

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЧИСЛА ПОР В ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ НА РЕКОНСТРУКЦИЮ ИНДЕКСА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

© 2022 г. К. А. Тлатова<sup>1, 2, \*</sup>, В. В. Васильева<sup>1</sup>, И. А. Березин<sup>1</sup>,  
Е. А. Илларионов<sup>3, 2</sup>, А. Г. Тлатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: k.tlatova@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 17.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

В данной работе мы выполнили анализ относительного числа групп в циклах 21–24 на основе оцифровки наблюдений пятен обсерватории Локарно (Locarno, Швейцария). В Цюрихской классификации групп солнечных пятен присутствуют классы от А до J. Классы соответствуют процессу развития и распада групп солнечных пятен. Группы класса А и В соответствуют одиночным порам или их небольшому скоплению (класс А) и биполярной группе (класс В). Для реконструкции солнечных индексов большое значение имеет относительное число групп (А + В). Мы нашли значительные вариации относительного числа пятен групп (А + В) в циклах активности. Если в минимумах активности относительное число групп (А + В) составляет 45–50%, то в максимумах цикла активности наблюдается уменьшение до 25–30%. В первоначальном индексе пятен  $R$ , предложенном R. Wolf, поры не учитывались, а множество ядер, объединенных одной полутенью, считались как одно пятно. После 1893 г. по предложению A. Wolfег методика подсчета индекса солнечных пятен изменилась. Стали учитываться поры и все отдельные ядра в пятнах – этот индекс обозначается  $R_z$ . Считается, что между индексами пятен Wolf ( $R$ ) и Wolfег ( $R_z$ ) существует постоянный коэффициент перехода, близкий к  $R/R_z = 0.6$ . Мы обнаружили, что это предположение неверно, а  $R/R_z$  зависит от амплитуды цикла активности, меняясь для цикла N19  $R_{19} \sim 0.34$ , а для периода гранд минимума  $R_{MM} \sim 0.64$ .

*Ключевые слова:* Солнце, солнечные пятна, индексы солнечных пятен, поры

DOI: 10.31857/S0004629922030057

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современная эра подсчета солнечных пятен началась в середине XIX века с исследования директора Бернской обсерватории Рудольфа Вольфа, который ввел то, что он назвал “универсальным числом солнечных пятен” для оценки солнечной активности. Вольф, вдохновленный открытием Х.Х. Швабе “цикла солнечных пятен”, стремился разработать индекс, с помощью которого можно было бы отслеживать долгосрочные тенденции, проверить и изучить 10-летнюю периодичность [1].

Существует мнение, что Вольф предпочел бы измерить площади, покрытые пятнами, а не их количество [2], но методы и оборудование того времени не подходили для этой задачи [3]. В качестве альтернативы он разработал индекс, основанный на количестве пятен и групп пятен (кла-

стеры связанных пятен). Работая при 64-кратном увеличении с 8-сантиметровым рефрактором  $f/14$ , оснащенным поляризатором, и понимая, что группы связанных пятен более тесно связаны с его желаемой мерой площади, чем отдельные пятна, он решил в своем индексе взвесить группы сильнее, чем пятна. Он также решил исключить из ежедневных наблюдений маленькие пятна и поры, которые были видны только при отличных условиях видимости [4]. Окончательная форма индекса Вольфа,  $R$ , созданная в 1848 г., присваивает вес 10 каждому кластеру связанных точек ( $g$ ) и единицу каждому отдельному пятну ( $f$ ):  $R = (10g + f)$ .

После отъезда из Берна Вольф стал директором Швейцарской федеральной обсерватории в Цюрихе, где его работа была в конечном итоге передана ряду преемников, Вольферу, Брунеру,

Вальдмайеру и др. С течением времени к этой задаче были привлечены другие обсерватории, чтобы сохранить непрерывность в ежедневных подсчетах. Также за это время были внесены важные изменения в подсчет индекса, который стал называться “относительным числом солнечных пятен”. С увеличением количества наблюдателей и их рассредоточенности улучшились средние условия видимости и изменились правила подсчета Вольфа. Новое соглашение требовало, чтобы наблюдатели подсчитывали все группы и все пятна, видимые в данный день с помощью стандартной установки телескопа Вольфа [5].

Изменения в исходной формулировке правила подсчета требовали приведения значений обновленного индекса пятен к индексу Вольфа. Решение этой проблемы было найдено путем сравнения результатов, полученных Вольфером за 16 лет наблюдений, проводимых параллельно с Вольфом, и введения в индекс Вольфа коэффициента, иногда называемого  $k$ -фактором:  $k \cdot (10g + f)$ . Здесь  $f$  уже не число отдельных пятен, а число пор, т.е. малых пятен без полутени, и число ядер в отдельных пятнах. Было определено, что, если принять значение 1.0 для наблюдений Вольфа, то для наблюдений Вольфера коэффициент  $k = 0.6$  обеспечит перевод индекса примерно в один и тот же масштаб с индексом Вольфа  $R$ , таким образом, поддерживая желаемую непрерывность [6]. Это значение  $k$  называется “Цюрихским коэффициентом приведения”, а результирующий индекс обозначается  $Rz$  [7].

