ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 45, № 6, с. 447–452

УТОЧНЕНИЕ ПРАВИЛА ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА НА ОСНОВЕ 140-ЛЕТНЕГО РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ

© 2019 г. Ю. А. Наговицын[1,2*], В. Г. Иванов[1], Н. Н. Скорбеж[1]

[1]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

[2]Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 02.03.2019 г.; после доработки 29.03.2019 г.; принята к публикации 01.04.2019 г.

Правило Гневышева–Вальдмайера, связывающее времена жизни групп пятен и их площади, верифицировано на промежутке ~140 лет, в шесть раз превосходящем использованный М.Н. Гневышевым. Диапазон изучаемых времен жизни рекуррентных групп расширен с 40 до почти 90 дней. Подтверждена линейная форма закона Гневышева–Вальдмайера. Показано, что более точное выражение этого закона $A_{\max} = (13.0 \pm 1.1)LT$, где LT — время жизни группы в сутках, $A_{\max}$ — ее максимальная площадь за время наблюдения, измеряемая в миллионных долях полусферы Солнца. Таким образом, коэффициент перехода от времен жизни к максимальным площадям групп пятен оказывается в ≈1.3 раза больше, чем у Гневышева (1938).

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, солнечные пятна.

DOI: 10.1134/S0320010819060044

ВВЕДЕНИЕ

Один из эмпирических “законов” или “правил” солнечной активности и цикличности — правило Гневышева–Вальдмайера, утверждающее, что

$$A_{\max} = 10LT, \qquad (1)$$

где $A_{\max}$ — максимальная площадь группы пятен, измеряемая в миллионных долях полусферы м.д.п. (mvh); LT — время жизни группы, в сутках. Это правило установлено Гневышевым (1938) по гринвичским данным за 1912–1934 гг. и получило известность благодаря цитированию в книге Вальдмайера (1941), в которой ее автор пишет: “Größe und Lebensdauer der Fleckengruppen gehen einander parallel; als Faustregel kann man sieh merken: bei einer Lebensdauer von 10 Tagen wird eine maximale Fläche von 1×10^{-4} Sonnenhalbkugeln erreicht, bei einer solchen von 40 Tagen eine 4mal größere.” — “Размер и время жизни групп пятен связаны; как правило, можно считать, что при продолжительности жизни 10 дней достигается максимальная площадь группы 10^{-4} солнечного полушария, при 40 днях — в 4 раза больше.” Это правило и его точное выражение важно как для физики Солнца, так и в свете аналогий солнечной и звездной активности (см., например, Холл, Хенри, 1994; Бердюгина, 2005; Брэдшоу, Хартиган, 2014).

Цель нашей работы — количественное уточнение правила (1) на материале, охватывающем, в отличие от использованного Гневышевым (23 года), около 140 лет, и для бóльших времен жизни групп (у Гневышева — чуть более 40 дней, у нас — до 90). На графике Гневышева (1938) всего девять точек, которые, вероятно, получены усреднением. Мы также уделим внимание виду усреднения. В частности, будет показано, что для усреднения площадей пятен правильнее использовать логарифмическое среднее.

БАЗЫ ДАННЫХ

Самая продолжительная база данных площадей групп солнечных пятен — база Королевской Гринвичской обсерватории RGO за 1874–1976 гг. Другая продолжительная база данных этого параметра — база Кисловодской горной астрономической станции Пулковской обсерватории KMAS: 1954–2018 гг. Системы измерений площадей у RGO и KMAS весьма близки, как показано в работах Бальмачеда и др. (2005), Муноса-Харамиджо и др. (2015), Наговицына и др. (2016). Композитные ряды площадей групп пятен с 1874 г. по наше время (Мунос-Харамиджо и др., 2015; Наговицын, Певцов, 2016) составляли из RGO (до 1976 г.) и KMAS (начиная с 1977 г.). Таким образом, продолжительность суммарного ряда составила более 140 лет, в него вошло около 230 000 отдельных

