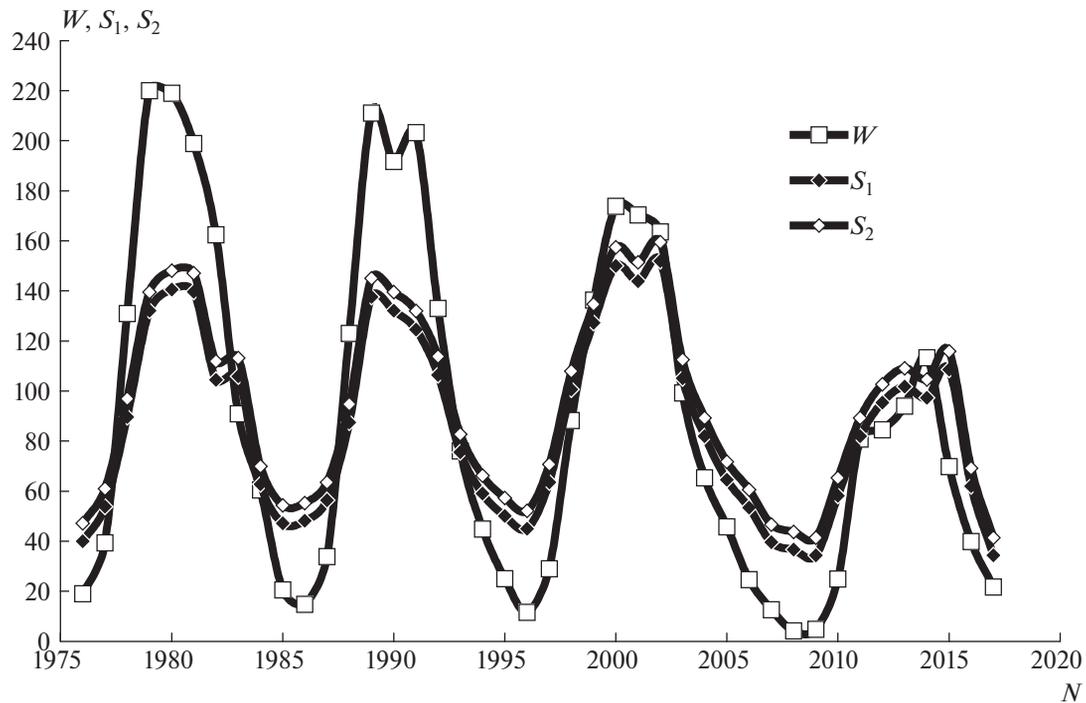


Рис. 1. Среднегодовые числа Вольфа W_N и модифицированные значения солнечных постоянных $S_1 = 100(S_{nN} - 1360)$ и $S_2 = 100(S_{oN} - 1365.1)$ за $N = 1976-2017$ гг.

(среднее) значение числа Вольфа W в соответствующей ячейке с номером K_W , которое связано со всеми $K_W > 0$ простой формулой $W_c = 15K_W - 7$ (для $K_W = 0$ имеем $W_c = 0$). Ниже для простоты записи в W_c условимся опускать индекс 'с', при этом $W_c \rightarrow W$.

Для рассматриваемого массива данных с 1976 г. максимальные суточные числа Вольфа измерены 10 и 11 ноября 1979 г. и были равны 428 и 410, соответственно. Но за 10 ноября данные по S отсутствуют, а за 11 ноября есть. Поэтому максимальное число Вольфа в анализируемом массиве данных равно $W_{max} = 410$. Этому числу соответствует номер ячейки $K_W = 28$, в которой оказалось всего 2 события. В соседней ячейке с $K_W = 27$ ($391 \leq W \leq 405$) оказалось 5 событий. Так как число случаев с $W \geq 391$ мало, то для увеличения статистики все эти 7 случаев мы поместили в ячейку с $K_W = 26$. В результате получили функцию $S = S_W(W)$, изображенную кривой 2 на рис. 2.

