

УДК 523.98;523.165

## ОЦЕНКА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА ЦИКЛОВ МИНИМУМА ДАЛЬТОНА ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДОСТОВЕРНЫХ ЦИКЛОВ РЯДА

© 2023 г. И. Г. Шибает\*

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

\*e-mail: ishib@izmiran.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Исходным материалом для ряда чисел Вольфа служат как архивные записи разрозненных наблюдений, так и регулярные наблюдения в обсерваториях. Многие исследователи опираются на ряд чисел Вольфа, включающий восстановленные данные архивных записей, хотя свойства и характеристики восстановленной и достоверной частей ряда существенно отличаются. Также противоречивы параметры и самой восстановленной части. Естественно, что согласование свойств восстановленного и достоверного рядов сгладит противоречия и расширит массив более надежных показаний. С учетом связи между характеристиками достоверных циклов представлены варианты групповой коррекции средних значений циклов I–IX. Так как при сопоставлении протяженных фрагментов локальные невязки данных играют меньшую роль, то опираясь на интегральные оценки этих фрагментов (без детализации условий их формирования), мы получили более взвешенные интервальные оценки. Параметры интервалов (групп циклов) достоверного ряда служат основой коррекции.

DOI: 10.31857/S001679402210025X, EDN: PJLHYM

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к традиционным индексам солнечной активности возрастает. В настоящее время цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа  $W$  (или  $WSN$  — Wolf sunspot number) является наиболее представительным и широко используется в различных приложениях. Достаточно полный обзор этих вопросов представлен в монографии [Витинский и др., 1986] и обзоре [Иванов-Холодный и Чертопруд, 1990].

Многие исследователи опираются на весь ряд среднемесячных чисел Вольфа  $W$  ( $W = W_{rest} \cup W_{tool}$ ), который включает восстановленный ряд  $W_{rest}$  (с 1749 г. по 1849 г.) и ряд достоверных данных  $W_{tool}$  (регулярные инструментальные наблюдения с 1849 г. по настоящее время). Однако свойства восстановленных и достоверных данных значительно разнятся, т.к. при объединении отрывочных данных с различными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием искажаются, естественно, локальные характеристики регистрируемого процесса и взаимосвязь временных фрагментов разного масштаба [Ишков и Шибает, 2006]. Все это проявилось при формировании восстановленного ряда  $W_{rest}$ , что наглядно продемонстрировано в пуб-

ликации [Nathaway, 2015], см. Fig. 2 этой работы, но на этот факт исследователи обращают мало внимания, хотя влияние этих факторов не оценивалось.

Другие авторы, считая эти данные ненадежными, опираются только на достоверный ряд  $W_{tool}$ . При этом возникают вопросы к понятиям (структурам), сформированным с опорой хотя бы на часть восстановленных данных. Цикл Гляйсберга — яркий тому пример, т.к. это понятие возникло из анализа небольшого объема данных, имеющих различную степень достоверности, и с ключевой ролью циклов V–VII (минимум Дальтона) из восстановленного ряда. Еще в 1939 г. Гляйсберг, опираясь на цюрихский ряд (1750–1928 гг.) и сглаживая максимумы циклов по четырем значениям, выделил среди них два максимума и два минимума, что указывало на длиннопериодную составляющую ряда (цикл Гляйсберга) с периодичностью их максимумов/минимумов в семь–восемь циклов [Gleissberg, 1939]. Фактически анализировалось 16 циклов: 9 циклов из восстановленных данных и 7 циклов из достоверных данных. В более поздних работах [Gleissberg, 1955, 1967] было дано уточненное значение периода — ~80 лет.