*Электронный адрес: nag@gao.spb.ru

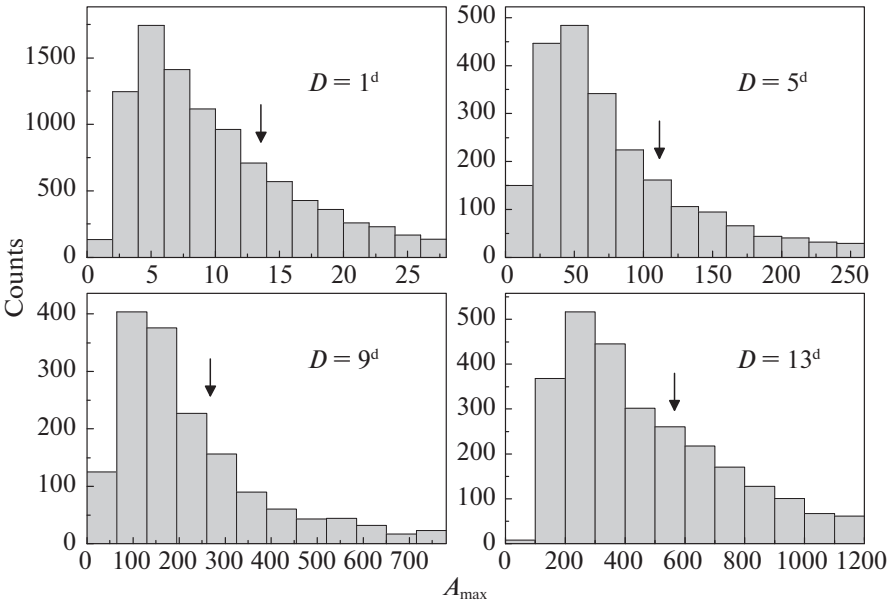

Рис. 1. Гистограммы встречаемости значений площадей групп пятен, наблюденных в течение 1, 5, 9 и 13 дней. Стрелки — среднеарифметические значения.

наблюдений групп пятен. В дальнейшем у нас в статистике для каждой группы будет присутствовать только ее максимальная площадь $A_{\max}$ за все время пребывания на видимом диске Солнца, измеряемая в миллионных долях полусферы. Таких значений в нашем распоряжении оказалось 41 800.

УСРЕДНЕНИЕ ДАННЫХ

Рассмотрим группы, которые наблюдались в течение одного оборота Солнца.

На рис. 1 представлены гистограммы встречаемости значений площадей групп пятен, наблюденных в течение $D = 1$, 5, 9 и 13 дней. Стрелками показаны среднеарифметические значения (математические ожидания) для всех четырех выборок. Видно, что среднеарифметические в $\sim$2.5 раза превышают наиболее часто встречающиеся значения (моды) для всех гистограмм. Таким образом, среднеарифметическое не является представительным параметром статистического измерения площади группы.

Проверим соотношение моды и математического ожидания для логарифмов (здесь и далее — десятичных) площадей групп пятен (рис. 2).

Видно, что с точностью до одного бина моды и математические ожидания совпадают для $D = 1{-}3$ дней. Таким образом, при вычислении определяющих характеристик площадей групп пятен правильнее использовать логарифмическое среднее. Этот вывод подтверждает рис. 3. Для площадей групп доверительные интервалы среднеквадратических отклонений растут со временем наблюдения и до $D = 7$ дней включительно захватывают отрицательные значения. Логарифмы площадей для разных D имеют практически одинаковые доверительные интервалы, составляющие в среднем $0.356 \pm 0.034\,\lg(A_{\max}, \mathrm{mvh})$.

ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ГРУПП

Перейдем к временам жизни групп. Непосредственно из каталога можно получить только число последовательных наблюдений группы D; нужно корректно перейти к наивероятному времени ее жизни LT.

Вычисления показали, что интервалы между наблюдениями групп распределены нормально со средним значением $1.00^d \pm 0.18^d$ для гринвичского каталога и $1.01^d \pm 0.15^d$ — для кисловодского.