Из рисунка 2 видно, что статистическая зависимость солнечной постоянной S от чисел Вольфа W (иначе говоря, регрессия S на W [Корн и Корн, 1978]) — нелинейная и, к тому же, немонотонная. Для малых чисел $W < W^* \approx 190$ величина S с ростом W тоже растет приблизительно по линейному закону, но для больших чисел Вольфа $W > 190$ солнечная постоянная S существенно

уменьшается и при $W \approx 380$ ее величина такая же, как и при $W = 0$.

Высокий коэффициент корреляции $KK = 0.936$ среднегодовых значений чисел Вольфа W и солнечной постоянной S на рис. 1 указывает на то, что связь этих величин близка к линейной. Это объясняется тем, что среднегодовые значения чисел Вольфа на рис. 1 лишь немного превосходят величину $W^* \approx 190$, ниже которой функция $S(W)$, как это видно на рис. 2, близка к линейной. Поэтому нет противоречия между выявленной на рис. 2 сильной нелинейной зависимостью $S(W)$ и близкой к линейной связи среднегодовых значений величин $S(t)$ и $W(t)$ на рис. 1. На больших временах длительность интервалов с $W < W^*$ значительно превышает длительность интервалов с $W > W^*$, и поэтому в эпоху низкой солнечной активности поток энергии от Солнца ниже и климат на Земле прохладнее, чем в эпоху высокой солнечной активности [Борисенков, 1988].

Заметим, что если построить статистическую зависимость $S_o(W)$ на основе первоначальных данных $S_o(t)$ (original VIRGO scale), то получим кривую, отличающуюся от $S_n(W)$, изображенной на рис. 2, на значительную постоянную величину $\Delta S = S_o(W = 0) - S_n(W = 0) = 5.171$ Вт/м² и на очень малую переменную величину, максимальное значение которой достигается при $W = W^* \approx 190$ и равно всего лишь 0.0035 Вт/м². Так как по-

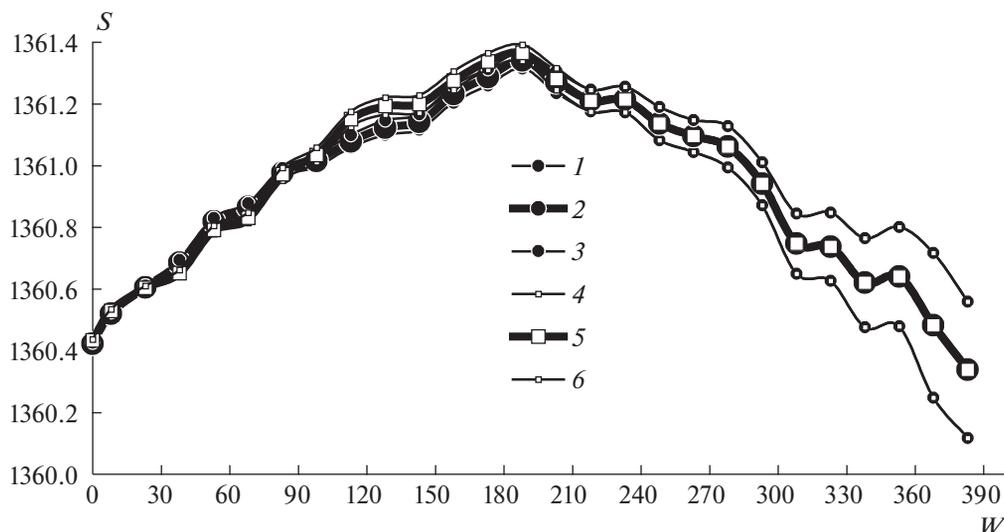


Рис. 2. Зависимость плотности потока энергии от Солнца S (кривая 2) от чисел Вольфа W на основе данных за 1976–2018 гг. и на основе данных за 1976–2010 гг. (кривая 5). Кривые 1, 3 и 4, 6 – это погрешности $S \pm \sigma$ расчета кривой 2 и 5, соответственно.

грешность $\pm\sigma$ наших расчетов функции $S(W)$ больше этой величины, то можно сказать, что для обоих рядов данных $S_n(t)$ и $S_o(t)$ функции $S_n(W)$ и $S_o(W)$ отличаются только на постоянную ΔS .

