

# КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

---

Доктор физико-математических наук Сергей ЯЗЕВ,  
директор астрономической обсерватории Иркутского  
государственного университета,  
старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики  
СО РАН (Иркутск)

---

**Знаменательную дату в истории астрономии —  
400-летие первых наблюдений звездного неба с использованием телескопа —  
отмечали в 2009 г. Пионерами были Галилео Галилей в Италии,  
Иоганн Гольдшмидт (Фабрициус) в Голландии, Томас Гарриот в Англии  
и Христофор Шейнер в Германии. Благодаря оптическим приборам  
еще в начале XVII в. удалось открыть темные пятна на Солнце  
и подтвердить, что это образования на светиле, а не планеты,  
при своем движении по орбитам оказавшиеся на линии Солнце-Земля.  
Много позже выяснилось, что пятна причастны,  
по крайней мере, к трем уровням организации солнечной активности.  
Один из них и стал предметом нашего интереса.**

## **ПЯТНА И АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ**

За четыре века ученые подробно изучили феномен солнечных пятен. В начале XX в. американский астроном Джордж Эллери Хэйл сделал два выдающихся открытия, касающихся этих грандиозных по земным меркам образований. Во-первых, спектральные наблюдения показали, что температура в пятнах существенно ниже, чем в окружающей фотосфере (видимом излучающем поверхностном слое) Солнца, различия составляют 1000–1500 К и более. Во-вторых, в них присутствуют сильные магнитные поля,

собственно, и являющиеся их основой. Затрудняя конвекцию (перенос теплоты восходящими потоками плазмы), магнитные поля приводят к уменьшению выхода энергии из недр звезды и, соответственно, к уменьшению температуры и относительному падению яркости этих образований. В крупных пятнах выделяется центральная, наиболее темная часть — «тень», охваченная более светлой кольцевой областью — «полутенью». В тенях магнитные поля преимущественно вертикальны, в полутенях — квазигоризонтальны.

Пятна на Солнце 13 мая 2013 г.  
Снимок астрономической обсерватории ИГУ.



С помощью регулярных наблюдений удалось выявить ряд существенных свойств солнечных пятен, в частности установить, что они появляются, как правило, не по одному, а группами. Последние существенно различаются по площади, конфигурации и числу отдельных пятен, при этом возможны быстрые и существенные изменения всех параметров группы. Статистика показала: эти формирования в преобладающем большинстве живут недолго; 90 % из них существуют менее 11 суток, а более половины — менее двух дней. Пятна возникают не дальше 35–40° от экватора звезды, при этом первые группы нового 11-летнего цикла солнечной активности рождаются вблизи высокоширотной границы указанной зоны. Последующие, по мере развития цикла, формируются ближе к экватору.

В современной литературе термин «группа пятен» используют нечасто. Как правило, применяют более широкое понятие — «активная область» (АО). Она включает в себя не только пятна, но весь комплекс образований, с ними связанных, — яркие факелы на фотосфере и флоккулы в хромосфере\*, зону возмущенной структуры последней, окружающую группу пятен, а также корональные структуры (системы магнитных петель), вздымающиеся высоко в корону. Давно известно, что за редкими исключениями именно в активных областях происходят солнечные вспышки. Физической основой АО является ее магнитное поле, в ряде случаев обладающее очень сложной структурой.

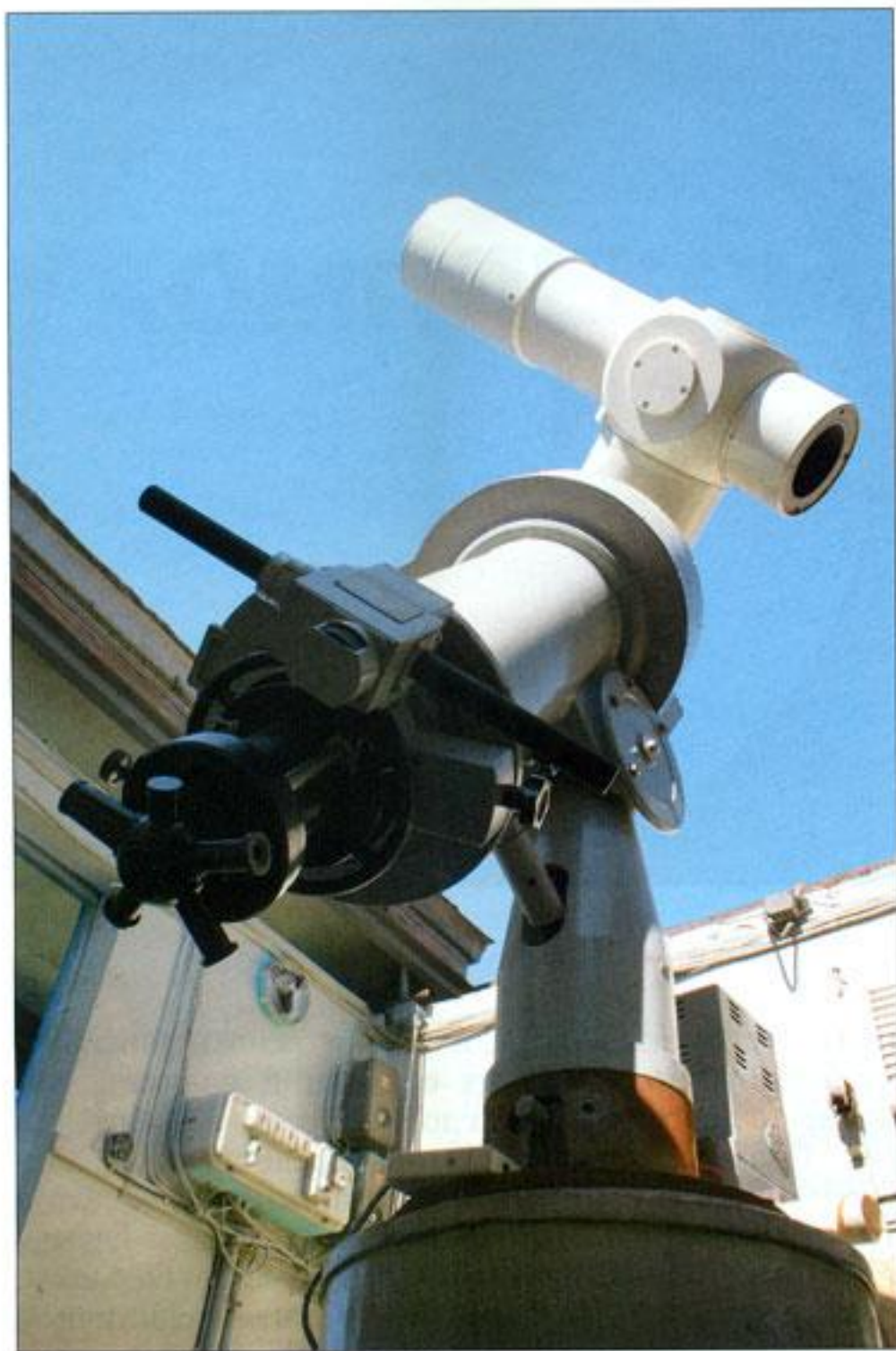
Обратимся теперь к распределению групп пятен по долготе — оно, на первый взгляд, выглядит хаотич-

ным. Этого, казалось бы, и следует ожидать, поскольку априори нет никаких оснований полагать, что какие-то долготы Солнца должны отличаться от других. Плазменный шар светила представляется осесимметричным, и все долготы должны быть с этой точки зрения равноправными — во всяком случае, при усреднении по временам, существенно большим, чем средняя продолжительность жизни единичной группы пятен.

Но на практике дело обстоит иначе. При суммировании числа или общей площади групп пятен за длительный период времени, т.е. на протяжении одного, двух и более циклов, обнаруживается, что на определенных интервалах долгот пятна систематически возникают в больших количествах (либо с большими площадями), чем по соседству. Такие интервалы получили название «активных долгот». Изучением этого феномена на протяжении многих лет занимался кандидат физико-математических наук Юрий Витинский (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН).