Учет пор и тем более групп, состоящих из пор, еще больше отдалил значения индекса пятен  $Rz$  от первоначальной цели Вольфа — создать индекс, наиболее близкий к подсчету площади солнечных пятен. Действительно, вклад групп пятен, состоящих из пор, имеет в индексе пятен практически тот же вес, что и группы, состоящие из больших солнечных пятен, хотя их площадь значительно меньше.

В 1936 г. Вальдмайер [8] представил 8-ступенчатую схему классификации групп солнечных пятен, которая учитывает магнитную полярность, вид полутени, размер, сложность и протяженность гелиографической долготы. Все группы, наблюдавшиеся в Швейцарской федеральной обсерватории в Цюрихе с 1938 г., а затем и Локарно, получали букву классификации между А и J (буква I опущена) [9]. Схема Вальдмайера по сути является эволюционной классификацией. Классификация А, В, С, ..., J представляет в этой последовательности характерные стадии, которые проходит большая группа пятен во время роста и убывания. Очень большая группа в процессе роста и распада проходит через все классы: А–В–С–D–E–F–G–H–J–А. Класс F представляет в этом случае максимальную фазу эволюции. Груп-

па среднего размера может пройти только через последовательности А–В–С–D–G–H–J–А или А–В–С–В–А. Тогда максимальную фазу эволюции представляют D и C соответственно. Небольшая группа может пройти через А–В–А или, возможно, никогда не продвинуться дальше класса А [10].

Характеристики отдельных классов солнечных пятен по схеме Вальдмайера можно описать так:

А: Одно пятно или группа пятен без полутени и без биполярной структуры.

В: Группа биполей без полутени у биполярных паттернов.

С: Биполярная точечная группа; только основные пятна окружены полутенью.

D: Биполярная группа; основные пятна окружены полутенью, но, по крайней мере, одно из основных пятен имеет простую структуру. Длина группы обычно  $< 10^\circ$ .

E: Большая биполярная группа. Оба основных пятна окружены полутенью и обычно имеют сложную структуру с несколькими небольшими пятнами между ними. Длина группы не менее  $10^\circ$ .

F: Очень большая биполярная или сложная группа пятен, размером не менее  $15^\circ$ .

G: Большая биполярная группа без маленьких пятен между двумя основными пятнами. Длина не менее  $10^\circ$ .

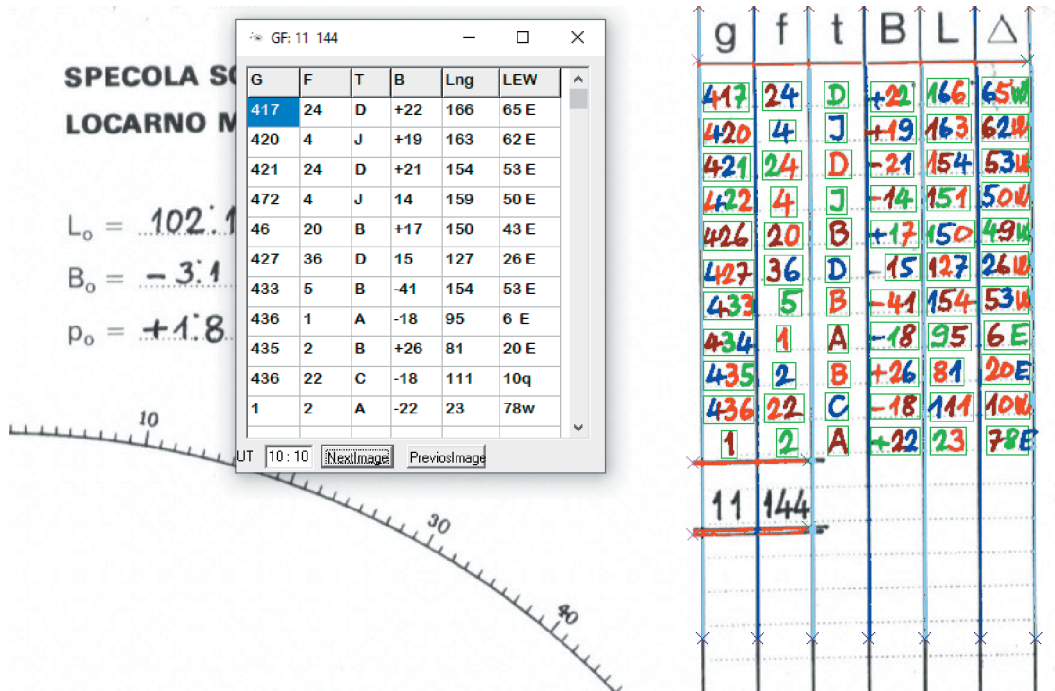
H: Униполярное пятно с полутенью; диаметр  $> 2.5^\circ$ .

J: Униполярное пятно с полутенью; диаметр  $< 2.5^\circ$ .

В данной работе мы выполнили оцифровку и провели анализ групп различных классов по данным наблюдений обсерватории Локарно за период 1981–2020 гг. В своем анализе мы уделяем особое внимание роли групп классов А и В в подсчете индекса пятен. Вольф не учитывал в индексе  $R$  малые пятна и поры. В классификации групп Вальдмайера поры относятся к группам классам А и В. Используя классификацию групп пятен, мы реконструировали индексы пятен в системе подсчета индексов Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $Rz$ ) и оценили стабильность Цюрихского коэффициента приведения  $k$  (раздел 4).