Если построить функцию $S_n(W)$ на основе данных измерений за более короткий интервал времени 1976–2010 гг., то получим кривую 5 на рис. 2, которая заметно отличается от кривой 2 в области чисел Вольфа $W < 180$. Это указывает на то, что для более точного определения функции $S(W)$ нужны дальнейшие наблюдения $S(t)$ и $W(t)$. В области $W > 210$ кривые 2 и 5 на рис. 2 совпадают потому, что в течение 2011–2018 гг. наблюдений с такими большими числами Вольфа не было зарегистрировано. При этом в диапазоне $196 \leq W \leq 210$ добавлено только 6 новых событий к 322 прежним событиям за 1976–2010 гг., а диапазоне $181 \leq W \leq 195$ – 15 новых к 421 прежним событиям. Наибольшее отличие кривых 2 и 5 на рис. 2 наблюдается при $106 \leq W \leq 150$ и составляет $\Delta S = 0.07$ Вт/м², что в три раза больше погрешности расчета кривой 2. Заметим, что погрешность $\pm\sigma$ расчета среднего значения ряда чисел рассчитывается по известным формулам [Корн и Корн, 1978]. Форма кривой 5 похожа на полученную ранее в работе [Лаптухов и Лаптухов, 2012] нелинейную немонотонную зависимость $S(W)$ на основе данных $S_o(t)$ и $W(t)$ за 1976–2010 гг. Отличие этих кривых обусловлено упоминаемой выше существенной коррекцией чисел Вольфа, в результате которой они были увеличены за 4 последние десятилетия с помощью переменного множителя $1.2 \leq P \leq 1.5$. В отдельные сутки множитель изменялся в широких пределах $0.6 \leq P \leq 2$. Подробные сведения о множителе P можно найти в работе

[Пишкало, 2018]. В результате коррекции чисел Вольфа максимум функции $S(W)$ переместился из области $W = 115–145$ в область $W = 180–190$.

4. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНОЙ СВЯЗИ СВЕТИМОСТИ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

При росте солнечной активности увеличивается число магнитных облаков, всплывающих из недр Солнца за счет сил Архимеда. Эти силы есть следствие того, что магнитное поле имеет давление, но, в отличие от солнечной плазмы, практически не имеет массы и поэтому плазма с полем более легкая, чем плазма без поля. Всплытие магнитных облаков сопровождается повышенным выносом тепловой энергии из глубоких горячих слоев Солнца и, следовательно, ростом интегральной солнечной светимости и параметра S . После всплытия магнитного облака в фотосфере образуется одно или несколько магнитных пятен. При высокой активности Солнца ($W > W^* \approx 180$) значительная часть поверхности фотосферы покрывается магнитными пятнами, внутри которых, как известно, температура существенно ниже (~ 4500 К), чем вне них (6000 К). Так как плотность потока лучистой энергии с солнечной поверхности пропорциональна четвертой степени ее температуры, то плотность потока энергии из пятна приблизительно в три раза меньше, чем из соседних областей. Это весьма существенное уменьшение и поэтому даже при наблюдаемом небольшом проценте покрытия поверхности Солнца пятнами с ростом чисел Вольфа выше некоторого значения $W > W^*$ полная его светимость S

начинает уменьшаться. Для циклов низкой активности Солнца, как будет показано ниже величина $W^* \approx 90$ и эффект уменьшения S с ростом чисел Вольфа выражен слабее.