Сами активные долготы как таковые известны давно, хотя по-прежнему вызывают некоторое недоумение. Строго говоря, причина их существования все еще не ясна. Одна из гипотез, предложенная в 1997 г. группой финских астрофизиков и развитая доктором физико-математических наук Леонидом Кичатиновым совместно с доктором физико-математических наук Александром Мордвиновым (Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН), заключается в том, что в лучистом ядре Солнца существует реликтовое неосесимметричное магнитное поле. Взаимодействуя с осесимметричным, оно должно приводить к наблюдаемым явлениям северно-южной асимметрии солнечной активности и

\*Флоккулы — яркие образования в хромосфере Солнца; хромосфера — горячий разреженный слой атмосферы Солнца толщиной около 10 000 км, расположенный над фотосферой (прим. ред.).



**Телескоп «Цейсс-150»**  
астрономической обсерватории ИГУ.

переменности высоты соседних циклов. Эта интересная гипотеза не является общепризнанной. Другая версия предполагает существование в зоне генерации пятен неосесимметричного осциллятора (колеблющейся системы), обеспечивающего последовательную активизацию двух пар антиподальных активных долгот.

Таким образом, традиционно выделяются два основных уровня организации солнечной активности: активные области как основной ее «кирпичик» и активные долготы как долгоживущие зоны преимущественного образования активных областей. Теперь, когда свойства указанных уровней кратко перечислены, перейдем к описанию свойств еще одного, промежуточного.

### ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

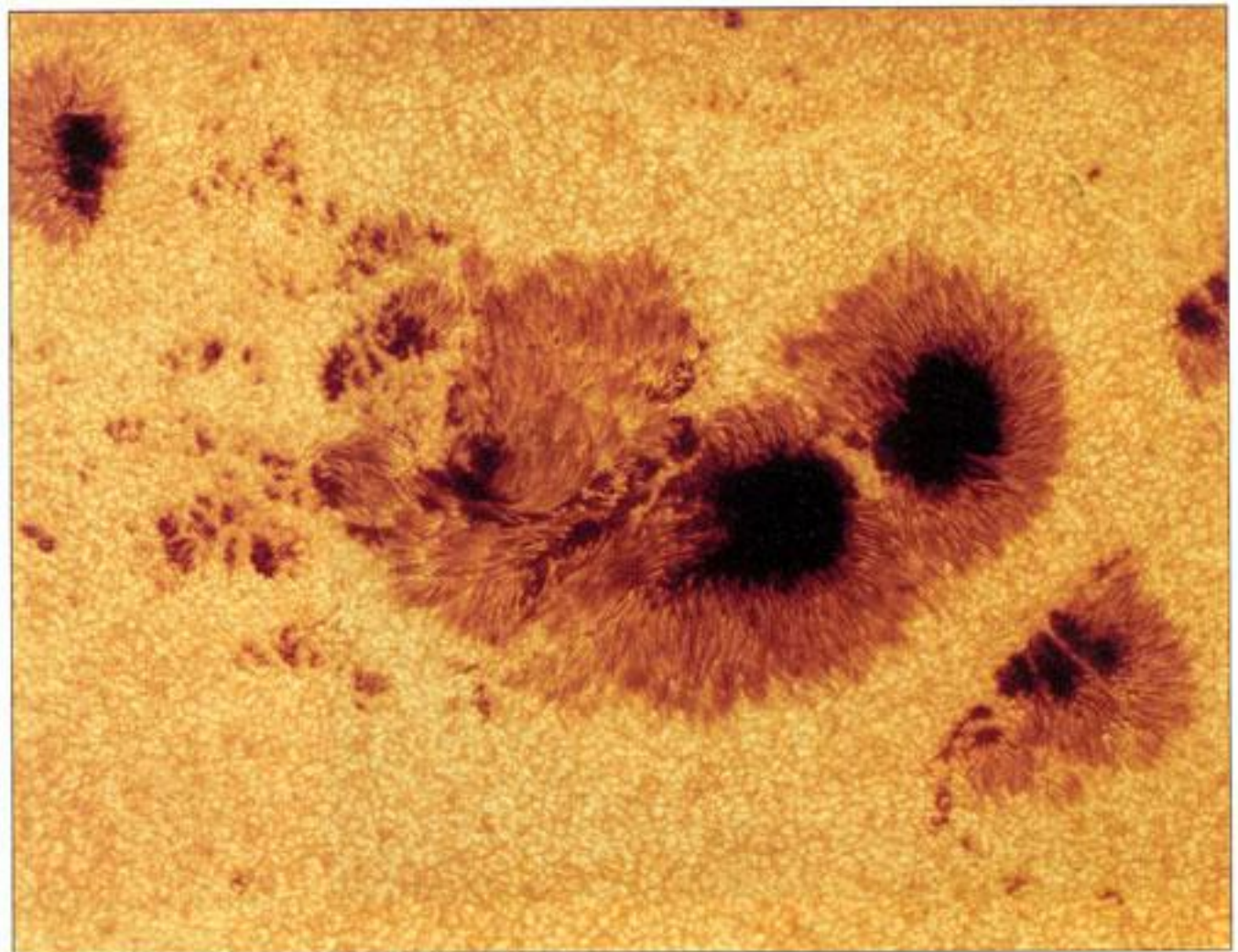
Он был обнаружен исследователями в 1960-е годы, но долго ему не уделялось должного внимания, а данные о нем не систематизировались. Суть феномена в том, что на одном и том же участке солнечной поверхности длительное время (на протяжении нескольких месяцев) может наблюдаться непрерыв-

ное пятнообразование. При этом речь идет не о единичной долгоживущей активной области: здесь одни из них возникают, другие исчезают, а в целом система долгоживущего магнитного поля существует значительно дольше типичного времени жизни отдельной активной области. Возникающие как последовательно, так и одновременно, эти индивидуальные активные области нельзя считать в полной мере независимыми: их локальные магнитные поля входят в единую систему общего поля.

Такие крупномасштабные (хотя и меньше активных долгот) образования получили название комплексов активности (КА), само же это понятие ввели в 1965 г. чешский астрофизик Вацлав Бумба (иностраный член АН СССР с 1988 г.) и гелиофизик Роберт Ховард (США). Надо заметить, что многие исследователи и ранее обращали внимание на некие участки солнечной поверхности, где регулярно возобновлялась активность в форме появления пятен. Феномен рассматривался с разных точек зрения и обозначался разными терминами. Например, в 1948 г. доктор физико-математических наук Морис Эйгенсон (обсерватория Львовского университета, Украина) назвал явление «импульсом активности». Другие авторы определяли его как «гнезда пятен», «пульсирующие очаги пятнообразования» и т.д.

В дальнейшем свойства отдельных КА подробно рассматривали многие исследователи, как зарубежные, так и отечественные — из Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) им. Н.В. Пушкова РАН (Троицк), Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, Главной астрономической обсерватории РАН, Института солнечно-земной физики СО РАН, Астрономического института им. Улугбека АН Узбекистана и др. При этом предлагались разные подходы для описания феномена. В данной статье речь пойдет о результатах, полученных иркутской школой гелиофизиков из Института солнечно-земной физики СО РАН и астрономической обсерватории Иркутского государственного университета. Основы подхода были заложены доктором физико-математических наук Валерием Баниным (1930–1998) из ИСЗФ СО РАН совместно с автором настоящей статьи.

По результатам анализа изображений Солнца в свете линии водорода H-альфа можно представить комплекс активности в виде гигантского пятна, в котором роль центральной части — «ядра» — играет одна или несколько активных областей, объединенных общей системой магнитного поля. Наиболее близкий аналог — пятно с так называемой «дельта-конфигурацией». В пределах одной «полутени» в них могут сосуществовать несколько фрагментов «тени», причем обеих магнитных полярностей. Как и в тени пятна, в ядре комплекса активности магнитные полярности перемешаны, а магнитное поле (рассма-



Группа солнечных пятен № 11520  
12 июля 2012 г.  
Автор снимка Алан Фридман  
(<http://apod.nasa.gov>).