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОЦИФРОВКИ

Мы выполнили оцифровку таблиц групп пятен обсерватории Локарно (Швейцария). Эта обсерватория считается преемницей Цюрихской обсерватории. Данные представлены на сайте обсерватории <https://www.specola.ch/e/drawings.html>. Наблюдения в обсерватории Локарно, как правило, проводятся ежедневно до 12 утра с использованием рефрактора Куде–Цейсса с апертурой 15 см, который диафрагмируется до 8 см



**Рис. 1.** Пример программы с процедурой распознавания и выверки. Справа представлена таблица, на которой методами машинного обучения цветом выделены ячейки и цифры значений. В середине рисунка представлена таблица, полученная в результате машинного распознавания для сверки до корректировки оператором.

для лучшего контраста в конкретных местных условиях. Изображение Солнца диаметром 25 см проецируется на металлический экран, на котором закреплен лист чертежной бумаги. Наблюдатель карандашом зарисовывает солнечные пятна [11], далее производит разбиение на группы и классификацию групп.

Данные доступны с 1981 г. по настоящее время. На каждый день наблюдений представлены зарисовки пятен, с разбивкой на группы, и таблица характеристик групп пятен, включая номер группы (*g*), количество пятен, точнее пор и ядер (*f*), класс группы (*t*), широта (*B*), долгота (*L*,  $\Delta$ ) (до 2005 г.) (рис. 1).

При оцифровке мы использовали методы машинного обучения для распознавания букв и цифр. Использовался метод обучения CTC (Connectionist Temporal Classification), а также разномодельная нейронная сеть Random Multimodel Deep Learning (RMDL). Но значительную часть пришлось перепроверять и корректировать вручную (рис. 1).

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Всего нами были оцифрованы данные ~10 тыс. дней наблюдений и получены характеристики ~120 тыс. групп солнечных пятен. На рис. 2 представлены значения среднего числа пятен различных классов по данным обсерватории Локарно за

период 1981–2020 гг. Данные усреднены за год и нормированы на количество дней наблюдений. В 22 и 23 циклах активности вблизи эпохи максимума наибольшее число групп пятен приходилось на класс С. В 24-м цикле относительное число групп класса А выросло. Если в циклах 22 и 23 число групп класса В было больше, чем групп класса А, то в 24-м цикле число групп класса А оказалось почти в 2 раза больше, чем групп класса В. Возможно, это связано с низкой амплитудой 24-го цикла активности.

Относительная доля групп различных классов представлена на рис. 3. Доля групп классов А и В в общем числе групп составляет 17.8% и 16.7% соответственно, т.е. суммарно ~34%. В подсчете индекса солнечных пятен (рис. 3, справа) вклад групп А и В составляет ~24%. Таким образом, если бы в подсчете индекса пятен были исключены группы из пор А и В, то коэффициент перехода от индекса  $R_z$  к  $R$  составил бы  $k_{AB} \sim 0.8$ . Этот коэффициент отличается от “Цюрихского коэффициента приведения”  $k = 0.6$ . Это связано с отличием количества пятен в методике подсчета Вольфа  $R$  и индекса  $R_z$ , где учитывались все ядра в пятнах, а не отдельные пятна.

На рис. 4 представлена широтно-временная диаграмма распределения групп различных классов на диаграмме широта–время. Различные группы представлены различным цветом, но с ко-

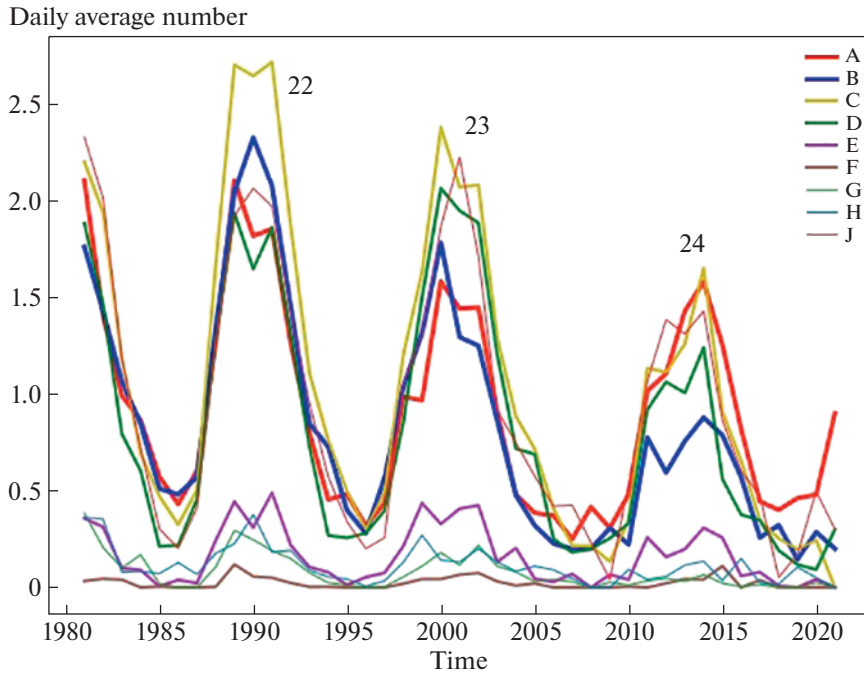


Рис. 2. Число пятен разных классов в день, усредненное за год.