Убедимся, что наблюдаемое на рис. 2 уменьшение солнечной постоянной $\Delta S \sim 1$ Вт/м² при росте чисел Вольфа в области $W > 180$ может быть обусловлено уменьшением потока энергии из солнечных пятен. С этой целью оценим уменьшение потока энергии из типичного солнечного пятна с диаметром тени $D_1 = 17500$ км, где поток энергии составляет лишь 20% от фотосферного, и диаметром полутени $D_2 = 37000$ км, из которой поток энергии составляет ~80% от фотосферного [Лифшиц, 1986]. На основе этих данных легко посчитать, что относительное уменьшение потока энергии от Солнца за счет одного такого пятна составит $0.0236\% \cong 0.02\%$. Эта простая оценка сделана в предположении, что при образовании пятна поток энергии вне его не изменяется. Оценка изменения потока энергии вне пятна — это сложная задача, выходящая за рамки наших исследований. Относительное изменение солнечной постоянной $\Delta S/S$ — такое же, и поэтому $\Delta S = 0.32$ Вт/м². Значит, для объяснения наблюдаемого на рис. 2 уменьшения солнечной постоянной $\Delta S \approx 1$ Вт/м² достаточно всего лишь три таких типичных пятна. Реально же при высокой солнечной активности число таких пятен ~100 и более. Поэтому появление пятна на поверхности фотосферы, по-видимому, приводит к перераспределению потока энергии из недр Солнца, уменьшению его через пятно и некоторому увеличению потока вне пятна, что представляется вполне естественным.

5. РАЗЛИЧИЕ ЗАВИСИМОСТИ $S(W)$ НА ФАЗАХ РОСТА И СПАДА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Проведем сортировку всех данных на два массива. В первый массив будем помещать данные наблюдений на фазе роста активности Солнца в 11-летнем цикле, а во второй — все остальные данные. Для простоты условимся считать фазой роста временные интервалы за 1976–1980, 1987–1990, 1997–2001, 2009–2014 гг. включительно. Данные наблюдений за 1981–1986, 1991–1996, 2002–2008, 2015–2018 гг. условимся относить к фазе спада солнечной активности (см. рис. 1).

На рисунке 3 показаны результаты расчета статистической зависимости $S(W)$ для фазы роста (кривая 2) и фазы спада (кривая 5) на основе данных наблюдений за 1976–2018 гг. Видим, что на фазе спада величина S почти для всех W ниже, чем для фазы роста. Особенно хорошо это видно по кривым 7 и 8, которые есть скользящее среднее по пяти точкам кривых 2 и 5, соответственно. За-

метим, что среднее наблюдаемое значение солнечной постоянной $S(t)$ для всех рассматриваемых 20 лет фазы роста и для всех 23 лет фазы спада составило 1360.97 и 1360.76 Вт/м², соответственно. Их разность $\Delta S = 0.21$ Вт/м².

Выброс на кривой 5 в области чисел Вольфа $W = 352 \pm 7$ обусловлен малой статистикой наблюдений: здесь зафиксировано всего 7 случаев для фазы спада и 16 случаев для фазы роста. С ростом чисел Вольфа число наблюдаемых событий уменьшается и поэтому погрешность $\pm \sigma$ расчета функции $S(W) \pm \sigma$, естественно, увеличивается, что и видно на рис. 2 и рис. 3.

6. РАЗЛИЧИЕ ЗАВИСИМОСТИ $S(W)$ ДЛЯ РАЗНЫХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Разные циклы активности Солнца могут сильно отличаться. Так, на рис. 1 видно, что высота последнего 24-го цикла ($W_{\max} = 113$) почти в два раза ниже высоты 21-го цикла ($W_{\max} = 220$). 22-й цикл солнечной активности с $W_{\max} = 211$ похож на 21-й, а 23-й цикл с $W_{\max} = 174$ — это нечто среднее между 21-м и 24-м циклами. Поэтому имеет смысл для каждого цикла в отдельности рассчитать статистическую зависимость $S(W)$ и посмотреть, насколько они различаются. Оказалось, что в пределах погрешности кривые $S_{21}(W)$ и $S_{22}(W)$ совпадают, и поэтому для уменьшения погрешности расчета $S(W)$ для этих циклов целесообразно объединить эти два цикла в один массив данных и рассчитать общую для этих циклов зависимость $S_{21-22}(W)$. Функции же $S_{23}(W)$ и $S_{24}(W)$ существенно отличаются друг от друга и от $S_{21-22}(W) \cong S_{21}(W) \cong S_{22}(W)$. Результаты расчета этих трех функций представлены на рис. 4 в виде трех кривых: C_{21-22} , C_{23} и C_{24} , соответственно. Для кривой C_{24} данные в области больших суточных чисел Вольфа $W > 195$ отсутствуют, так как таких событий в 24-м цикле не было или они были единичные, что недостаточно для статистического определения $S_{24}(W)$. Аналогично для $S_{23}(W)$ при $W > 315$ и для $S_{21-22}(W)$ при $W > 390$.

