

УДК 523.98

В. Г. Банин, С. А. Язев

Площадки длительной активности на нисходящей ветви солнечного цикла № 21

Предложен способ описания пятенной активности Солнца с помощью характеристик площадок длительной активности (ПДА). Основная цель введения нового индекса активности — попытка выделить составляющую фотосферной активности, наиболее тесно связанную с крупными протонными вспышками. Приведены методика идентификации ПДА, процедура оценки соответствующих индексов, выполнено сопоставление их с числами Вольфа и частотами одного из классов протонных событий. Показано, что на нисходящей ветви цикла № 21 развитие ПДА имело четко выраженный прерывистый характер, свидетельствующий о глобальных перестройках магнитных полей на Солнце с «периодом» примерно 20 солнечных оборотов. Обсуждается связь сильных геоэффективных протонных вспышек с особенностями пространственно-временного распределения ПДА.

AREAS OF LONG-LIVED ACTIVITY ON THE DECLINING BRANCH OF SOLAR CYCLE 21, by Banin V. G., Yazev S. A.— A method to describe the spot activity of the Sun using characteristics of areas of long-lived activity (ALAs) is suggested. The primary goal of introducing the new index of activity is an attempt to single out the component of photospheric activity which is most closely related to large proton flares. A technique to identify the ALAs and procedure to estimate relevant indices are given; these are compared with Wolf numbers and frequencies of one class of proton events. It has been shown that on the declining branch of cycle 21 the ALAs evolved in a well-defined intermittent fashion, thus indicating global rearrangements of magnetic fields on the Sun with a «period» of ~ 20 solar rotations. The relationship of highly geoeffective proton flares with peculiarities of the spatial-temporal distribution of ALAs is discussed.

В настоящей работе обсуждаются характеристики пространственно-временного распределения площадок длительной активности (ПДА) на нисходящей ветви цикла № 21 солнечной активности и их связь со вспышками.

Хорошо известно, что вспышки и другие виды солнечной активности тесно связаны с группами пятен — активными областями (АО). С другой стороны, группы пятен обычно представляются как самостоятельные первичные компоненты солнечной активности. Соответственно широкое распространение получила точка зрения на активные процессы как на результат внутренних преобразований в квазизамкнутой системе АО. Вместе с тем имеются достаточно уверенные свидетельства, что не все события укладываются в эту схему, зачастую явно необходим учет «внешних» факторов. Например, крупные вспышки, особенно протонные, чаще появляются в определенных классах групп пятен (E, F, H), однако продуктивность последних (количество протонных вспышек N за одни сутки) на нисходящей ветви цикла на 50 % выше, чем на восходящей [11]. Другими словами, идентичные группы пятен на разных фазах цикла оказываются неодинаковыми по N . Это означает, что характеристики группы пятен (тип, размер и т. д.) еще не в полной мере определяют ее вспышечный потенциал. Влияние оказывают и «посторонние» факторы (в данном случае — фаза цикла). В качестве других внешних факторов, воздействующих на вспышечную деятельность АО, можно назвать наличие «спутников» (групп пятен, обычно более мелких), расположенных вблизи основной группы [12], нахождение АО в «стержневых точках» (*pivot-points*) [15]. Наиболее ярким примером в этом отношении являются комплексы активности (КА). В современной трактовке КА представляет собой единую физическую систему тесно взаимодействующих АО. Крупные (балла 2 и более) вспышки сосредотачиваются преимущественно в ядрах КА на определенной фазе их развития [3] и, как удается непосредственно проследить, связаны с возмущениями всего КА или его крупномасштабных частей [1].

Отмеченные факты дают вполне определенные основания для пересмотра подходов к изучению связи крупных вспышек с группами пятен. При этом принципиальным

моментом должен стать отказ от взгляда на АО как на полностью самостоятельные объекты. На практике это связано с оценкой принадлежности конкретной группы пятен к структурным организациям солнечной активности более высокого порядка или, иными словами, с оценкой связи с другими АО.