триваемое на больших пространственных масштабах) направлено преимущественно вертикально. Само ядро охвачено широким кольцом из волоконцев (фибрилл), расположенных квазигоризонтально и преимущественно радиально к нему. Фибриллы наглядно демонстрируют направление магнитного поля, подобно металлическим опилкам в эксперименте на школьном уроке физики.

Такое «суперпятно» (комплекс активности) может существовать достаточно долго: от трех месяцев до года и дольше. Ядро его проявляется в виде зоны постоянного пятнообразования. В нем могут последовательно либо одновременно возникать и распадаться десятки активных областей.

По своей «архитектуре» комплексы активности разделяются на одно- и многоядерные. В пределах общей «полутени» наблюдаются до 3–4 ядер КА, связанных между собой высокими арками магнитного поля. Иногда подобные гигантские КА охватывают по долготе почти половину Солнца. В ряде случаев удается выявить «ветвь» ядра — активную область, существующую относительно недолго, но также связанную с ядром указанными арками.

Статистика, основанная на данных о текущем 24-м цикле солнечной активности (начался в январе 2009 г.), показывает, что группы пятен, входящие в состав КА, составляют в среднем около половины от общего числа пятен.

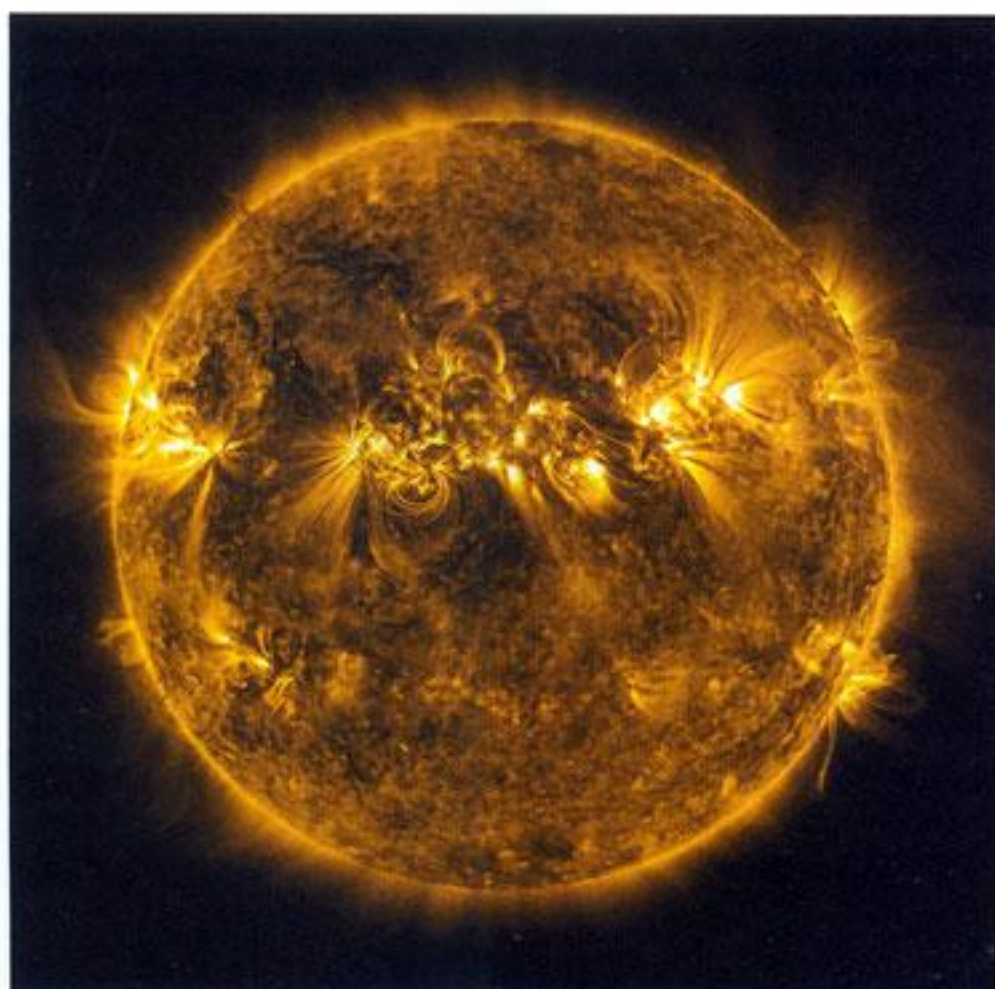
Многие исследователи (в их числе и доктор физико-математических наук Евгений Иванов из ИЗМИРАНа), включая автора данной статьи, полагают: активные области могут быть разделены на два класса в зависимости от глубины формирования их магнитных полей в недрах звезды. Большинство

короткоживущих АО, вероятно, рождаются сравнительно неглубоко (несколько тысяч километров) под уровнем фотосферы. Что касается активных областей, формирующих ядро комплекса активности, то, скорее всего, их магнитные поля генерируются в недрах конвективной зоны Солнца (до 200 тыс. км под фотосферой). Не исключено, что КА связаны с гигантскими конвективными ячейками, предположительно существующими на Солнце.

#### ПОРТРЕТ В ИНТЕРЬЕРЕ ЗВЕЗДЫ

В Институте солнечно-земной физики СО РАН совместно с астрономической обсерваторией Иркутского государственного университета ведется непрерывный мониторинг комплексов активности. Здесь же разработан метод, позволяющий идентифицировать их ядра, чтобы отличить КА, например, от долгоживущих индивидуальных активных областей. А для оценки соответствующих параметров предложен специальный индекс — «мощность ядра КА», определяемый по трехбалльной шкале. Созданный иркутскими гелиофизиками каталог ядер КА насчитывает свыше 370 таких структур, наблюдавшихся на Солнце начиная с 1980 г. Анализ этих данных позволил выделить особенности возникновения и развития комплексов активности, а также ряд их свойств.

Типичная эволюция КА протекает следующим образом. Первые группы пятен в зарождающемся ядре бывают достаточно крупными. Более того, здесь, как правило, появляются сразу от двух до четырех близкорасположенных групп. Максимальной стадии развития КА достигает на втором-третьем месяце своего существования. 54% от общего количества



Солнце 27 сентября 2011 г. в свете линии 17,1 нм. Снимок космической обсерватории *Solar Dynamics Observatory* (США).

ядер КА составляют короткоживущие структуры (до четырех месяцев). Тем не менее, наблюдаются и долгоживущие образования. Так, в 23-м цикле солнечной активности (1996–2008 гг.) был отмечен уникальный комплекс активности, не распадавшийся почти 1,5 года. Отметим, что для долгоживущих КА типичен вторичный всплеск активности на шестом-седьмом месяцах их существования.

На стадии разрушения КА магнитная структура активных областей в ядре упрощается. На месте исчезнувших пятен остается крупномасштабная факельная площадка. Нередко на основе растущей в размерах униполярной (однополюсной) области магнитного поля формируется корональная дыра, откуда силовые линии уносятся в межпланетное пространство потоком частиц солнечного ветра. Если считать, что такая дыра — это комплекс активности на поздней (беспятенной) стадии развития, можно сделать вывод: общая продолжительность существования типичного КА в разных формах (включая беспятенную фазу) приближается к году.