Как видно из рис. 4, все три кривые $S(W)$ при росте чисел Вольфа от 0 до некоторой величины W_{ext} увеличиваются, достигают максимума и затем при $W > W_{\text{ext}}$ начинают уменьшаться. Но величины W_{ext} и соответствующие значения солнечной постоянной $S(W_{\text{ext}})$ для разных кривых существенно разные. Отсюда следует, что для корректного описания солнечной постоянной S как функции активности Солнца недостаточно только одних чисел Вольфа, но нужен еще, по крайней мере, один параметр P , при изменении которого функция $S(W, P)$ существенно изменяется. В качестве такого параметра можно предло-

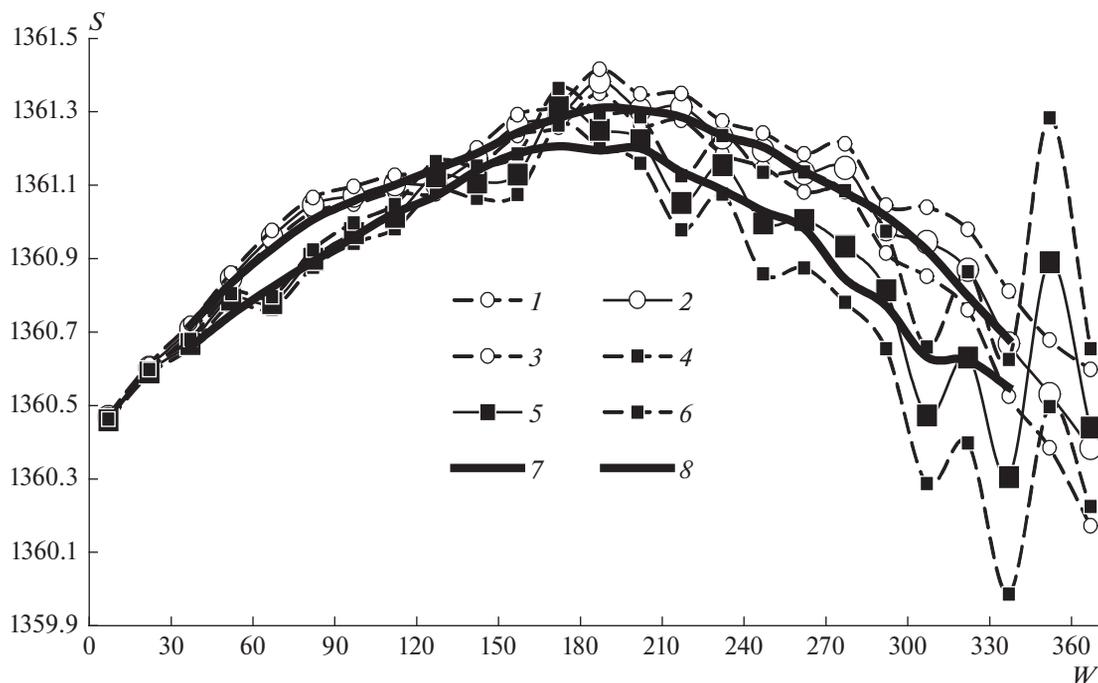


Рис. 3. Статистическая зависимость солнечной постоянной S от чисел Вольфа W на фазе роста (кривая 2) и фазе спада (кривая 5) солнечной активности по данным за 1976–2018 гг. Штриховыми кривыми 1, 3 и 4, 5 отмечена погрешность $S \pm \sigma$ расчета кривых 2 и 5, соответственно. Кривые 7 и 8 – это скользящее среднее по пяти точкам для кривой 2 и 5, соответственно.