Таблица 1. Оценки характеристик циклов по группам

|           | <i>mean</i><br>I–IX/X–XXIII                                      | $\sigma$<br>I–IX/X–XXIII           | $\sigma/\text{mean}$<br>I–IX/X–XXIII |
|-----------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Tc</i> | $134 \pm 15/131 \pm 6$<br>$134 \pm 15/131 \pm 6$                 | $19.0/10.0$<br>$18.9/9.5$          | $0.141/0.078$<br>$0.141/0.072$       |
| <i>Tm</i> | $57 \pm 13/46 \pm 4$<br>$57 \pm 14/48 \pm 4$                     | $17.5/6.4$<br>$17.7/7.3$           | $0.310/0.138$<br>$0.312/0.151$       |
| <i>Wm</i> | $106 \pm 31/120 \pm 22$<br>$176 \pm 52/185 \pm 28$               | $40.2/38.0$<br>$67.0/47.8$         | $0.380/0.318$<br>$0.380/0.258$       |
| <i>Sq</i> | $6302 \pm 1721/7330 \pm 1221$<br>$10609 \pm 2946/11342 \pm 1463$ | $2238.6/2115.1$<br>$3833.6/2532.9$ | $0.355/0.288$<br>$0.361/0.223$       |

В работах разных авторов по анализу самого ряда WSN, сделанных за последние 60 лет, период цикла Гляйсберга оценивается в пределах 80–110 лет. Часто исследователи выделяют конкретное значение периода, равное 88 годам [Feynman and Gabriel, 1990]. Полученный в работе [Shibaev, 2017] рост периода цикла Гляйсберга с увеличением доли достоверных данных хорошо это иллюстрирует: изначальная периодичность максимумов в семь–восемь циклов плавно трансформируется в десять–одиннадцать циклов.

Подробный анализ ряда W с 1749 г. по 2005 г. проведен в более ранней публикации автора [Shibaev, 2008], где выделена 150-летняя гармоника, характерная для достоверной части ряда. Сравнение спектральных компонент и анализ их гладкости показал существенные отличия в их поведении для W<sub>rest</sub> и W<sub>tool</sub> (несогласованность характеристик рядов). Степень искажений, при этом, возрастает с удалением в прошлое, и менее искажены характеристики временной области, примыкающей к 1849 г., т.е. область циклов VIII–IX.

Другой подход, оценивающий согласованность рядов W<sub>rest</sub> и W<sub>tool</sub>, – это сопоставление общих (интегральных) характеристик выделенных интервалов без детализации условий их формирования [Шибеев, 2010]. В этом случае локальные невязки данных играют меньшую роль и получаются более взвешенные оценки. Например, сравнение базовых параметров циклов (длительностей цикла *Tc* и его ветви роста *Tm*, максимума цикла *Wm*, его площади *Sq*) для двух групп циклов: группы восстановленных циклов I–IX и группы достоверных циклов X–XXIII. Среднее, дисперсия (корень из центрального момента второго порядка) и их отношение, вычисленные по группам, приведены ниже в табл. 1. Верхние показания соответствуют старой версии, нижние – новой. По таблице критических точек *t*-критерия Стьюдента, для уровня значимости  $\alpha = 0.05$ , вычислены и приведены доверительные интервалы для сред-

них значений. Видно, что характеристики второй группы, выделенные курсивом, лучше, а для *Tc*, *Tm* значительно лучше. Параметры циклов в новой версии ряда чисел Вольфа взяты из работы [Шибеев, 2017], где вычислен период низкочастотной компоненты достоверной части, равный 131 году. Кроме того, ниже показана противоречивость параметров и самого ряда W<sub>rest</sub>, у которого циклы I, V и VII имеют аномально длинные ветви роста – более половины цикла. Следует ожидать, что коррекция восстановленного ряда сгладит противоречия и результаты, полученные с опорой на него, станут более надежными.

Цель предлагаемой работы – скорректировать параметры восстановленных циклов, используя следующие связи между характеристиками достоверных циклов:

- эмпирическая зависимость длительности цикла от его амплитуды;
- аппроксимация суммарных длительностей и площадей для групп циклов.

Так как высокие циклы обычно короче длинных низких циклов, то введена классификация циклов по длительности: “длинные” циклы с *Tc* > 133 мес. и “короткие” циклы *Tc* < 133 мес. Такая классификация циклов по длительности позволила параметризовать характеристики групп достоверных циклов и аппроксимировать их.