Как уже отмечалось, мы рассмотрим ПДА. Этим термином обозначаем фиксированную площадку на каррингтоновской координатной сетке, в границах которой на протяжении трех (и более) оборотов подряд наблюдаются группы пятен. Учитывается лишь факт наличия пятен (тип группы не учитывается) и для численных характеристик — приближенно площадь. Наличие или отсутствие пятен устанавливается по синоптическим картам, т. е. во время прохождения площадкой области центрального меридиана. По определению ПДА имеют ту же угловую скорость, что и каррингтоновская координатная сетка. В этом смысле речь идет об их твердотельном, жестком вращении. Необходимо отметить, что длительное существование и твердотельный характер вращения — достаточно типичные характеристики мощных очагов пятнообразования, особенно на фазах спада солнечных циклов [5].

Процедура идентификации ПДА, на первый взгляд, может показаться слишком формальной, поскольку она не предусматривает каких-либо оценок взаимосвязи групп. Не исключено попадание в число ПДА случайных появлений независимых групп пятен на одном и том же месте. Однако высокая степень упорядоченности полученного общего распределения ПДА — часто встречающиеся длительные (шесть — восемь оборотов и более) цепочки, циклические возобновления активности на фиксированных участках и т. п. — убеждает, что вероятность идентификации случайных ПДА мала. В большинстве случаев уверенно можно считать ПДА зонами, в которых группы пятен связаны между собой общностью источника возбуждения активности. Кроме того, ряд ПДА (за первую половину 1981 г.) подвергнут детальному анализу. Оказалось, что выбранные ПДА совпадают с ядрами КА, где связь между группами пятен (АО) не вызывает сомнений (подтверждается на основе анализа H_{α} -изображений [1]). Эти доводы убеждают, что в представлении активности с помощью ПДА фактически учитывается связь между АО.

Процедура выделения ПДА сводилась к следующему. По картам солнечной активности, публикуемым в бюллетене «Солнечные данные», строились синоптические карты для групп пятен (изображения групп на центральном меридиане переносились на каррингтоновскую координатную сетку). Это — исходный материал, с помощью которого отыскивались места, где пятна наблюдались в течение трех (или более) оборотов подряд. В соответствии с принятым критерием они зачислялись в разряд ПДА. Площадки для всех случаев выбраны одинаковыми ($20 \times 20^\circ$) — порядка масштаба больших групп пятен и ядер комплексов активности. Следует отметить, что достаточно часто на протяжении одного-двух оборотов группы пятен могут наблюдаться и вблизи ПДА, составляя с ними как бы единое целое. Те из них, которые располагались не далее 10° от границ площадки, учитывались как составные части ПДА, но отдельно. Центр площадки выбирался в «центре тяжести» групп пятен на фазе их наиболее полного развития. Площадь пятен оценивалась глазомерно по зарисовкам в шкале 1, 2, 3 (малая, умеренная и большая соответственно).

Для описания активности ПДА вводим индекс $p^k_{i,j}$, где i — номер оборота, j — каррингтоновская долгота центра ПДА, k — указатель полушария (N, S или N+S). Величина p — это, по сути, балл площади пятен (степень запятненности) в данной ПДА.

В основном будем пользоваться величинами $p^k_i = \sum_{j=1}^m p^k_{i,j}$ — «мощность» активности ПДА в данном обороте, $D^k_j = \sum_{i=1}^n p^k_{i,j}$ — «плотность» ПДА на данной долготе за рассматриваемый интервал времени. По мере необходимости можно вводить различные модификации индексов.

Нетрудно заметить, что индексы ПДА в общем случае тесно связаны с известным индексом W (числом Вольфа). Действительно, это степень запятненности участка или всего диска Солнца, но в одном случае учитываются все пятна, а в другом — лишь часть их. Естественно, что индексы ПДА коррелированы и с мощностным индексом пят-

нообразования — площадью пятен. Однако, по сути, индексы ПДА обладают качественно новой особенностью. Как отмечалось, они описывают активность более высоких уровней организации солнечной активности по сравнению с отдельными АО.