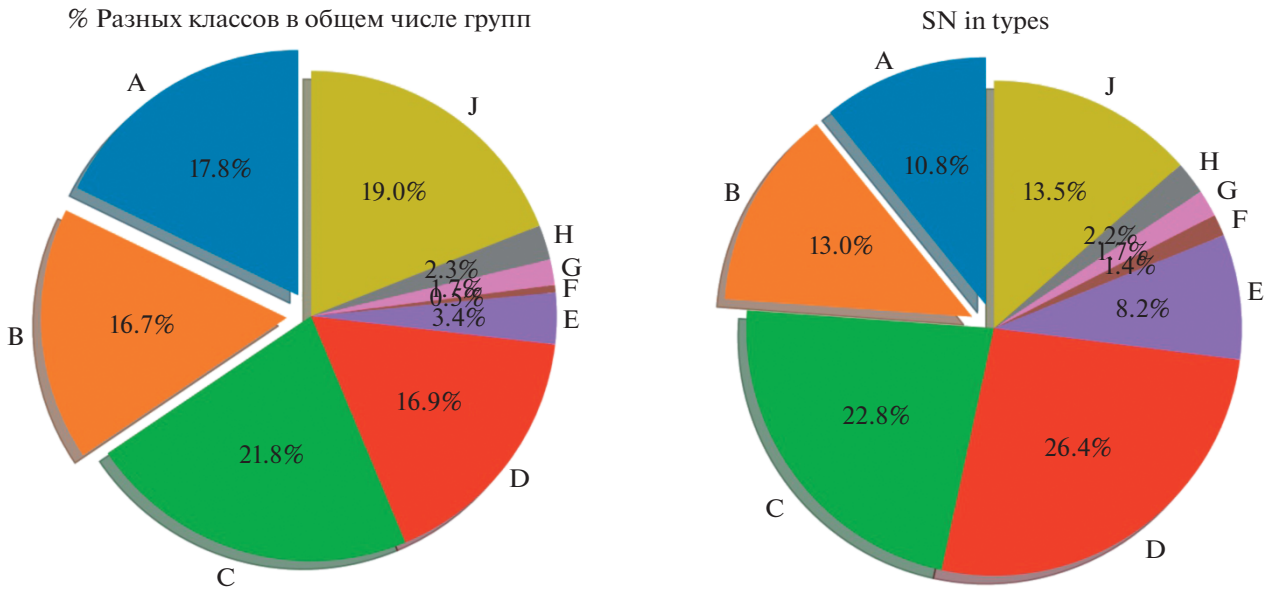
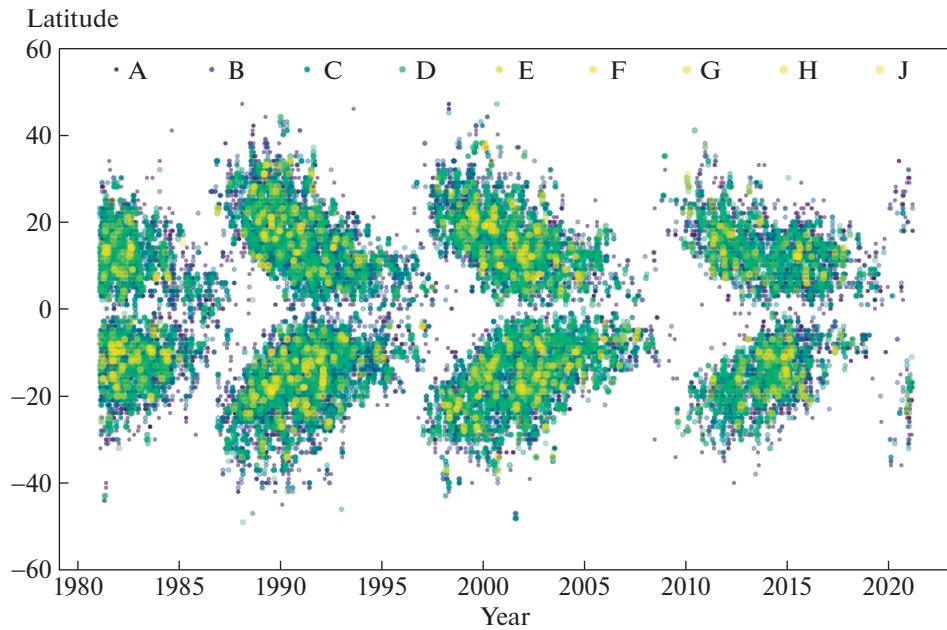


Рис. 3. (Слева) Относительная доля групп различных классов в общем числе групп. (Справа) относительная доля групп разных классов в подсчете индекса пятен SN.