Таким образом, наблюдения проводятся в среднем 1 раз в сутки, и группа, которая наблюдается на Солнце в данный день, но не наблюдалась в прошлый, возникла в один из моментов прошедших суток, в среднем 0.5^d суток назад. Аналогично, группа, наблюдавшаяся сегодня, но исчезнувшая на следующий день, просуществовала в среднем 0.5^d после последнего наблюдения, поэтому далее будем считать, что время жизни группы LT в среднем равно числу дней ее наблюдения D.

РЕКУРРЕНТНЫЕ ГРУППЫ: ПРИНЦИПЫ ВЫЯВЛЕНИЯ

Для расширения исследуемого диапазона времен жизни в правиле Гневышева–Вальдмайера

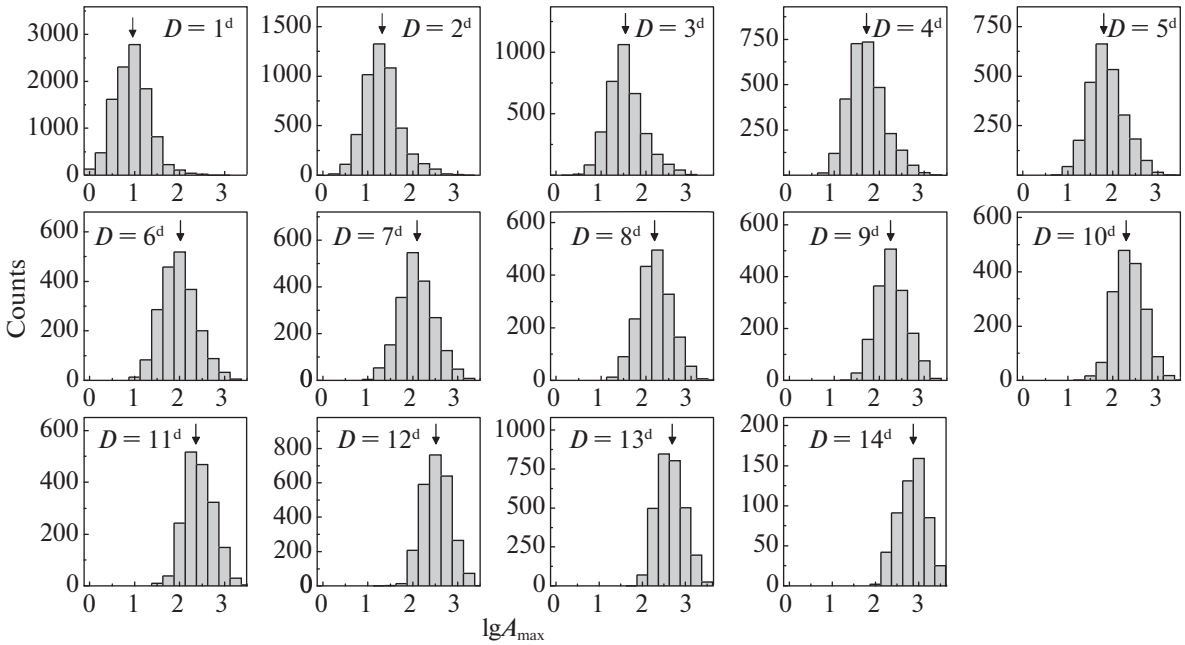

Рис. 2. Распределения логарифмов площадей групп пятен для разных времен наблюдения D. Стрелки — среднелогарифмические значения.