жить высоту 11-летнего цикла, равную, по определению, максимальному среднегодовому значению чисел Вольфа в анализируемом цикле, т.е. $P = \max(W_{\text{год}})$. Для циклов с приблизительно одинаковыми величинами P солнечные постоянные $S(W, P)$ тоже будут приблизительно равными. Без учета этого важного параметра интегральной характеристики солнечного цикла при фиксированном числе Вольфа W различие солнечной постоянной в разных циклах может быть большим, как видно на рис. 4, особенно в области $100 \leq W \leq 180$. И это различие надо учитывать при решении проблемы восстановления солнечной постоянной в прошлом в 1849–1975 гг. или в дни отсутствия данных в эпоху измерения параметра S на космических аппаратах, начиная с 1976 г.

Отметим, что выполненная в 2015 г. ревизия чисел Вольфа заметно изменяет функцию $S(W, P)$. Наиболее сильно это проявляется в том, что максимум функции $S(W)$ перемещается из области $W = 120–160$ [Лаптухов и Лаптухов, 2012] в область $W = 170–200$ (см. рис. 2). Упомянутая выше коррекция суточных измерений потока солнечной энергии S приводит практически лишь к изменению этой функции на постоянную величину ΔS .

Измерение интегрального потока энергии от Солнца S на космических аппаратах – сложная,

важная и трудоемкая проблема. Поэтому представляет интерес на основе уже выполненных среднесуточных измерений разработать новый, корректный метод восстановления среднемесячных или среднегодовых значений потока солнечного излучения, исходя из его статистической связи $S(W, P)$ с суточными числами Вольфа в разные циклы активности Солнца. В случае удовлетворительного решения этой проблемы это позволит нам получить полезные сведения об изменении солнечной “постоянной” на основе суточных чисел Вольфа W в прошлом, начиная с 1849 г., а также, возможно, и в будущем, если будет найден надежный метод прогноза чисел Вольфа.

В настоящее время известны данные о динамике потока энергии от Солнца S для циклов с высокой активностью Солнца $P = 210–220$ (21-й и 22-й циклы), с $P = 170–180$ (23-й цикл) и с низкой активностью с $P = 110–120$. Но отсутствуют данные наблюдений величины S для циклов с величиной $P = 120–170$. Без этих данных вряд ли возможно надежное восстановление солнечной постоянной на основе известных функций $S(W, P)$. Поэтому нужны дальнейшие измерения S на космических аппаратах.