Исследуемый период (январь 1980 — июль 1986 г., соответственно обороты 1690—1777) полностью охватывает нисходящую ветвь цикла № 21 солнечной активности: максимум цикла приходится на декабрь 1979 г., первые слабые признаки цикла № 22 появились в июле 1986 г. Прежде всего рассмотрим ход активности в представлениях с помощью различных индексов. На рис. 1 сопоставляются усредненные индексы: число Вольфа (W), индекс ПДА (P^{N+S}) и частота вспышек с медленным спадом

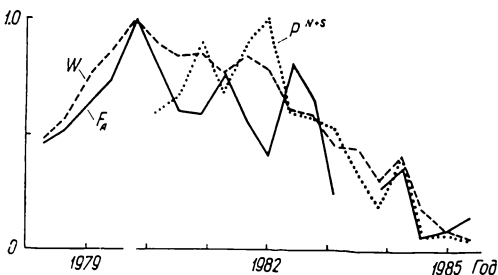


Рис. 1. Временной ход усредненных индексов W , P^{N+S} , F_A

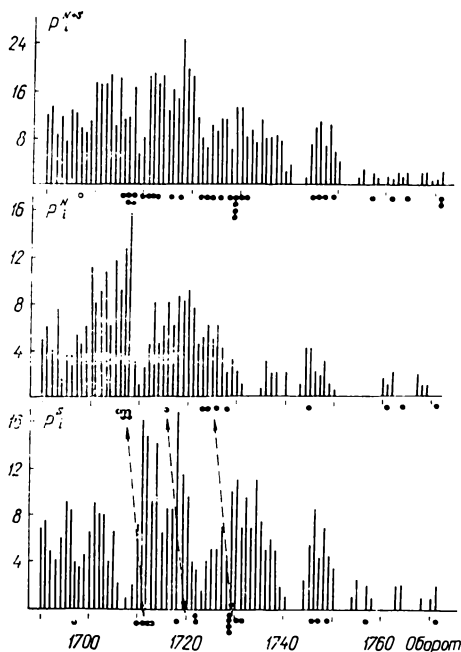


Рис. 2. Временной ход индекса ПДА P_i на нисходящей ветви цикла № 21

рентгеновского излучения (F_A) (для них имеются данные на рассматриваемый период). На рисунке они обозначены соответственно штриховой, пунктирной и сплошной кривыми; частоты нормированы по максимальным значениям; F_A подсчитаны по каталогу [8]; данные относятся к полному диску. В целом ход кривых одинаков, что вполне естественно, поскольку все индексы положительно коррелированы между собой. Однако в деталях нетрудно заметить и ряд отличий. Прежде всего наибольших значений величина P^{N+S} достигает примерно через два года после максимума W . Пока у нас нет данных о поведении P^{N+S} на восходящей ветви цикла № 21, но если экстраполировать пунктирную кривую (рис. 1) к началу цикла, то получается, что циклическая кривая ПДА имеет достаточно индивидуальный характер. Отсюда следует, что вплоть до максимума цикла (по числу Вольфа) прирост активности обеспечивался преимущественно короткоживущими группами пятен. На нисходящей ветви увеличился относительный удельный вес долгоживущих систем. Заметим, что это заключение вполне соответствует представлениям о характере пятнообразовательной деятельности Солнца на разных фазах цикла [6].

Что касается частоты вспышек, то поведение кривой F_A довольно своеобразно. Перед максимумом цикла и сразу после него кривые W и F_A сходны. Затем в течение, по крайней мере, двух лет ситуация становится обратной: повышениям W и пикам P^{N+S} соответствуют провалы кривой F_A . Незадолго перед минимумом все кривые изменяются практически синфазно. Напрашивается вывод, что в период наибольшего развития ПДА генерация вспышек с медленным спадом рентгеновского излучения до некоторой степени угнетается. «Недостача», видимо, компенсируется повышением частоты появлений вспышек других типов (этот вопрос требует отдельного изучения).

На рис. 2 показаны изменения P_i^k (время по оси абсцисс дано в оборотах). На графиках по полушариям отчетливо видна квазипериодичность развития ПДА.