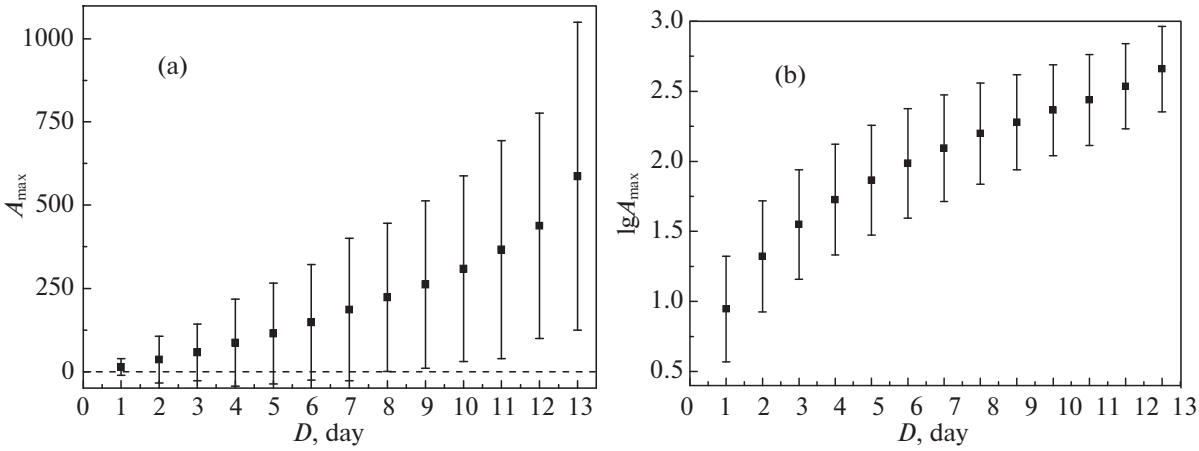

Рис. 3. Изменения математического ожидания и среднего квадратического отклонения у однооборотных групп с разным временем наблюдения D: (a) — максимальные площади групп, (b) — логарифм максимальных площадей групп.

следует выделить из каталога рекуррентные группы пятен, т.е. группы, живущие в течение двух и более оборотов.

В каталогах принято объединять под одним номером лишь наблюдения группы, сделанные в пределах одного прохождения этой группы по видимому диску Солнца, в следующем обороте данной рекуррентной группе присваивается новый номер. Перед нами стояла задача объединить группы данного каталога с разными номерами в рекуррентные группы.

Для решения этой задачи нужно, прежде всего, отличать группы, вышедшие из-за восточного лимба или зашедшие за западный, от тех групп, которые реально возникли или исчезли на видимой стороне Солнца. Имея в виду разницу во времени между последовательными наблюдениями групп в каталогах, примерно равную 1 сут (см. выше), введем следующий критерий различия: будем считать, что у группы, вышедшей из-за восточного лимба, первое наблюдение отстоит от этого лимба по долготе не более чем на $\Delta\lambda = 360°/T_C = 13.2°$, где $T_C = 27.2753^d$ — кэррингтоновский период вращения, а у возникшей на видимой стороне эта разница больше. Аналогичным образом будем различать группы, зашедшие за западный лимб и исчезнувшие на видимой стороне.

Наш метод выделения рекуррентных групп со-

стоит из двух этапов. Вначале в каталоге ищут пары групп с номерами (n_i, n_j), первая из которых зашла за западный край Солнца (согласно описанному выше критерию), а вторая — вышла в следующем обороте Солнца из-за восточного.

Дополнительно необходимо, чтобы координаты последнего наблюдения группы n_i и первого наблюдения группы n_j были близки друг к другу. Для определения критерия близости для каждой группы гринвичского каталога со временем жизни >12 сут вычислили среднеквадратичные значения вариаций координат при прохождении по диску Солнца. Средние по всем таким группам значения этих величин равны $\sigma_\phi = 0.95°$ и $\sigma_\lambda = 6.02°$ для широты и кэррингтоновской долготы соответственно. Координаты наблюдений группы будем считать близкими, если широты отличаются не более чем на $2\sigma_\phi = 1.9°$, а долготы — не более чем на $2\sigma_\lambda = 12.04°$. В случае, если кандидатов на роль группы n_j несколько, выбирают группы, координаты первого наблюдения которых ближе всего к последним координатам группы n_i.

Очевидно, что каждая из полученных таким образом пар групп (n_i, n_j) с большой вероятностью соответствует двум последовательным прохождениям рекуррентной группы по диску.