Выявлено несколько интересных особенностей распределения комплексов активности на поверхности Солнца. Во-первых, это северо-южная асимметрия. Если в северном полушарии наблюдается КА, то на тех же гелиографических долготах в южном полушарии в тот же период времени, как правило, его «двойник» не образуется. Он может сформироваться только в другом интервале долгот — опять-таки там, где в северном полушарии в это время нет комплексов активности. Кроме того, северное и южное полушария иногда по-разному их формируют. Например, в 22-м цикле солнечной активности (1986–1996 гг.) количество КА в том и другом было одинаковым (по 52 объекта), зато в последующем

(23-м) цикле превалировало южное полушарие: 77 КА против 69 в северном. В текущем 24-м цикле (начался в январе 2009 г.) явно доминирует северное полушарие. Во-вторых, выявлен эффект своеобразной «релаксации»: после длительного существования многоядерного КА на этом месте новые ядра не возникают на протяжении 8–10 месяцев. В-третьих, удалось обнаружить эффект долготного дрейфа КА. Он заключается в том, что иногда вблизи уже существующего ядра через несколько месяцев возникает новое. Затем с той же стороны от ядра спустя 4–5 месяцев формируется еще одно и т.д. Цепочка возникновения новых ядер КА в 23-м цикле прослежена на протяжении 80 месяцев. Этот эффект приводит к квазилинейному смещению активной зоны развития многоядерных КА по долготе со скоростью порядка  $10^\circ$  в месяц.

#### О ЦИКЛЕ ШВАБЕ-ВОЛЬФА И МОЩНЫХ ВСПЫШКАХ

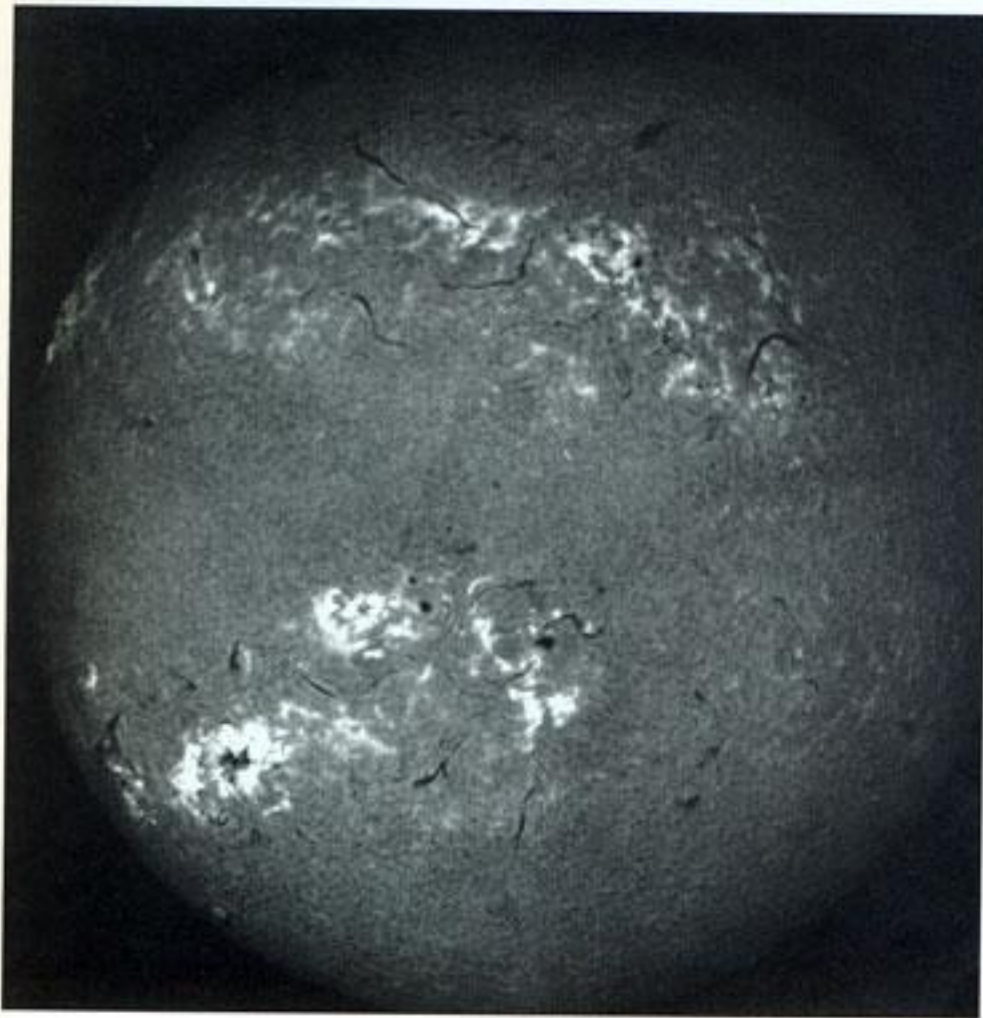
В середине XIX в. выяснилось, что «пятнообразовательная деятельность» Солнца варьирует с большой амплитудой. Период между соседними минимумами активности, когда число групп пятен падает почти до нуля, составляет в среднем около 11 лет. Определяющий вклад в установление этой закономерности внесли немецкий наблюдатель Генрих Швабе и швейцарский исследователь Рудольф Вольф.

Группы пятен, входящие в состав комплексов активности, тоже подвержены этой глобальной закономерности. Кривые, описывающие изменения во времени классического индекса «число Вольфа» (относительное число солнечных пятен) и индекса «мощность ядер КА» в 24-м цикле, хорошо коррелированы. Максимальные коэффициенты корреляции для чисел ядер КА и Вольфа составляют 0,85, для суммарной мощности ядер КА и числа Вольфа — 0,86. Этот факт позволяет рассматривать гипотезу о том, что именно пятнами в комплексах активности определяется общий ход изменений в развитии циклов Швабе-Вольфа.

Анализ показал: индексы ядер КА меняются в течение цикла квазипериодически, импульсами (всплесками), когда в северном или южном полушариях почти одновременно возникают несколько ядер. В течение цикла отмечаются 6–8 таких событий продолжительностью от 6 до 14 месяцев.

В ходе исследования вариаций свойств КА в течение 23-го цикла была отмечена заметная депрессия для значений индексов ядер КА в период его максимума. После этого уровень активности КА снова увеличился, чтобы затем перейти к фазе окончательного ее спада. Выяснилось, что во время депрессии на фазе максимума превалируют короткоживущие и не очень мощные КА, в то время как доля групп пятен, не имеющих отношения к КА, в этот период растет. Естественен вывод, что известная гелиофизи-