Отдельные «всплески» охватывают интервалы 16—22 оборота, а переходы одного к другому очень быстрые, порядка нескольких оборотов. Величина «периодов» в целом согласуется с продолжительностью флюктуаций пятнообразования [5]. Анализ исходной карты ПДА показывает, что одной из причин, определяющих ход P^k_i , является квазипериодический характер развития индивидуальных ПДА и их систем. Не изменяя положения на каррингтоновской координатной сетке, эти структуры квазисинхронно усиливаются и затем в большинстве случаев довольно быстро ослабевают. Существенный вклад как в общий ход, так и в локальные понижения P^k_i вносят резкие разрушения долгоживущих крупномасштабных «потоков» ПДА, после чего на этих местах долгоживущие активные структуры не возникают или появляются в единичных случаях. Естественно, что возникновение таких «потоков» и отдельных достаточно мощных ПДА в свою очередь сказывается на ходе P^k_i . Все это свидетельствует о том, что развитие ПДА в целом подвержено режим перестройкам глобального характера.

Обращает на себя внимание еще одна особенность эволюции ПДА — определенная асимметрия P^k_i по полушариям. На рис. 2 видно, что в общем случае $P^N_i \neq P^S_i$ для фиксированных моментов времени. Однако следует отметить, что за весь рассматриваемый период активность ПДА в северном и южном полушариях была примерно одинакова: $\sum_i P^N_i = 353$, $\sum_i P^S_i = 398$. Активность ПДА в южном полушарии примерно на 13% больше, чем в северном. В пределах точности оценок P^k_i оба полушария можно считать одинаково активными. Другое проявление асимметрии заключается в фазовом сдвиге циклов P^k_i по полушариям, что также видно на рис. 2. В этой связи возникает ряд вопросов: отражается ли здесь независимость развития ПДА по полушариям или, наоборот, развитие активности в одном полушарии вызывает аналогичный процесс в другом и т. п.? Чтобы ответить на них, необходимо отдельное исследование. «Разфазировка» эволюции ПДА по полушариям приводит к тому, что ход индекса ПДА для всего диска $P_i^{N+S} = P^N_i + P^S_i$ получается более сглаженным, хотя и здесь квазипериодичность можно проследить достаточно уверенно (рис. 2).

На рис. 2 нанесены также сильные геоэффективные вспышки, которые в подавляющем большинстве случаев располагались в ПДА. Можно увидеть определенную тенденцию к их концентрации вблизи интервалов перестроек ПДА, т. е. в окрестностях минимумов индекса ПДА. Примером в этом отношении может быть серия из пяти вспышек на оборотах 1706—1708 в северном полушарии, возникшая практически в момент резкой смены моды активности. Создается впечатление, что серии вспышек в северном и южном полушариях могут быть определенным образом связаны между собой. Например, на оборотах 1706—1731 серии вспышек в южном полушарии на четыре-пять оборотов запаздывали по отношению к сериям в северном полушарии (на рис. 2 сопряженные серии соединены штриховыми линиями со стрелками). Повторяющаяся здесь регулярная ситуация позволяет предположить связь между событиями в северном и южном полушариях, хотя не исключены и альтернативные объяснения.

Мы затронули лишь основные моменты, относящиеся к ПДА: определение, методике оценки индексов, характер их изменений на нисходящей ветви цикла № 21, сопоставление индексов ПДА с некоторыми другими индексами солнечной активности. Более детальное обсуждение характеристик ПДА предполагается провести в последующих работах. Здесь же целесообразно обсудить еще, хотя бы кратко, место ПДА в общей структуре активности на Солнце и преимущества использования индексов ПДА перед другими способами представления пятенной активности.

По сути определения основными свойствами ПДА являются жесткое вращение на каррингтоновской координатной сетке и длительное непрерывное пятнообразование. Такого же рода характеристики присущи ядрам КА, центрам активности на границах крупномасштабных ячеек [7], сильным фоновым полям на определенных фазах их развития [9] и, по-видимому, «стержневым точкам» на стадии пятнообразования. Из-за малой изученности этих явлений пока трудно заключить, представляют ли они собой разные события или дело лишь в терминологии. Существенно, что этот класс структур обладает повышенной вспышечной активностью, в частности протонновспышечной. Очевидно, что все отмеченные образования попадают в разряд ПДА, если только приведенные выше основные критерии сохраняются в течение не менее трех оборотов. Таким образом, ПДА можно рассматривать как понятие, объединяющее известные в настоящее время проявления солнечной активности с повышенным вспы-

шечным потенциалом. В этой связи обращение к ПДА может оказаться полезным для решения практических задач прогнозирования вспышечной активности.