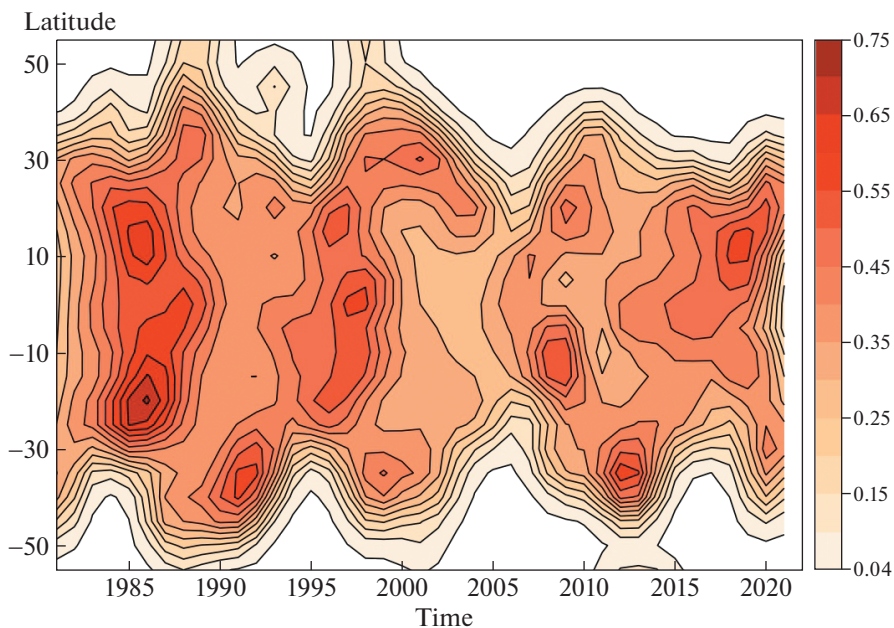
эффицентом прозрачности 0.3. Таким образом, преобладающий цвет на диаграмме соответствует не последней нарисованной группе, а совокупности многих групп на данной позиции. Можно отметить, что группы развитых классов E, F, G, представленных цветом, близким к желтому, лежат в центральных областях крыльев “бабочек”

Маундера. Группы классов A и B хорошо видны на краях крыльев.

На рис. 5 представлена широтно-временная диаграмма параметра отношения количества групп A и B к общему числу групп пятен. Этот параметр повышается до величин более ~0.6 в эпоху минимума солнечной активности и на высоких



**Рис. 4.** Распределение пятен разных классов на диаграмме широта–время. Группы различных классов выделены различным цветом.



**Рис. 5.** Распределение параметра отношения количества групп А и В к общему числу групп пятен на диаграмме широта–время.

широтах. Наибольшие значения достигались перед 22-м циклом активности.

Номер группы присваивается при появлении группы вблизи восточного лимба. При вращении Солнца мы можем отслеживать группы солнечных пятен в течение  $\sim 13$  дней. Зная номер группы, мы можем отслеживать ее продвижение по

видимой стороне диска. При этом мы можем подсчитать, сколько дней группа остается в данном классе (рис. 6). Так, для группы класса А максимум распределения приходится на 1 день жизни. Однако достаточно большое число групп класса А живут несколько дней. Для групп класса В относительно одинаковое количество групп пя-