На втором этапе мы объединяем полученные пары в цепочки (n_1, n_2) — (n_2, n_3) — ... — (n_{N-1}, n_N) такие, что первая группа n_1 возникала на видимой стороне Солнца, последняя n_N — исчезала на ней, а промежуточные группы $n_2, ..., n_{N-1}$ восходили из-за восточного лимба и заходили за западный. Таким образом, цепочка из $N-1$ пар соответствует рекуррентной группе, жившей N солнечных оборотов и имевшей в этих оборотах номера $n_1, n_2, ..., n_N$. В частности, "вырожденные" цепочки, состоящие из одной пары, задают двухоборотные рекуррентные группы.

Так как мы не можем наблюдать группы на обратной стороне Солнца, то предложенный метод (как, впрочем, и любой другой) может давать ошибки, объединяя в одну рекуррентную группу несколько независимых однооборотных или, напротив, пропускать некоторые рекуррентные группы. Однако мы считаем, что его точность достаточна для проведения статистических исследований (см. далее).

Описанным способом мы выделили из каталога 578 рекуррентных групп с временами жизни от 2 до 4 оборотов. Примеры усредненных профилей эволюции площадей групп для разных LT представлены на рис. 4.

ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА

Зависимость максимальных площадей групп от их времени жизни представлена на рис. 5а. На этом рисунке каждая точка получена логарифмическим усреднением максимальных значений площадей групп, время жизни которых принадлежит данному диапазону (бину). Для однооборотных групп ширина бина $1^{\rm d}$, для рекуррентных — $4^{\rm d}$.

При этом мы сразу исключили из статистики однооборотные группы с $LT > 12^{\rm d}$, так как их общее число невелико.

Простая линейная регрессия по полученным точкам дает при потенцировании зависимость $A_{\rm max} = (11.5 \pm 2.6)LT^{1.04\pm0.07}$ (пунктирная линия на рис. 5а). Видно, что уже на уровне 1σ показатель при LT не противоречит правилу Гневышева–Вальдмайера, поэтому нет причин отказываться от линейной формы зависимости $A_{\rm max}$ от LT (1). Однако при этом переходный коэффициент оказывается почти на 3σ больше, чем полученный Гневышевым: $A_{\rm max} = (13.0 \pm 1.1)LT$ (сплошная линия на рис. 5а). Видно, что это отклонение вызвано группами с временами жизни более недели и линейная регрессия, проведенная по точкам с $LT \leq 7^{\rm d}$, $A_{\rm max} = (10.3 \pm 0.5)LT$, оказывается близкой к результату Гневышева (точечный пунктир на рис. 5а).

СИНТЕТИЧЕСКИЙ РЯД ДАННЫХ: СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Для исследования систематических ошибок метода мы также построили синтетический ряд, сгенерировав времена наблюдений, координаты и площади групп, используя следующие предположения, основанные на свойствах реального ряда наблюдений:

1) каждая группа пятен вращается со скоростью, соответствующей синодическому периоду $T_{\rm C}$, и, таким образом, ее широта и кэррингтоновская долгота не меняются;

2) максимальная площадь группы связана с ее временем жизни, найденным выше соотношением $A_{\rm max} = 13.0LT$;

3) эволюция площади группы описывается соотношением $A(T) = A_{\rm max}4T/LT(1 - T/LT)$, где $T = 0$ соответствует моменту ее рождения, и максимум площади, таким образом, приходится на момент $T = LT/2$. Максимум площади для групп реального ряда, как правило, смещен к моменту рождения группы, однако, как показали численные эксперименты, усложнение формы профиля $A(T)$ почти не влияет на результаты;

4) времена жизни групп распределены по экспоненциальному закону с плотностью распределения