Уже отмечалось, что индексы ПДА можно рассматривать как характеристики взаимосвязанных и взаимовлияющих групп пятен (АО). Здесь также приходится констатировать слабую изученность проблемы. Возможно, что фактору «взаимоотношения» придается излишне самостоятельное значение, во всяком случае данные наблюдений пока не дают однозначного ответа на этот вопрос. Если даже наблюдаются последовательные или одновременные возмущения нескольких структур, то это не обязательно должно быть причинно-следственной цепочкой. Например, вполне допустимо предположение, что система АО имеет общий источник и наблюдаемые возмущения являются в основном результатом изменений его состояния. Тем не менее, поскольку такой источник обычно «помещается» в глубоких ненаблюдаемых слоях солнечной атмосферы, «коллективные» возмущения АО чаще всего рассматриваются в рамках взаимодействия. Таковы, например, трактовки формирования центров протонных вспышек [7] и механизма возникновения крупных вспышек в КА [2], сводящиеся к взаимодействию ячеистых структур магнитных полей. Эти замечания в полной мере относятся и к ПДА.

В самой общей форме ПДА следует рассматривать как области длительного квазинепрерывного выхода в солнечную атмосферу сильных магнитных полей в виде групп пятен. По современным представлениям источником этих полей может быть один из ярусов конвекции. Поскольку группы пятен имеют короткое время жизни (менее 11 сут в 90 % случаев, около 40 сут в остальных случаях, очень редко более 100 сут [4]) по сравнению с ПДА (по определению — не менее 80 сут), то, действительно (за редким исключением), в ПДА одна группа следует за другой практически непрерывно. В результате в этих областях должны формироваться сложные магнитные конфигурации взаимодействующих магнитных потоков разного возраста, что, видимо, создает условия для развития больших вспышечных событий. В отдельных случаях такие конфигурации подвергались сравнительно детальному изучению. Например, в [1] обсуждалась магнитная ситуация в КА, ядро которого было типичной ПДА. Результаты исследования свидетельствуют о взаимосвязи и взаимодействии старых и молодых полей, что достаточно ярко проявляется во время больших вспышек.

Для большей конкретизации затронутых вопросов приведем следующие примеры. Сопоставление карты ПДА с данными о сильных протонных вспышках (по каталогу событий, воздействующих на земную среду [14]) показало, что в ПДА располагались 30 (91 %) из 33 отождествленных событий на диске на нисходящей ветви цикла № 21. Наглядно связь крупных вспышек, в том числе протонных, с ПДА показана на рис. 3, где воспроизведены карты сильных фоновых полей (≥ 500 мкТл) из [9] и нанесены ПДА (вертикальные штрихи, число которых соответствует значениям индекса $P^k_{i,j}$), а также вспышки балла 2 и более (горизонтальные штрихи, протонные события из [14] отмечены залитым кружком). Нетрудно видеть, что вспышки в большинстве случаев (а протонные целиком) совпадают с ПДА. Если учесть отмеченную выше тенденцию к связи протонных событий с перестройками ПДА, то, действительно, можно убедиться, что при изучении пространственно-временных закономерностей протонных событий целесообразно привлекать ПДА. Не следует, однако, думать, что между индексами ПДА и вспышечными индексами обязательно должна соблюдаться прямая пропорциональная зависимость. Как видно на примере со вспышками из каталога [8], ситуация может быть более сложной. На рис. 3 также показано, что ПДА хорошо «трассируют» сильные фоновые магнитные поля на фазе их жесткого вращения.

Циклические кривые индексов ПДА демонстрируют ряд особенностей, из которых наибольшее внимание привлекают запаздывание максимума P^k_i на один-два года (вторичный максимум Гневывшева) относительно максимума цикла по числу Вольфа, четко выраженный прерывистый характер и асимметрия относительно экватора. Такого же рода особенности присущи циклам активности больших вспышек, крупных групп пятен, развитию магнитных активных долгот и т. д. Признано, что это отнюдь не аномалии, а отражение сложных внутренних закономерностей циклической деятельности Солнца [5, 6, 10, 13]. Поэтому следует ожидать, что использование индексов ПДА может помочь полнее разобраться в структуре и динамике циклов, прежде всего в проблеме глобальных перестроек магнитных полей и различного рода асимметрий в развитии активности. Очевидно, однако, что индексы ПДА не являются независимыми,

они так или иначе связаны с другими индексами солнечной активности. Чтобы в полной мере оценить их сравнительную эффективность, необходимы дальнейшие исследования.