**Хромосферный телескоп  
Байкальской астрофизической  
обсерватории ИСЗФ СО РАН.**



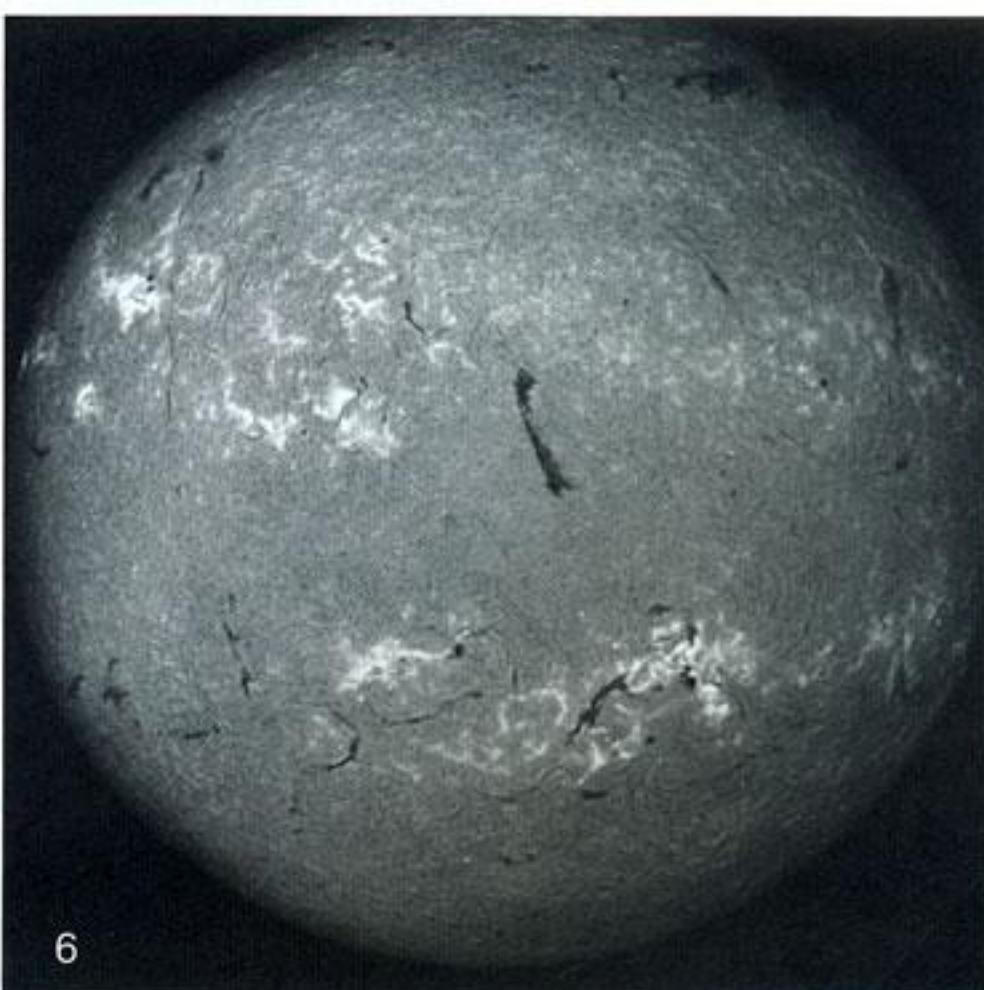
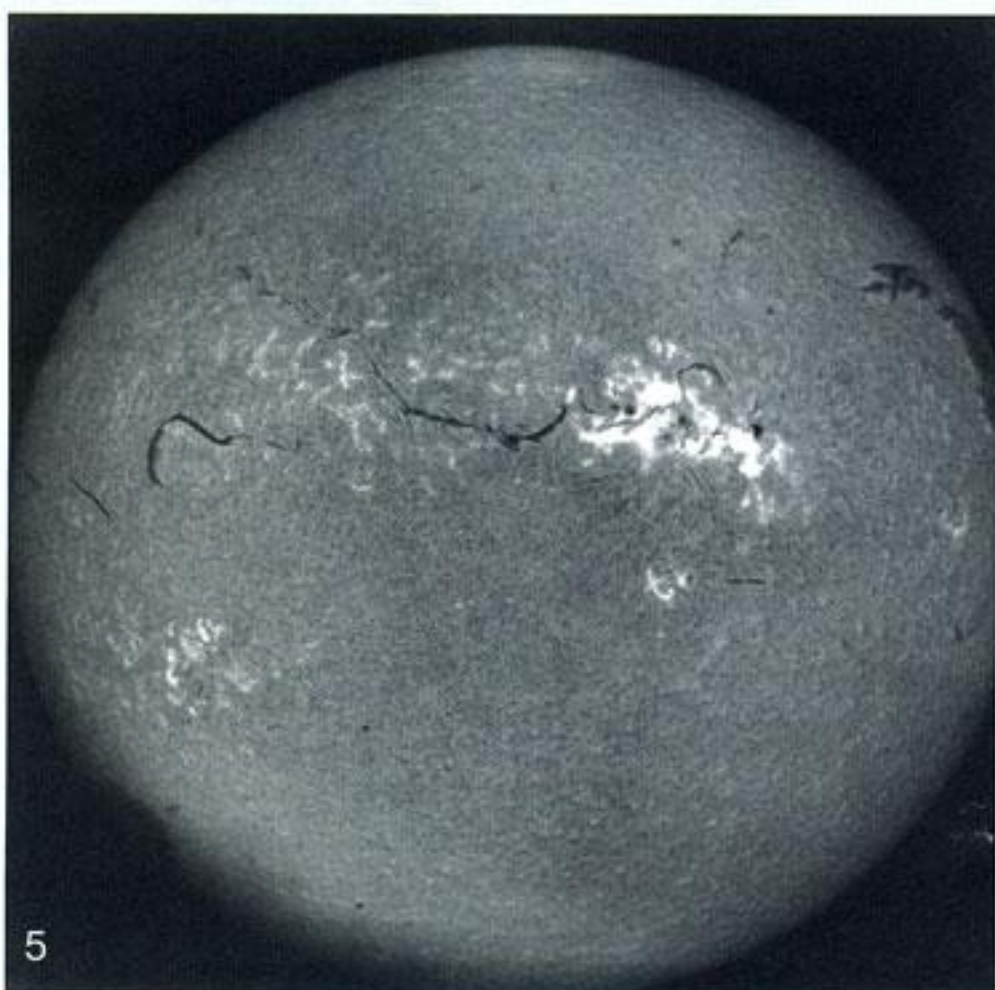
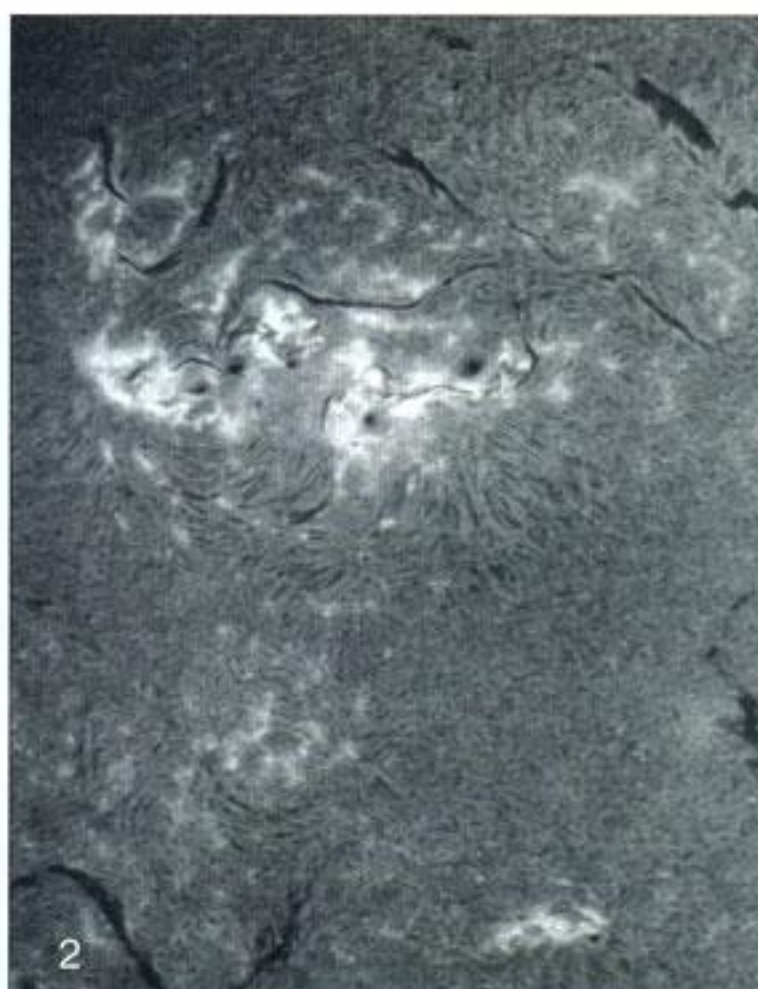