Получена оценка возросшего среднего значения группы восстановленных циклов I–IX, которую можно представить в параметрах индивидуальных циклов. Так как наиболее искажены связи (зависимости) в области циклов V–VII, то рассмотрены сценарии с акцентом на **коррекцию минимума Дальтона**. Показана возможность значимого возрастания среднего от средних значений этих циклов.

Работа, в основном, опирается на старую версию ряда чисел Вольфа (v.1.), результаты для новой версии (v.2.) дополняют изложение.

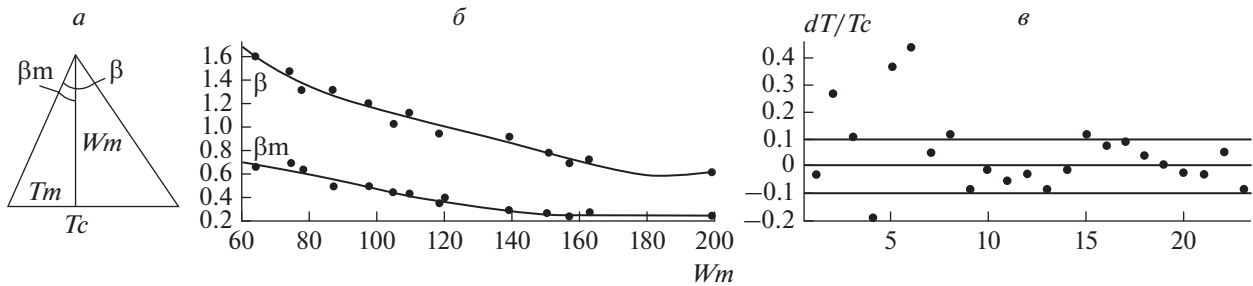


Рис. 1. (а) — упрощенная модель цикла; (б) — эмпирическая зависимость  $\beta$  и  $\beta_m$  от  $Wm$ , по оси  $OX$  —  $Wm$ ; (в) — относительные погрешности табличных и эмпирических длительностей циклов, по оси  $OX$  — номер цикла.

## 2. ВЗАИМОСВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСТОВЕРНОГО РЯДА

### 2.1. Эмпирическая оценка зависимости длительности цикла от его амплитуды

Найдем связь между такими параметрами цикла, как длительность  $Tc$  и максимум  $Wm$  исходя из упрощенной модели ветвей роста и спада (рис. 1а). В переменных  $\beta$  и  $\beta_m$  (углы с опорой на отрезки  $Tc$  и  $Tm$ ) имеем  $Tc^* = 2Wm \sin \beta / (\cos \beta + \cos(\beta - 2\beta_m))$ . Эмпирические зависимости этих углов от  $Wm$  с их аппроксимацией типа

$$a_0 + a_1 Wm + a_2 Wm^2 + a_3 Wm^3 + a_4 Wm^4$$

для циклов X–XXIII показаны на рис. 1б. Коэффициенты разложений  $\{a_i\}$  даны в табл. 2. Вычисляя длительности всех циклов и сопоставляя их с табличными, оценим относительные погрешности  $(Tc^* - Tc)/Tc$  (рис. 1в; ось  $OX$  — номер цикла).

Для циклов достоверного ряда погрешности вписались в 10%-й интервал, а сопоставление сумм табличных и расчетных длительностей всех 14 циклов дает 1837 и 1830 мес., что говорит о разумности используемой модели. Оценим взаимосвязь  $Tc$  и  $Wm$  для восстановленных циклов исходя из этой модели. Табличные и расчетные длительности 9 циклов ряда  $W_{rest}$  равны соответственно 1209 и 1339 мес., при этом циклы минимума Дальтона дают 426 и 552 мес., вклад остальных шести циклов близок и соответственно равен 783 и 787 мес. Завышенная оценка длины восстановленного ряда (1339 мес.) отражает заниженные значения его амплитуд (обобщение “правила Вальдмайера” на весь цикл). Отметим, что наиболее противоречивы параметры ряда  $W_{rest}$  в минимуме Дальтона.