Основные итоги: 1. Метод ПДА позволяет на основе широкодоступного материала наблюдений (данные о группах пятен) получить пространственно-временное распределение долгоживущих источников потоков магнитного поля в солнечной атмосфере.

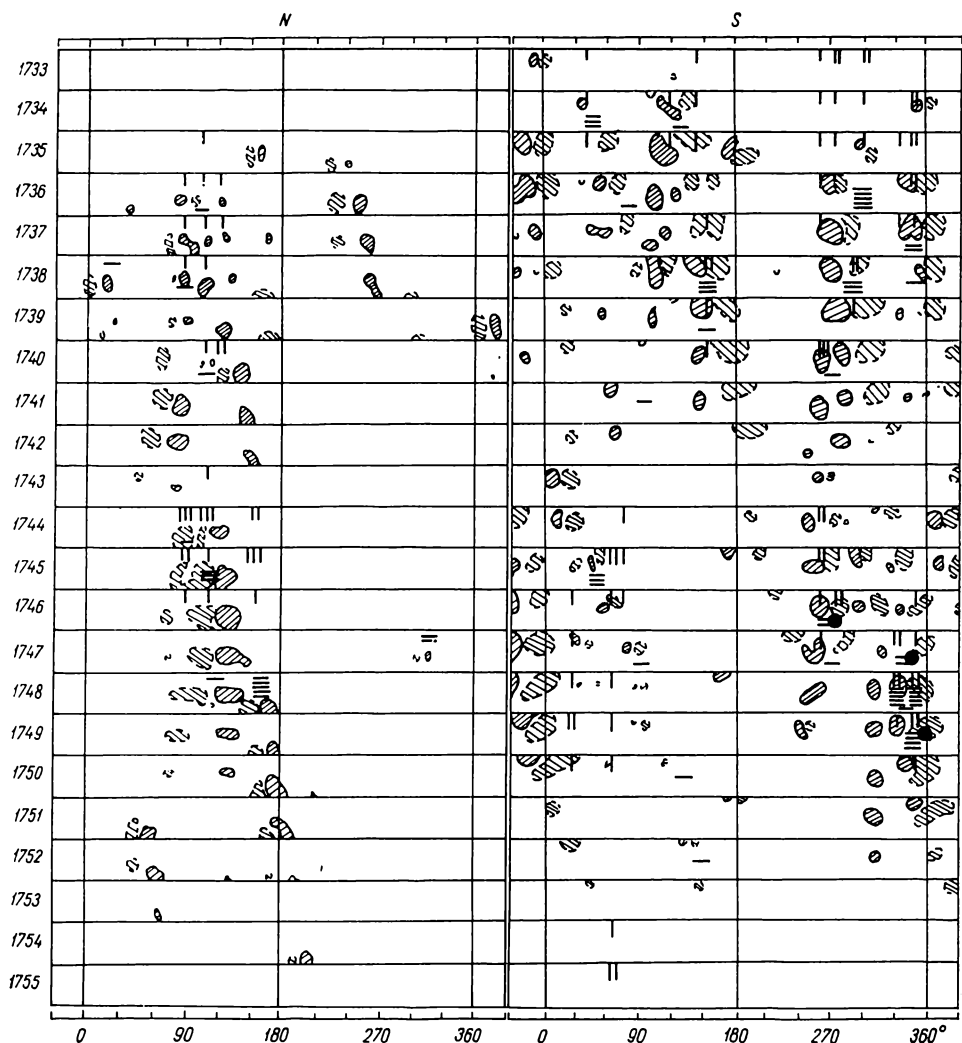


Рис. 3. Сильные фоновые магнитные поля, ПДА и крупные вспышки на 1733—1755 оборотах в северном (N) и южном (S) полушариях. Обозначения в тексте