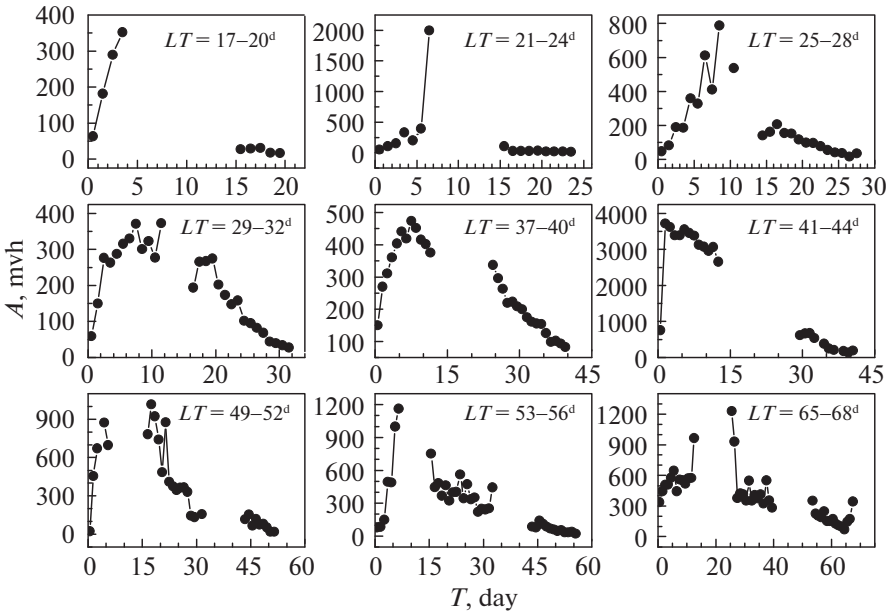

Рис. 4. Логарифмически усредненные профили зависимостей площадей рекуррентных групп A (в миллионных долях полусферы) от времени T (в днях) для различных диапазонов времен жизни LT (выборочно). Из профилей исключены наблюдения, близкие к лимбу, т.е. с расстоянием от центрального меридиана больше $90^\circ - 360^\circ/T_{\rm C} = 76.8^\circ$.

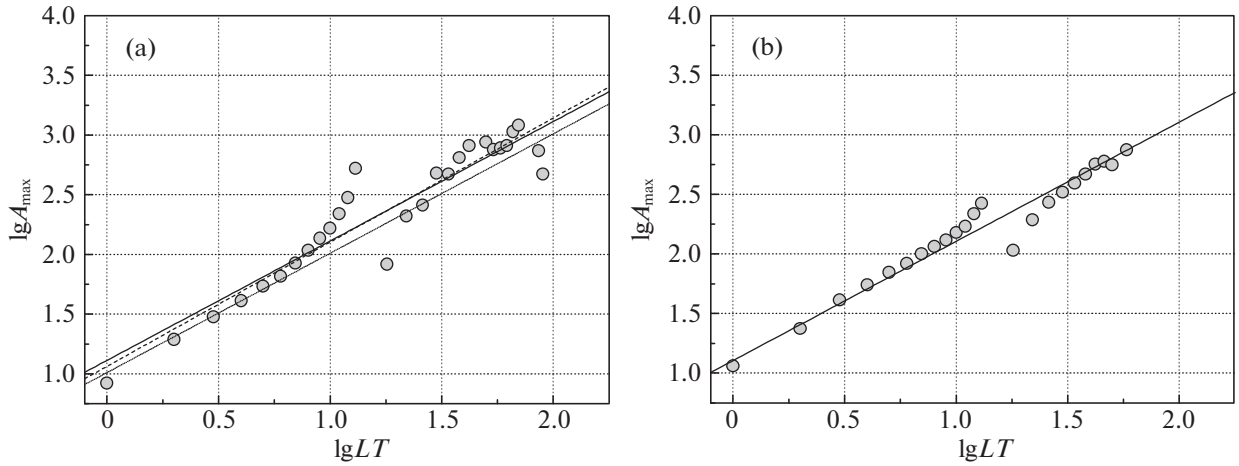

Рис. 5. (a) — Наблюдаемая зависимость максимальной площади группы $A_{\max}$ от ее среднего времени жизни LT в логарифмическом масштабе; (b) — то же, но для синтетического ряда. Сплошные линии — линейная зависимость для всего интервала LT, точечный пунктир — то же для $LT \le 7^{\rm d}$, пунктир — степенная зависимость.