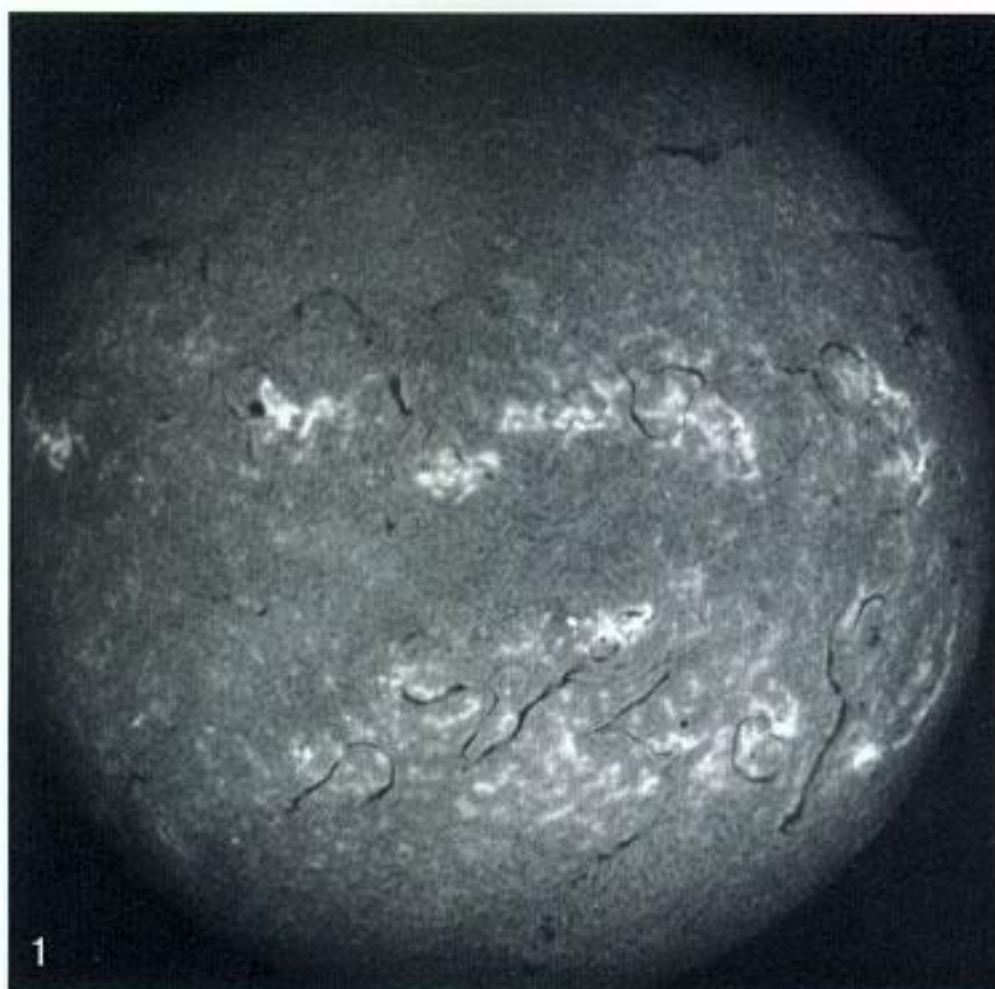
**Мощный комплекс активности на Солнце  
из трех активных областей 10 января 1989 г.  
Снимок Байкальской астрофизической обсерватории  
ИСЗФ СО РАН.**