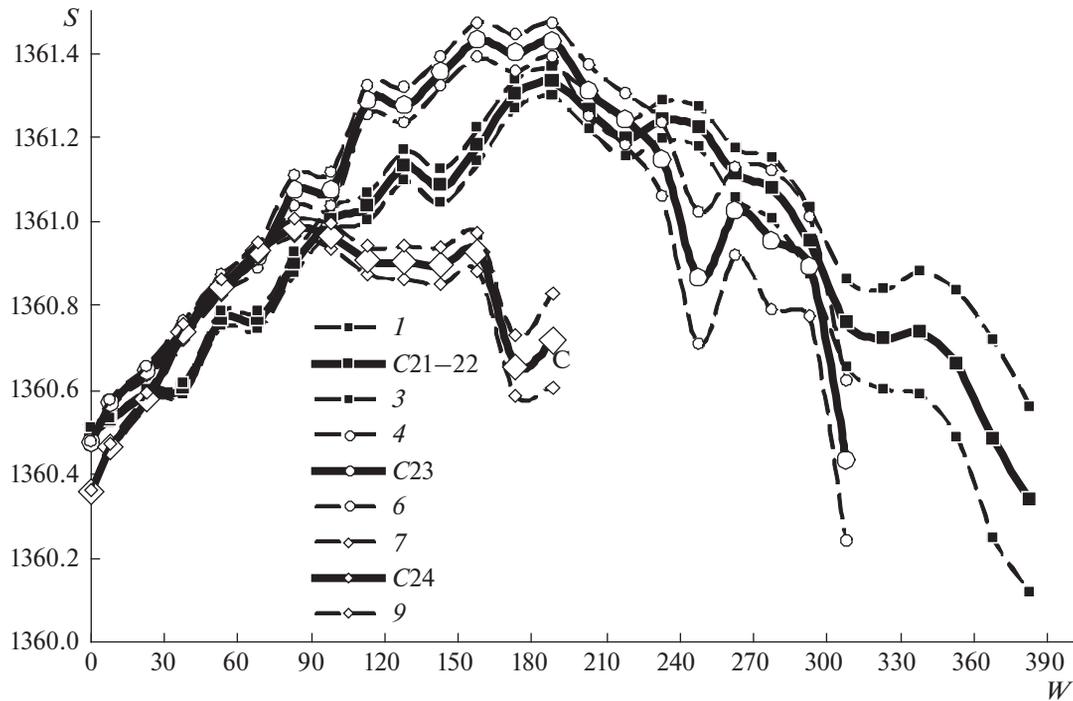


Рис. 4. Зависимость $S(W)$ по данным наблюдений за 1976–1995 гг. (кривая C21–22 с черными квадратиками), за 1997–2007 гг. (кривая C23 со светлыми кружочками) и за 2008–2018 гг. (кривая C24 с белыми ромбиками). Штриховые тонкие линии 1, 3, 4, 6, 7 и 9 показывают погрешности расчета соответствующих кривых.

7. ВЫВОДЫ

1. Статистическая зависимость суточных значений потока солнечной энергии S (солнечной “постоянной”) от суточных чисел Вольфа W имеет ярко выраженный нелинейный и немонотонный характер. Предложен возможный простой физический механизм этой нелинейной зависимости.

2. Показано, что статистические нелинейные зависимости $S(W)$ для разных циклов солнечной активности с разными величинами среднегодовых максимальных величин чисел Вольфа P значительно отличаются друг от друга. Это означает, что реально среднесуточный поток солнечной энергии S зависит не только от суточных чисел Вольфа, но и от других параметров солнечного цикла, важнейшим из которых является его максимальная высота P . Все это важно учитывать при решении проблемы восстановления солнечной постоянной на основе наших знаний о динамике чисел Вольфа.

3. По данным наблюдений за 1976–2018 гг. выявлено отличие статистической зависимости солнечной постоянной S от чисел Вольфа W на фазе роста и фазе спада солнечной активности. Показано, что величина потока солнечной энергии S на фазе роста солнечного цикла выше, чем на фазе спада в среднем на величину $\Delta S \cong 0.2$ Вт/м².

4. Ревизия чисел Вольфа $W(t)$ и солнечной постоянной $S(t)$ привела практически только лишь к увеличению масштаба чисел W в $5/3 \cong 1.667$ раза и изменению величины S на постоянный множитель, равный $S_n/S_o = 0.9962133$, или приблизительно на постоянную величину $S_n - S_o \cong -5.17$ Вт/м². Все другие малочисленные изменения в отдельные сутки не оказывают заметного влияния на найденные зависимости $S(W, P)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенков Е.П. Колебания климата за последнее тысячелетие. Л.: Гидрометеиздат. 187 с. 1988.
- Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат // ДАН СССР. Т. 243. № 3. С. 607–610. 1978.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 832 с. 1978.
- Кузнецов В.Д. Космические исследования Солнца: состояние и перспективы // Солнечно-земная физика. Вып. 16. С. 39–44. 2010.
- Лантухов А.И., Лантухов В.А. Восстановление сведений о параметрах межпланетной среды на основе aa индекса геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 6. С. 762–767. 2010.
- Лантухов А.И., Лантухов В.А. Нелинейная зависимость потока излучения Солнца от чисел Вольфа и по-

тока солнечного радиоизлучения // Инженерная физика. № 5. С. 50–59. 2012.

– *Лифшиц М.А.* Солнечные пятна / Физика космоса. Маленькая энциклопедия. Ред. Р.А. Сюняев. М.: Советская энциклопедия. С. 634–636, 37–49. 1986.

– *Пишкало Н.И.* Солнечные пятна: новая жизнь чисел Вольфа // Страна знаний. № 5. 2018. <https://www.krain-az.org/2018-05/389-wolf>

– *Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W.* Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle // Space Sci. Rev. V. 186. № 1–4. P. 35–103. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2>

– *Wu C.-J., Krivova N.A., Solanski S.K., Usoskin I.G.* Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years // Astron. Astrophys. V. 620. № A120. 2018. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832956>