### 2.2. Фрагментарные оценки рядов через параметризацию групп циклов

Естественно сравнивать характеристики групп с равным количеством циклов, тогда девяти восстановленным циклам 1–9 (группа G0) можно сопоставить шесть групп (фрагментов) G1–G6 по девяти циклов из достоверной части ряда  $W_{tool}$ : 10–18, 11–19, 12–20, 13–21, 14–22, 15–23. Каждой группе сопоставим суммарные длительность циклов  $\Sigma T$  и площадь циклов  $\Sigma Sq$  в группе, за оценку “среднего” значения  $W$  в группе возьмем их отношение  $w = \Sigma Sq / \Sigma T$ . Для группы восстановленных циклов G0 эти параметры равны:  $\Sigma T_0 = 1209$  мес.,  $\Sigma Sq_0 = 56714/95482$  (старая/новая версии),  $w_0 \sim 46.91/78.98$ . Длительность каждой группы в месяцах иллюстрирует рис. 2а, горизонтальная линия — среднее значение  $\Sigma T$  по группам G1–G6 равное 1159.0 мес. В скобках (5)–(2) отмечено количество “длинных” циклов в данной группе.

Видно, что соотношение “длинных” и “коротких” циклов в группе адекватно отражает ее длину и может использоваться для классификации групп достоверных циклов. Зависимость  $\Sigma T$  от количества “длинных” циклов  $N_L$  в группе, для групп G1–G6, и значение  $\Sigma T_0$  демонстрирует рис. 2б. Линейная и кубическая аппроксимирующие функции наложены на  $\Sigma T$ . Отметим, что значения  $\Sigma T$  для обеих версий ряда чисел Вольфа фактически совпадают. Для  $\Sigma Sq$  связь с количеством “длинных” циклов  $N_L$  в группе у этих версий различна, что демонстрирует рис. 3, где отмечены  $\Sigma Sq_0$ . Квадратичные аппроксимирующие функции наложены на  $\Sigma Sq$ .

Полученные зависимости позволяют оценить согласованность между  $\Sigma T_0$  и  $\Sigma Sq_0$ . Исходим из

Таблица 2. Коэффициенты разложения  $\beta$  и  $\beta_m$

|           | $a_0$     | $a_1$     | $a_2$     | $a_3$     | $a_4$     |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\beta$   | +5.191    | −0.111    | +0.121e-2 | −0.618e-5 | +0.117e-7 |
| $\beta_m$ | +0.871e-1 | +0.299e-1 | −0.468e-3 | +0.253e-5 | −0.460e-8 |

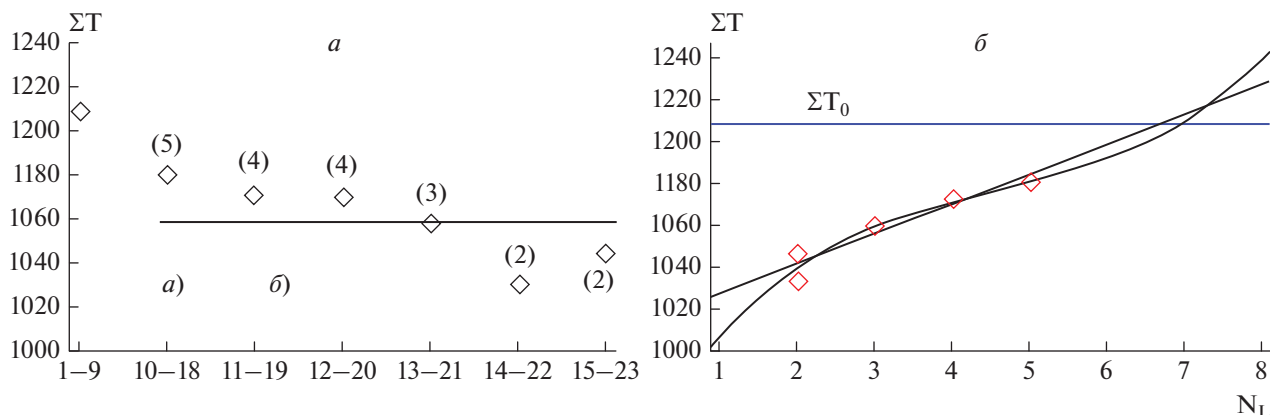


Рис. 2. (а) – распределение  $\Sigma T$  по группам циклов G0–G6, по оси OX – группа цикла. Горизонтальная линия – среднее значение  $\Sigma T$  по группам G1–G6, равное 1159.0 мес., в скобках (5)–(2) – количество “длинных” циклов в группе. (б) – зависимость  $\Sigma T$  от количества “длинных” циклов  $N_L$  в группе, по оси OX –  $N_L$ , отмечен уровень  $\Sigma T_0$ .