кам двухвершинность 23-го цикла Швабе-Вольфа связана с соответствующим поведением ядер КА.

Многие специалисты давно обратили внимание на то, что подавляющее большинство групп пятен, в которых происходят наиболее сильные вспышки, входит в состав комплексов активности. Изучение локализации наиболее мощных вспышек, порождающих потоки протонов с энергией больше 10 МэВ в количестве свыше 10 частиц в секунду на 1 см<sup>2</sup> на орбите Земли, показало, что доля мощных вспышек

в активных областях, расположенных в ядрах КА, за период 1980–2012 гг. составила около 90%.

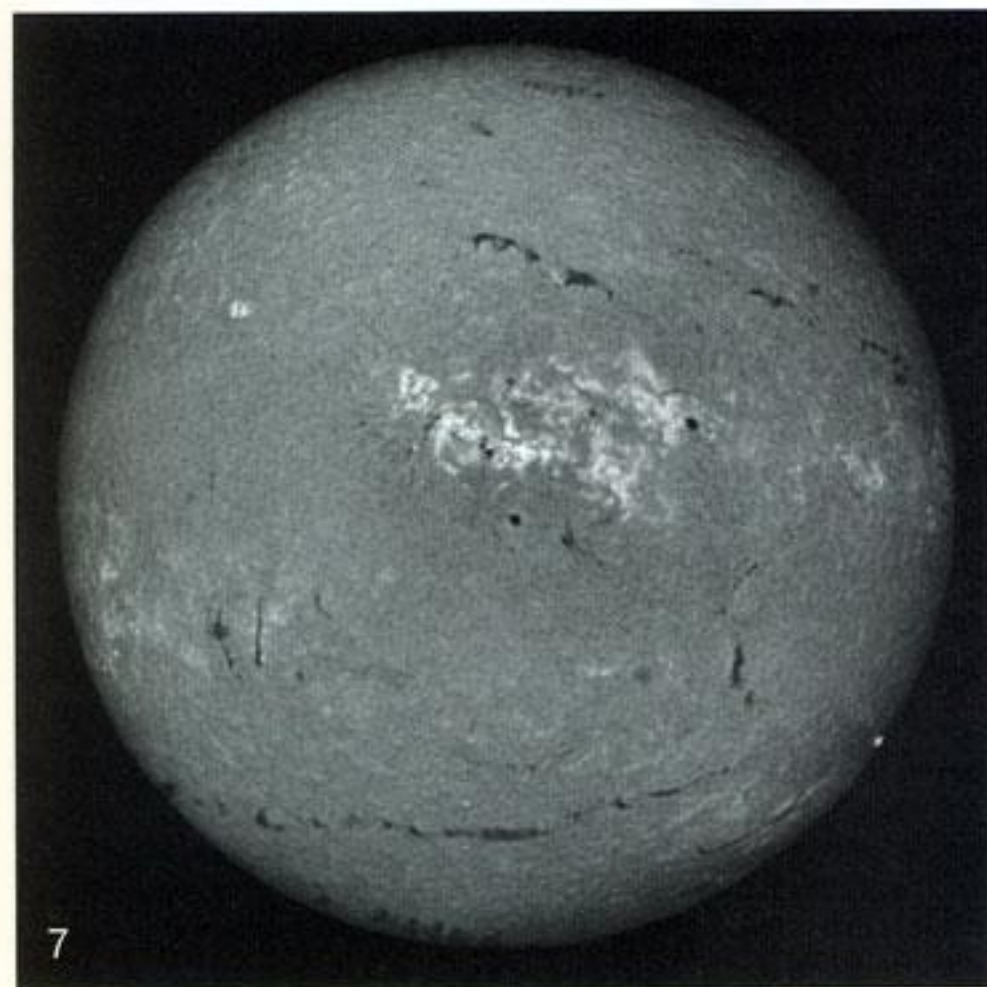
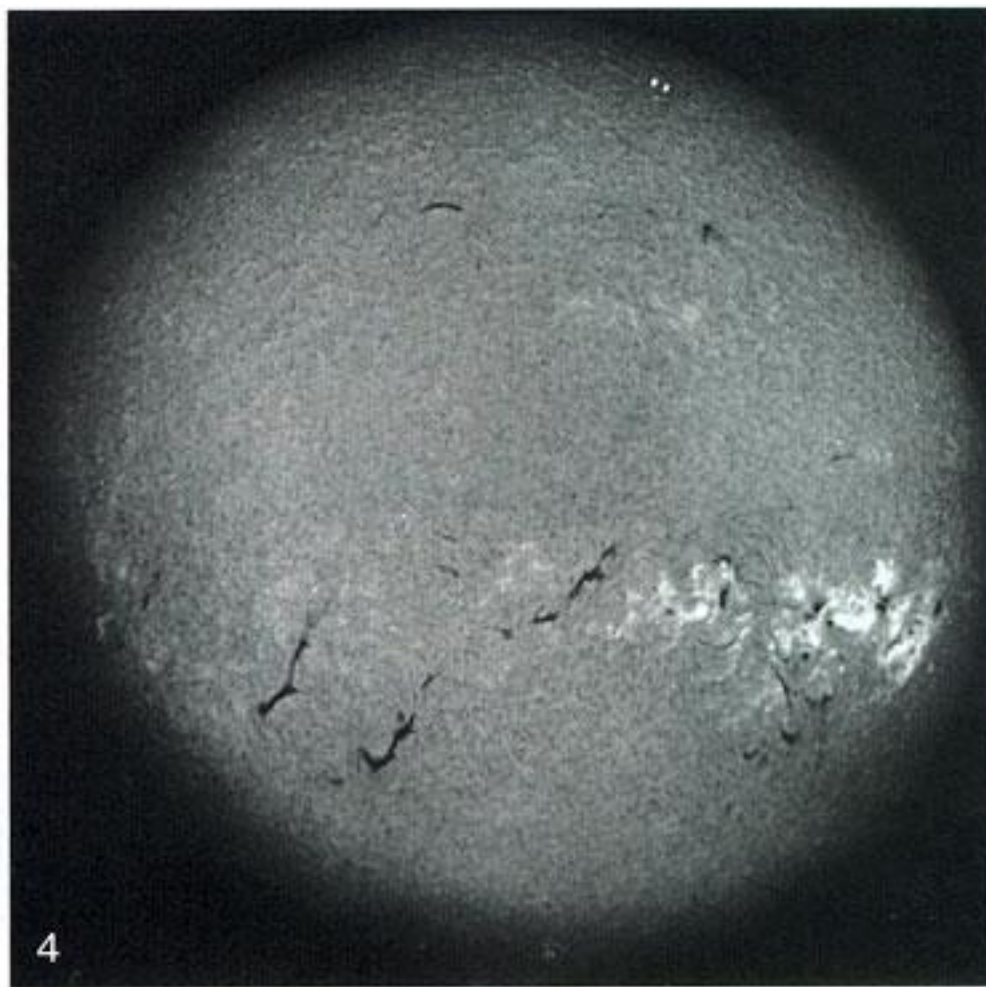
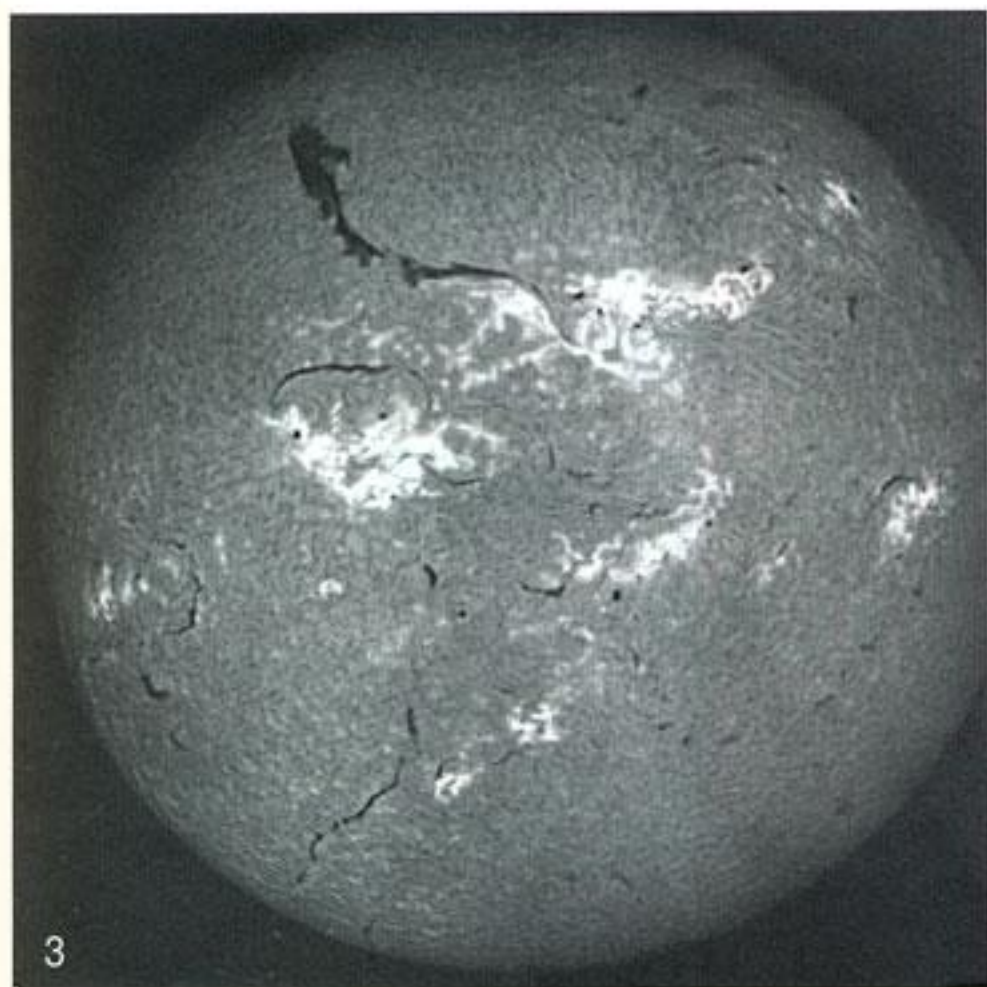
Более детальный анализ позволил убедиться в том, что на первом и втором месяцах жизни ядер КА наблюдается 41% вспышек из рассматриваемой популяции. Немало их и на третьем-четвертом месяцах — соответственно 18 и 15% от общей выборки. Важно, что шанс произвести вспышку такого класса увеличивается для ядер КА вместе с ростом продолжительности их существования: в тех, что живут три



месяца, происходит только 10% подобных вспышек, зато все 100% «семимесячных» ядер КА их произвели (данные по 23-му циклу Швабе-Вольфа).

Вклад комплексов активности в статистику еще одного класса вспышек также очевиден. Оказалось, что высокую корреляцию демонстрируют два показателя: число вспышек с длительным затуханием всплеска в мягком рентгеновском диапазоне (так называемые LDE-события) и суммарная мощность ядер КА. Может быть предложена следующая схема, объясняющая эту корреляцию. В силу взаимосвязанности всех активных областей в составе КА возмущения

магнитных полей охватывают комплекс активности целиком или его значительную часть. Эти экстраординарные события сопровождаются вспышками, выбросами коронального вещества, а также всплесками рентгеновской эмиссии в системах высоких магнитных петель, поднимающихся в корону. Большинство возмущений связано со всплытием из недр Солнца нового магнитного потока, начинающего взаимодействовать с уже существующим здесь «старым». В таких (и только таких) системах возможно развитие длительных «экспессов», а следовательно, и существование рентгеновских всплесков с дли-



**Комплекс активности на Солнце  
в свете линии водорода Н-альфа (656,3 нм).  
Снимки Байкальской астрофизической  
обсерватории ИСЗФ СО РАН: 9 августа 1980 г. (1),  
16 мая 1981 г. (2), 17 июля 1982 г. (3),  
2 мая 1984 г. (4), 15 мая 1984 г. (5),  
11 августа 1989 г. (6), 16 октября 1999 г. (7).**