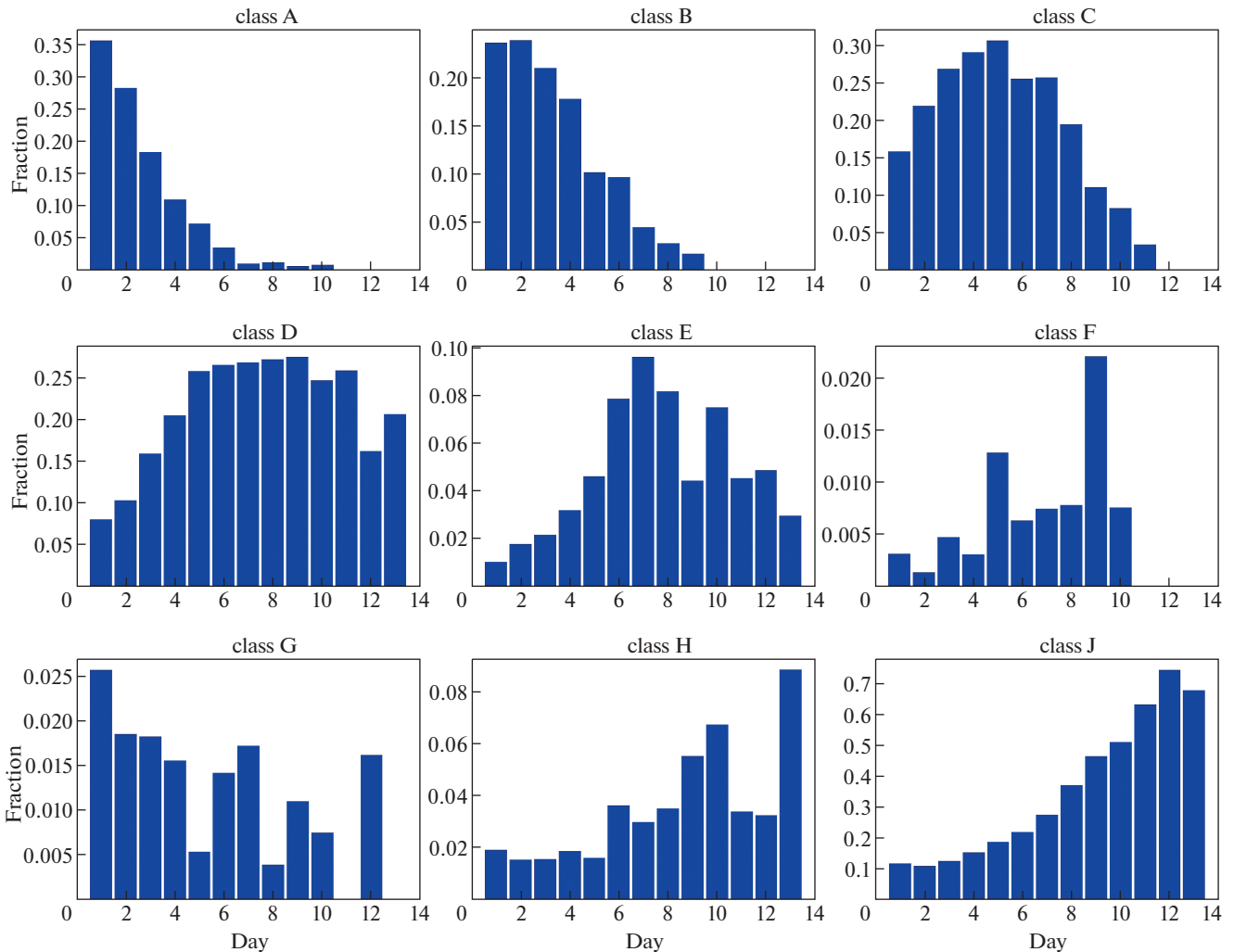


Рис. 6. Диаграммы распределения времени жизни групп различных классов от А до J.

тен живет 1 или 2 дня. Группы класса С имеют максимум распределения ~5 дней, класса Е ~7 дней.

На рис. 7 представлены изменения во времени общего числа групп в день и групп класса А + В. Несмотря на похожий характер поведения с циклами активностью, относительные амплитуды циклов пор несколько отличаются от общего хода числа групп солнечных пятен. Это хорошо видно на рис. 8. Отношение числа (А + В) к общему количеству групп пятен (all) меняется с фазой цикла активности, достигая максимума в эпоху минимума активности. Зная количество групп в разных классах и количество пятен в каждой группе, можно смоделировать индексы солнечных пятен по различным методикам подсчета. В частности, на рис. 8 представлено отношение числа по методике Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $R_z$ ).

В период 1981–2020 гг. имеется тенденция к росту этого отношения, меняющегося от величи-

ны ~0.35 до ~0.6. Таким образом, гипотеза о неизменной величине “Цюрихского коэффициентам приведения”, возможно, является неверной.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Данные о количестве групп различных классов и числа пятен в них позволяют проводить оценку индексов пятен по разным методикам. Ежедневный индекс  $R_z$  вычисляется по формуле:  $R_z = (10g + f)$ , где  $g$  – количество групп пятен классов А...J, а  $f$  – значение, взятое из таблицы ежедневных данных (рис. 1). Индекс  $R$  мы вычисляли по формуле  $R = (10g' + s)$ , где  $g'$  – количество групп пятен классов С...J, а  $s$  – количество пятен с полутенью. Для вычисления  $s$  мы приняли, что  $s = 2, 3, 4, 5, 4, 2, 1$  для классов С, D, E, F, G, H, J, соответственно. Выбор значений параметра  $s$  обладает неопределенностью, но в подсчете индекса  $R$  она не велика, поскольку основной вклад дает число групп пятен. Рассмотрим соотношение

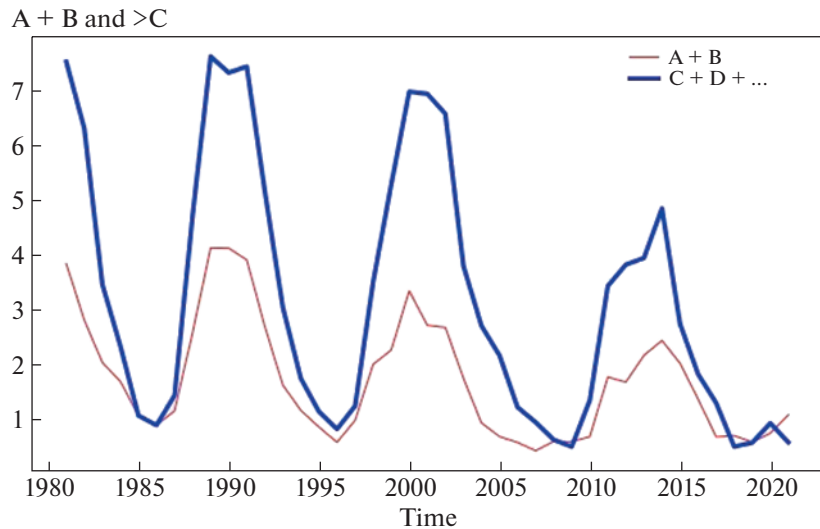


Рис. 7. Изменение среднедневного числа групп для всех классов и отдельно для групп A + B.