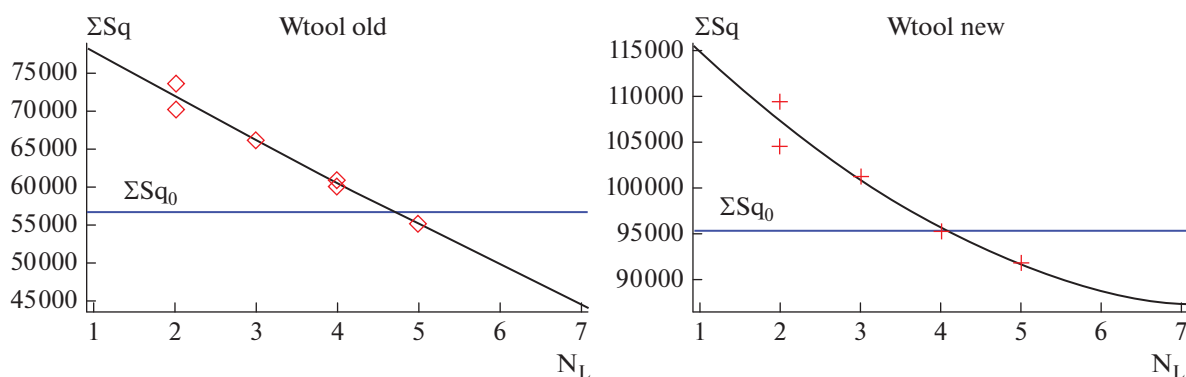


Рис. 3. Зависимость  $\Sigma Sq$  для версий v.1 и v.2 ряда Wtool от количества “длинных” циклов  $N_L$  в группе, по оси OX –  $N_L$ , отмечен уровень  $\Sigma Sq_0$ .

табличной длительности  $\Sigma T_0$  циклов 1–9. По кривым  $\Sigma T$  (рис. 2б) это соответствует  $N_L = 7$  (семь “длинных” и два “коротких” цикла). По кривым  $\Sigma Sq$  (рис. 3) для  $N_L = 7$  находим суммарную площадь этой комбинации девяти циклов без детализации их следования. Для старой версии  $\Sigma Sq(N_L = 7) = 45850$ , для новой – 87192. Эти величины значительно меньше  $\Sigma Sq_0$  – табличных суммарных площадей циклов 1–9 (по данным табл. 1 – более чем на среднюю площадь цикла). Фактически, при принятой длине ряда Wrest, оценочный уровень солнечной активности в минимуме Дальтона и его окрестности еще ниже, что весьма экзотично. Несоответствие между параметрами восстановленного ряда проявилось при наложении связей, полученных для групп G1–G6, на группу G0 и коррекция параметров ряда Wrest может ослабить (снять) эти противоречия.

### 3. КОРРЕКЦИЯ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЦИКЛОВ

Более удобно опираться на среднее значение чисел Вольфа в группе  $w = \Sigma Sq / \Sigma T$ . За взвешен-

ную оценку длины группы G0 возьмем среднее значение  $\Sigma T$  по группам G1–G6, равное 1159.0 мес. (рис. 2а). Эта величина очень близка к оценке через период основной гармоники:  $129 \times 9 = 1161$  мес. Приходим к сценарию с  $N_L = 3$  (три “длинных” и шесть “коротких” циклов) и соответственно:

–  $\Sigma Sq(N_L = 3) = 66976/100763$  (старая/новая версии) и  $w \sim 57.8/86.9$ , что превосходит  $w_0$ . Для близкого варианта с  $N_L = 2$  имеем:

–  $\Sigma T(N_L = 2) = 1138$ ,  $\Sigma Sq(N_L = 2) = 72520/107177$ ,  $w \sim 63.8/94.2$ .