$b\exp(-bLT)$, где $b = 0.137$ сут$^{-1}$, что примерно соответствует распределению времен жизни групп реального ряда в диапазоне $2^{\rm d} \le LT \le 12^{\rm d}$;

5) интервалы между наблюдениями групп распределены нормально со средним значением $1^{\rm d}$ и дисперсией $0.18^{\rm d}$, что соответствует полученным выше характеристикам гринвичского каталога.

При этих предположениях был сгенерирован ряд из 100 000 наблюдений для 19 620 групп, и к нему были применены те же методы, что и к реальному ряду. Соответствующая зависимость приведена на рис. 5b, а линейная регрессия имеет вид $A_{\max} = (12.8 \pm 0.7)LT$. Видно, что наш метод воспроизводит заложенное при генерации ряда соотношение между максимальной площадью и временем жизни группы. При этом отклонения от полученной линейной регрессии имеют тот же характерный вид, что для реального ряда на рис. 5a: вблизи значения LT, примерно равного половине солнечного оборота, точки слева лежат выше прямой, а справа — ниже.

Первое отклонение, по-видимому, вызвано тем, что некоторые рекуррентные группы применен-

ный метод ошибочно относит к однооборотным, что завышает среднюю площадь групп в соответствующем интервале времен жизни. Второе отклонение вызвано тем, что некоторые из рекуррентных групп с временами жизни больше половины оборота достигают максимальной площади на обратной стороне Солнца, и средняя площадь в соответствующих интервалах занижена. Если при построении регрессий не использовать точки с $12^{\mathrm{d}} \leq LT \leq 22^{\mathrm{d}}$, соответствующие наибольшим систематическим ошибкам, получаем зависимость $A_{\max} = (13.0 \pm 0.4)LT$, что еще ближе к связи, заложенной в синтетический ряд.

Для реального ряда, при исключении того же диапазона LT, имеем $A_{\max} = (12.7 \pm 0.8)LT$, что хорошо согласуется с регрессиями, полученными для полного набора точек.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты работы сводятся к следующему. Правило Гневышева–Вальдмайера верифицировано на промежутке ~140 лет, в шесть раз превосходящем использованный М.Н. Гневышевым (1938). Диапазон изучаемых времен жизни рекуррентных групп расширен с 40 до почти 90 дней. Показано, что при определении средних площадей групп пятен следует использовать логарифмическое среднее. Подтверждена линейная форма правила Гневышева–Вальдмайера. Показано, что более точное выражение этого закона $A_{\max} = (13.0 \pm \pm 1.1)LT$. Таким образом, коэффициент перехода от времен жизни к максимальным площадям групп пятен оказывается приблизительно на 30% больше, чем у Гневышева (1938).

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-02-00088), Госзадания и программы РАН № 12. Авторы благодарят рецензента за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальмачеда и др. (L.A. Balmaceda, S.K. Solanki, and N. Krivova), Mem. Soc. Astron. Italiana **76**, 929 (2005).
2. Бердюгина (S.V. Berdyugina), Living Rev. Solar Phys. **2**, 8 (2005).
3. Брэдшоу, Хартиган (S.J. Bradshaw and P. Hartigan), Astrophys. J. **795**, 79 (2014).
4. Вальдмайер М., *Результаты и проблемы исследования Солнца* (М.: Иностранная литература, 1950) [M. Waldmeier, *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung* (Leipzig, Becker & Erler kom.-ges., 1941)].
5. Гневышев (M.N. Gnevyshev), Pulkovo Observ. Circ. **27**, 37 (1938).
6. Мунос-Харамиджо и др. (A. Muñoz-Jaramillo, et al), Astrophys. J. **804**, 12 (2015).
7. Наговицын Ю.А., Тлатов А.Г., Наговицына Е.Ю. Астрон. журн. **93**, 819 (2016) [Yu.A. Nagovitsyn, A.G. Tlatov, E.Yu. Nagovitsyna, Astron. Rep. **60**, 831 (2016)].
8. Наговицын, Певцов (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), Astrophys. J. **833**, 6 (2016).
9. Холл, Хенри (D.S. Hall and G.W. Henry), IAPPP Communicat. **55**, 51 (1994).