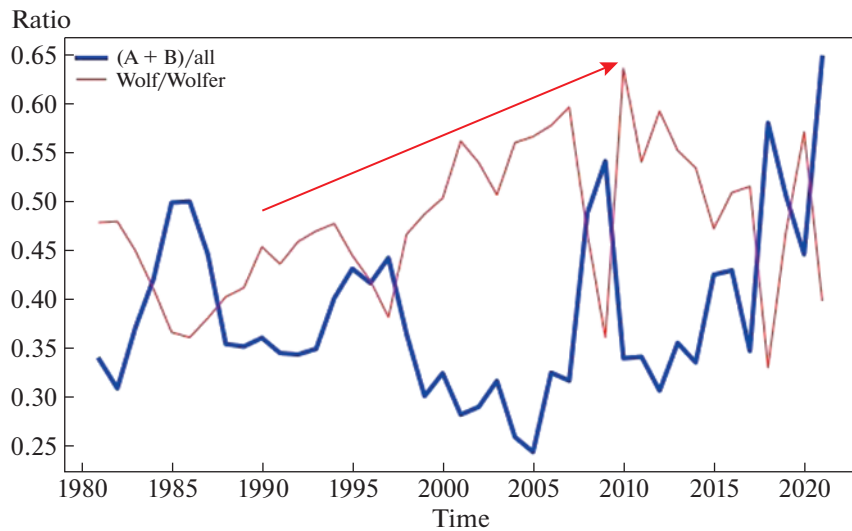
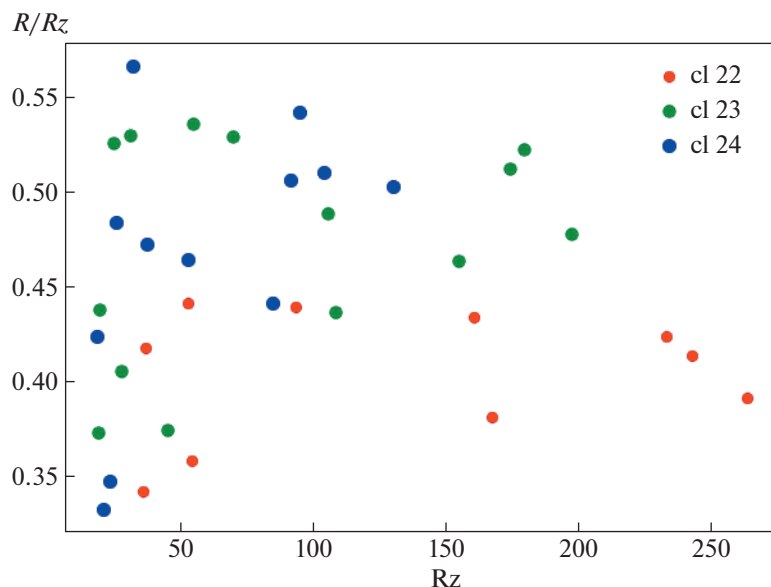


Рис. 8. Отношение числа групп (A + B) к общему числу групп и отношение индексов пятен подсчета по методике Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $Rz$ ). Стрелкой показана тенденция к росту отношения  $R/Rz$ .

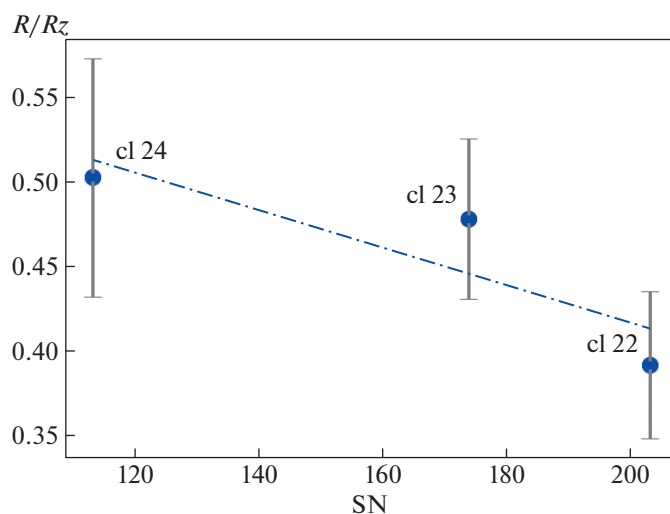
Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $Rz$ ) и международного индекса пятен  $SN$  для циклов 22, 23, 24 (рис. 9). Можно отметить, что для цикла 22 значения лежат ниже, чем для циклов 23 и 24. На рис. 9 фазам роста и спада активности могут соответствовать близкие значения индекса  $Rz$ . Если просуммировать все среднегодовые значения в каждом цикле и сопоставить с амплитудой циклов активности, то можно найти зависимость (рис. 10). Для циклов большой амплитуды соотношение  $r = R/Rz$  меньше, чем для циклов малой амплитуды. Так, для рассмотренных циклов 22, 23, 24 это соотношение в годы максимумов 1989, 2000 и 2014 г. составило  $r_{22} = 0.39 \pm 0.06$ ,  $r_{23} = 0.48 \pm 0.04$ ,  $r_{24} =$

$= 0.50 \pm 0.05$  соответственно. Зависимость отношения  $R/Rz$  в зависимости от амплитуды цикла можно записать как  $R/Rz = 0.64 \pm 0.05 - 1.1 \times 10^{-3} \pm \pm 2.7 \times 10^{-4} SN_{\max}$ , где  $SN_{\max}$  — амплитуда цикла активности по новой версии индекса пятен [6]. В этом случае для 19-го цикла это соотношение было  $r_{19} \sim 0.34 \pm 0.025$ , в эпоху Маундера —  $\sim 0.64 \pm \pm 0.025$ .