Представим возросшее значение  $w$  группы восстановленных циклов в параметрах индивидуальных циклов. Площадь большинства циклов группы G0 больше (или около) среднего значения и естественно отнести прирост  $(\Sigma Sq - \Sigma Sq_0)$  к минимуму Дальтона, как области с наименее согласованными параметрами (связать прирост с коррекцией минимума Дальтона). Табличные средние значения циклов старой/новой версии восстановленного ряда представлены на левой/правой стороне рис. 4, где, для наглядности, сплошными линиями отмечено среднее от средних значений

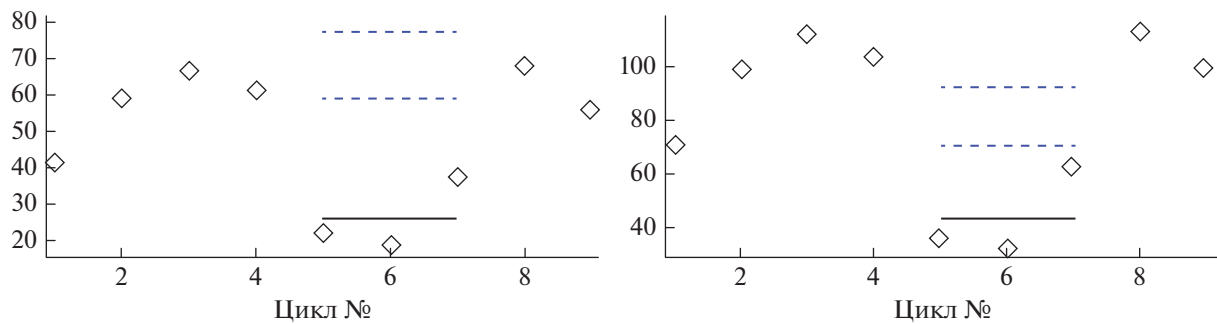


Рис. 4. Средние значения циклов I–IX (старая версия – слева, новая – справа); ось  $OX$  – номер цикла. Сплошная линия – среднее от средних значений циклов V–VII, штриховые линии – варианты скорректированных средних от средних значений циклов V–VII.

циклов V–VII (соответственно 26.48 и 44.1). Относя возросшие параметры всех девяти циклов к этим трем **проблемным циклам**, получим прирост среднего значения  $(w - w_0) \times 9/3$  для каждого из них. Итоговые средние уровни для скорректированных средних значений циклов V–VII отмечены пунктирными линиями. Для старой версии варианту  $N_L = 3$  – “взвешенная оценка длины группы  $G_0$ ”, соответствует уровень 59.15 (фактически нивелируется минимум Дальтона) и возможно формирование максимума с уровнем 77.15 для варианта с  $N_L = 2$ .

Аналогичному рассмотрению средних значений циклов новой версии восстановленного ряда соответствуют следующие параметры:

- среднее от средних значений циклов V–VII равно 44.1 (сплошная линия);

- варианту  $N_L = 3$  – “взвешенная оценка длины группы  $G_0$ ”, соответствует уровень 67.9 и уровень 89.8 для варианта с  $N_L = 2$  (штриховые линии).

Напомним, что отношение  $W_{new}(t)/W_{old}(t)$  содержит области с отличительными амплитудными и частотными свойствами. При этом, в среднем, для восстановленных циклов это отношение больше, чем для достоверных циклов. Это и определило меньший масштаб трансформации уровня циклов V–VII в новой версии.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен вариант групповой коррекции при котором сопоставляются протяженные фрагменты и опираясь на интегральные оценки этих фрагментов (без детализации условий их формирования) мы получаем более взвешенные оценки характеристик фрагментов. Параметры интервалов (групп циклов) достоверного ряда служат основой коррекции восстановленных данных, что позволяет расширить массив показаний пригодных для анализа.