Для описания активности ПДА предлагается индекс $p^{r,i,j}$ и его интегральные формы; 2. Представление нисходящей ветви солнечного цикла № 21 с помощью индексов ПДА показывает, что активность ПДА имеет в определенном смысле собственный цикл, максимум которого запаздывает на 1.5—2 года по отношению к максимуму по числу Вольфа. Ход индекса P^h по полушариям в общем случае несимметричен и отличается хорошо выраженной квазипериодичностью с «периодом» 16—22 оборота. Интерпретация этого факта заключается в том, что распределение источников долгоживущих магнитных потоков квазипериодически испытывает глобальные перестройки; 3. Сильные геоэффективные вспышки пространственно связаны с ПДА. Их появление, видимо, инициируется глобальными или достаточно крупномасштабными перестройками распределения ПДА. Эти особенности в принципе можно использовать в прогностических целях.

Полученные результаты имеют предварительный характер, поскольку использованный материал ограничен, особенно для надежных оценок количественных характеристик активности ПДА.

1. Банин В. Г. Комплекс активности и большие вспышки в мае 1981 г. // Исслед. по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца.— 1983.— Вып. 65.— С. 129—150.
2. Банин В. Г. О связях больших солнечных вспышек с комплексами активности и ячеистыми структурами // Солнеч. данные.— 1986.— № 7.— С. 77—84.
3. Банин В. Г., Боровик А. В., Язев С. А. Структурные и эволюционные характеристики комплексов активности в хромосфере Солнца // Тез. докл. Всесоюз. конф. Физика Солнца, Алма-Ата, 22—26 июня 1987 г.— Алма-Ата, 1987.— С. 15.
4. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна: Пер. с англ.— М.: Мир, 1967.— 383 с.
5. Витинский Ю. И., Копецкий М., Ку克林 Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности // Солнеч. данные.— М.: Наука, 1986.— 296 с.
6. Витинский Ю. И., Ку克林 Г. В., Обридко В. Н. Об основных фазах солнечного цикла // Солнеч. данные.— 1986.— № 3.— С. 53—56.
7. Иванов Е. В. О пространственно-временном распределении факелов и солнечных пятен // Там же.— № 7.— С. 61—72.
8. Antalová A. Catalogue of LDE flares (January 1969 — March 1986) // Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso.— 1987.— 16.— P. 79—100.
9. Bumba V., Gesztelyi L. Rotation of individual background magnetic field components during the formation of the white-light flare region of April 1984 (NOAA 4474) // Bull. Astron. Inst. Czech.— 1987.— 38, N 6.— P. 351—355.
10. Bumba V., Gesztelyi L. Formation of the white-light flare region of April 1984 (NOAA 4474) within the 21st cycle of solar activity // Ibid.— 1988.— 39, N 2.— P. 86—92.
11. Kopecký M., Křivský L. Proton flares and types of spot groups in the 11-year cycle // Ibid.— 1966.— 17, N 6.— P. 360—365.
12. Křivský L. Solar proton flares and their prediction.— Prague: Publ. Czech. Acad. Sci., 1977.— 121 p.
13. Kuklin G. V., Kopecký M. Changes of indices of importance of sunspot groups in the course of 11-year cycles // Bull. Astron. Inst. Czech.— 1988.— 39, N 2.— P. 93—96.
14. Solar-Geophysical Data.— 1986.— N 502.— Part 2.
15. Sory-Escaut I., Martress M.-J., Mouradian Z. Singularity of solar rotation and flare productivity // Astron. and Astrophys.— 1985.— 145, N 1.— P. 19—24.

Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн.
Сиб. отделение АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию 01.07.88,
после доработки 22.08.88

Научные конференции

СИМПОЗИУМ МАС № 146 «ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА: ДИНАМИКА И СВЯЗЬ СО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ»

Состоится 4—9 июня 1990 г. в Париже. Научная программа: молекулярные комплексы в галактиках Местной группы; определение масс молекулярных комплексов; структура молекулярных комплексов: спирали, перемычки, кольца; взаимодействие и слияние галактик; крупномасштабная динамика молекулярного газа; от галактик IRAS сверхвысокой светимости до квазаров.