Ранее в работе [12] было высказано предположение, что поправочные коэффициенты для разных наблюдателей, основанные на линейной пропорциональности, могут приводить к серьезным искажениям данных. Но в нашей работе мы оперировали данными только одной, современ-



**Рис. 9.** Связь между отношением подсчетов индекса по методикам Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $Rz$ ) и индекса пятен  $Rz$ . Значения усреднены по годам.



**Рис. 10.** Связь между отношением подсчетов индекса по методикам Вольфа ( $R$ ) и Вольфера ( $Rz$ ) и международного индекса пятен  $SN$  в годы максимумов активности циклов 22, 23, 24.

ной обсерватории. Мы нашли, что и в этом случае коэффициент приведения изменяется от цикла к циклу. Можно предположить, что изменчивость коэффициента приведения  $k$  связана не только с субъективными особенностями наблюдателей, но имеет физическую природу.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы выполнили анализ групп пятен различных классов по “цюрихской” классификации, по данным наблюдений обсервато-

рии Локарно за период 1981–2020 гг. В общем числе групп наибольшую долю составляют группы класса С (~22%) и J (~19%). В подсчете индекса пятен по формуле  $SN = (10g + f)$  наибольшую долю имеют группы классов D (~26%) и C (~23%).

Особое внимание мы уделили группам классов А и В, группам, состоящим из пор. Доля групп классов А + В составляет 34% в общем числе групп, 17.8 и 16.7% соответственно. В подсчете индекса солнечных пятен (рис. 3) вклад групп А и В составляет только ~24%. Разница обусловлена



относительно малым количеством пятен в группах этих классов.

Было обнаружено, что вклад групп А и В в подсчет индекса пятен меняется от фазы цикла активности (рис. 8) и от амплитуды цикла активности (рис. 10). По схеме Вольфа ( $R$ ) группы и поры не подсчитываются. Также не подсчитываются и ядра солнечных пятен, а считаются только регулярные пятна. В схеме подсчета Вольфера ( $R_z$ ) учитываются поры и все ядра. Эта схема принята различными обсерваториями и в настоящее время. Заметим, что в схеме подсчета обсерватории Локарно также применяется весовой коэффициент для пятен, но для нашего анализа это не так существенно. Нами было установлено, что для циклов большой амплитуды соотношение  $r = R/R_z$  зависит от амплитуды цикла активности. Для циклов 22–24 это отношение менялось от 0.39 до 0.5. Если предположить линейный характер зависимости отношения от амплитуды цикла активности, то экстраполяция позволяет оценить это соотношение для цикла 19  $r_{19} \sim 0.34$ , а для периода гранд-минимума —  $r_{\text{ММ}} \sim 0.64$ .

Такое изменение отношения значительно осложняет процедуру реконструкции индексов солнечных пятен в эпоху до начала регулярных наблюдений. Действительно, при реконструкции нового индекса солнечных пятен SN [6] и индекса групп солнечных пятен [13] считалось, что переход от системы подсчета с учетом и без учета пор коэффициент является постоянным. Также считался постоянным коэффициент при переходе от одного наблюдателя к другому. Вместе с тем наш анализ показал, что это не так, а коэффициенты перехода зависят от фазы солнечного цикла и от амплитуды циклов активности.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 21-72-20067 (К.Т. и Е.И.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. J. Bray and R. E. Loughhead, Sunspots* (John Wiley and Sons, New York, 1964).
2. *M. Waldmeier, The Sunspot-Activity in the Years 1610–1960* (Zurich Schulthess & Co. AG 1961).
3. *C. M. Chernan, The Handbook of Solar Flare Monitoring and Propagation Forecasting* (Tab Books, Summit, PA, 1978).
4. *C. E. Feehrer, Dances with Wolf's: A Short History of Sunspot Indices* (<http://www.aavso.org/dances-wolfs-short-history-sunspot-indices>, August 2000).
5. *D. Berghmans, R. A. M. van der Linden, P. Vanlommel, F. Clette, and E. Robbrecht, Beitrage zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik, Volume VII, No. 1, 288* (2006).
6. *F. Clette, L. Svalgaard, J. M. Vaquero, and E. W. Cliver, Space Sci. Rev.* **186**, 35 (2014).
7. *H. Coffey, C. D. Hanchett, and E. H. Erwin, J. Amer. Assoc. Var. Star Obs.* **27**, 55 (1999).
8. *M. Waldmeier, I. Zeitschrift fur Astrophysik.* **6**, 276, (1938).
9. *J. Kleczek, Bull. Astr. Inst. Czech.* **4**, 9 (1953).
10. *K. O. Kiepenheuer, in The Sun, ed. G. P. Kuiper* (Chicago Univ. Press., 1953), p. 344.
11. *S. Cortesi, M. Cagnotti, M. Bianda, R. Ramelli, and A. Manna, Solar Phys.* **291**, 3075 (2016).
12. *I. G. Usoskin, G. A. Kovaltsov, M. Lockwood, K. Mursula, M. Owens, and S. K. Solanki, Solar Phys.* **291**, 2685 (2016).
13. *L. Svalgaard and K. H. Schatten, Solar Phys.* **291**, 2653 (2016).