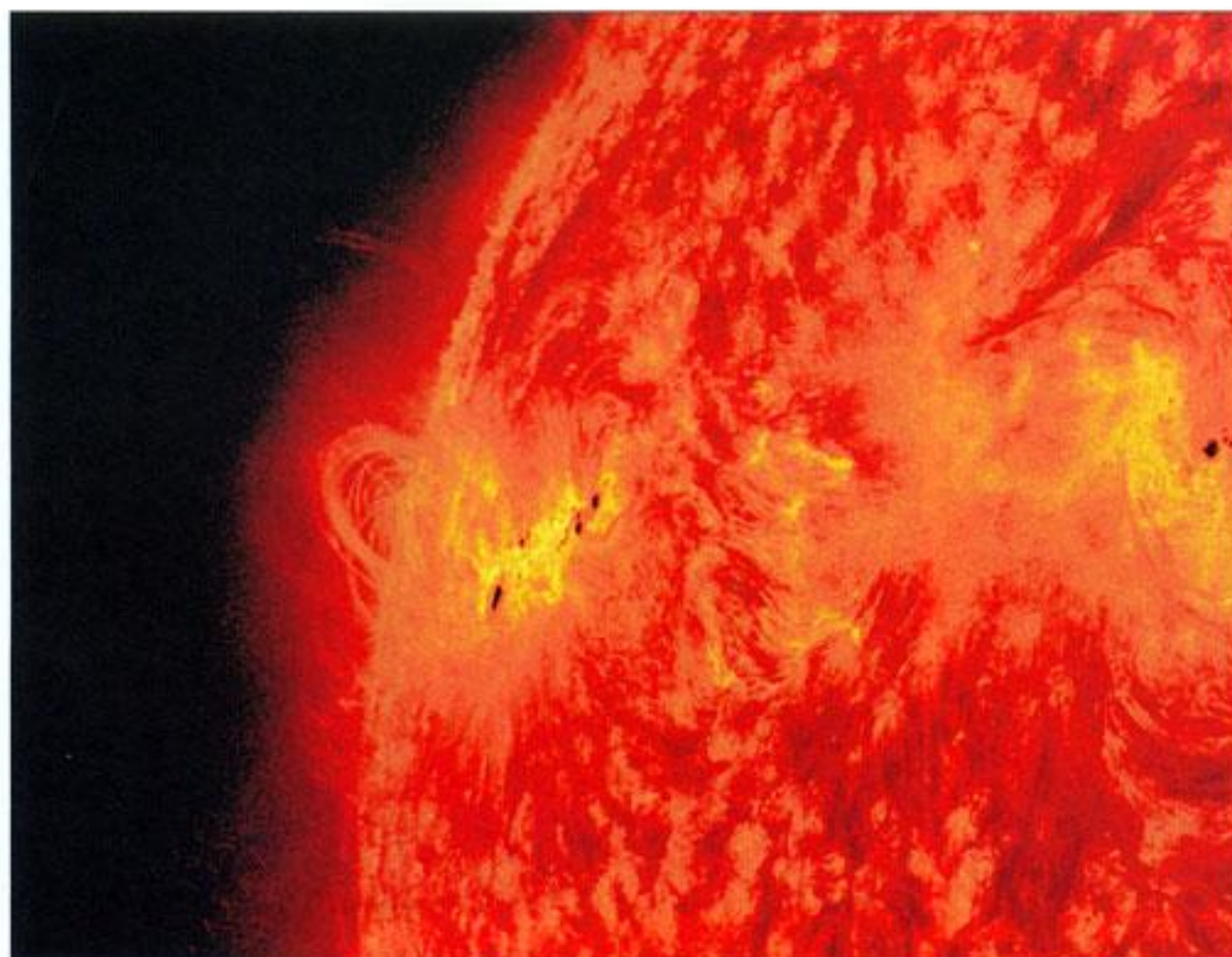
тельным затуханием (LDE-событий). Таким образом, мы приходим к гипотезе о том, что сам факт существования класса LDE-вспышек связан с их развитием в пределах КА.

Каким же образом описанные здесь явления влияют на процессы, происходящие на Земле? Связь наиболее геоэффективных солнечных вспышек с ядрами КА не вызывает сомнений. Сильнейшим геоэффективным агентом при этом являются выбросы коронального вещества. Достигающие окрестностей Земли сгустки солнечной плазмы вызывают геомагнитные бури и другие вариации геофизических пара-

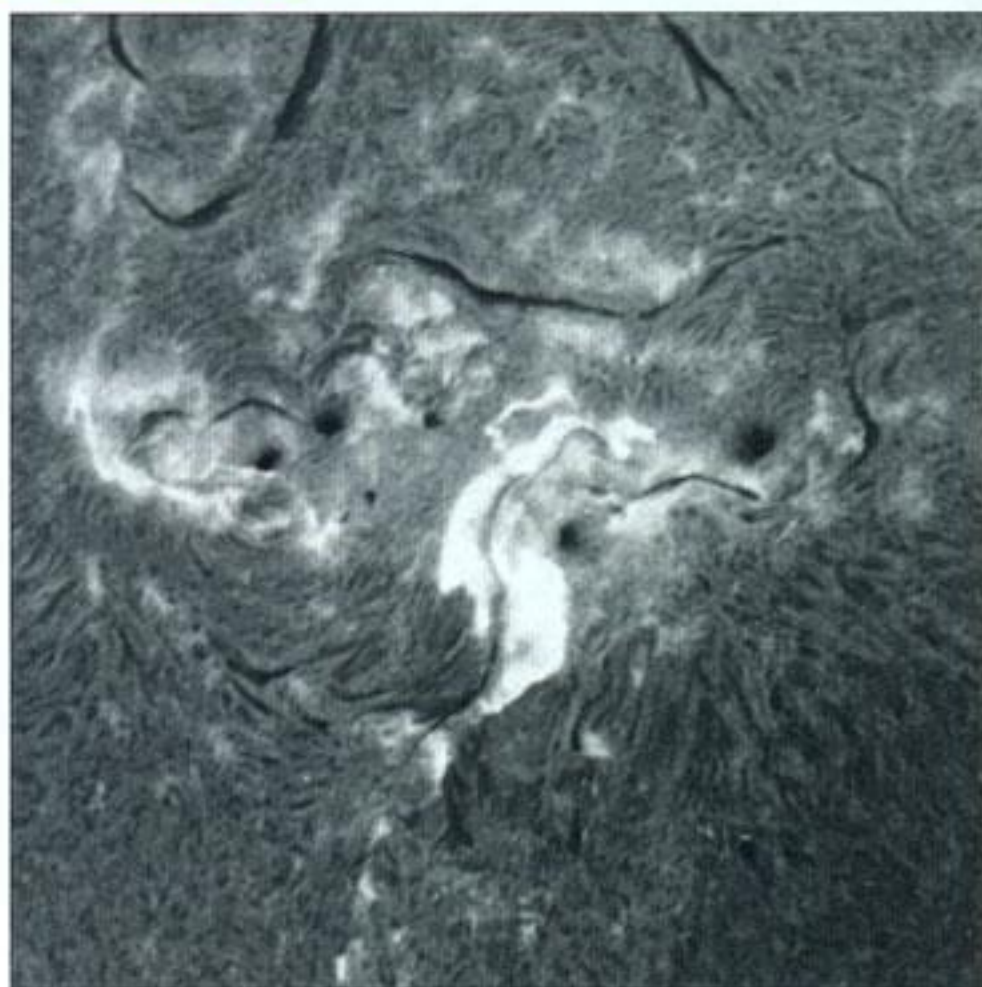
метров на нашей планете. Поскольку мощные вспышки тесно связаны с комплексами активности, следует признать: именно последние несут значительную долю ответственности за эти явления.

В ряде случаев удается показать, что корональные дыры на низких широтах генетически связаны с ядрами КА — после распада пятен в таких ядрах магнитные поля активных областей «расплываются», образуя крупномасштабную биполярную структуру, причем в одной из магнитных ячеек формируется изолированная корональная дыра. Поскольку корональные дыры служат источниками геоэффективно-





**Мощная вспышка 14 мая 2013 г.  
в свете 30,4 нм.  
Снимок космической обсерватории  
Solar Dynamics Observatory (США).**



**Вспышка в комплексе активности на Солнце  
16 мая 1981 г.  
Снимок Байкальской астрофизической обсерватории  
ИСЗФ СО РАН.**

го потока солнечного ветра, то могут рассматриваться как проявление КА на завершающей стадии его эволюции.

В результате можно утверждать, что именно комплексы активности являются основными источниками всех типов геоэффективных излучений Солнца, а также местами генерации крупных протонных вспышек и выбросов коронального вещества (на стадии развития пятен в КА) и одновременно местами истечения высокоскоростного солнечного ветра (на стадии распада КА).

Изучение комплексов активности на Солнце российскими учеными продолжается. На повестке дня стоит вопрос о формировании эффективного алгоритма прогноза развития КА, что позволит осуществлять долгосрочные прогнозы геоэффективных солнечных событий.

*Иллюстрации предоставлены автором*