Рассмотрена коррекция средних значений циклов I–IX. Выбранный сценарий связывает согласование параметров восстановленного ряда с коррекцией минимума Дальтона, в котором наиболее искажены взаимосвязи характеристик достоверного ряда. Дана оценка возросших средних значений циклов V–VII. Этот рост отразится в характеристиках цикла Гляйсберга и должен ослабить зависимость его периода от доли достоверных данных.

Отметим, что критическое отношение к восстановленному ряду выражает ряд авторов еще в трудах симпозиума 1978 г. – “Солнечно-земные связи, погода и климат” [Solar-Terrestrial Influences ..., 1979]. Попытка сбалансировать временные характеристики циклов ряда  $W_{rest}$  за счет “потерянного” цикла предпринята в работе [Usoskin et al., 2003]. Анализ фрактальных свойств ряда ширины годовых колец одиннадцати секвой представлен в работе [Отсука и др., 2009]. Минимум Дальтона при данном подходе не проявился.

Интересное наблюдение сделано в работе [Шибав, 2010] при сопоставлении чисел Вольфа с температурными рядами нескольких европейских центров. В работе отмечено, что около 1925 г. и далее видна тенденция к синхронизации температурных характеристик, что отражает рост и возросшее влияние солнечной активности. Подобная ситуация отмечается и до 1850 г., т.е. необходимость усиления солнечной активности совпала с минимумом Дальтона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витинский Ю.И., Копецкий М., Ку克林 Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 296 с. 1986.
- Иванов–Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Солнечная активность // Исследование космического пространства. Т. 33. С. 3–99. 1990. (Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР).

- Ишков В.Н., Шибает И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 70. № 10. С. 1439–1442. 2006.
- Отсука К., Корнелиссен Г., Халберг Ф. Хроном климатических измерений ширины древесных колец // Геофизические процессы и биосфера. Т. 8. № 1. С. 63–72. 2009.
- Шибает А.И. Сопоставление характерных параметров солнечных циклов новой и старой версий рядов чисел Вольфа и динамика длиннопериодных компонент рядов // Тр. XIV конференции молодых ученых – 2017. ИКИ РАН, Москва. С. 143–148. 2017.
- Шибает И.Г. Оценка восстановленной части ряда ежемесячных чисел Вольфа (1700–1849 гг.) по характеристикам его достоверной части (1849–2009) и температурным рядам / Тр. Всер. Конф. "ССЗФ-2010". СПб: ГАО РАН. С. 455–458. 2010.
- Hathaway D.H. The Solar Cycle // Living Rev. Solar Phys. V. 12. № 4. 2015.  
<https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Feynman J., Gabriel S.B. Period and phase of the 88-year Solar cycle and the Maunder minimum: evidence for a chaotic Sun // Solar Phys. V. 127. № 2. P. 393–403. 1990.
- Gleissberg W. A long-periodic Fluctuation of the Sunspot Numbers // Observatory. V. 62. P. 158–159. 1939.
- Gleissberg W. Die Persistenz des 80 Jahrigen Sonnenfleckenzklus Durch 16 Jahrhunderte // I.Ü. Fen Fak. Mecm. Seri C. № 20. P. 263–271. 1955. = Publ. Istanbul Univ. Obs. № 57. 9 p. Ref. AJB 1955.
- Gleissberg W. Secularly smoothed data on the minima and maxima of sunspot frequency // Solar Phys. V. 2. № 2. P. 231–233. 1967.
- Shibaev A. Connection between period of low-frequency component Wolf's numbers (WNS) and length of Wolf's numbers series // Aerospace Research in Bulgaria. V. 29. P. 5–9. 2017.
- Shibaev I.G. Estimation of the reconstructed part of the Wolf series and the possibility of its correction // Solar Syst. Res. V. 42. № 1. P. 63–71. 2008.
- Solar-Terrestrial Influences on Weather and Climate // Proceeding of a Symposium. The Ohio State University, Columbus, Ohio, 24–28 August 1978. Dordrecht, Holland. 348 p. 1979.
- Usoskin I.G., Mursula K., Kovaltsov G.A. The lost sunspot cycle: Reanalysis of sunspot statistics // Astron. Astrophys. V. 403. № 2. P. 743–748. 2003.