



УДК 523. 98

Комплексы активности в периоды гранд-минимумов на Солнце

С. А. Язев (syazev@gmail.com)

К. Г. Леви (levi@crust.irk.ru)

Н. В. Задонина (nzadonina@yandex.ru)

Аннотация. Выдвинута и обоснована гипотеза о том, что во время так называемых гранд-минимумов солнечной активности, по крайней мере иногда, развивались комплексы активности, являющиеся основными источниками геоэффективных возмущений на Солнце. В пользу этой гипотезы свидетельствуют наблюдения 1) крупных пятен на Солнце невооруженным глазом и в телескопы в эти периоды; 2) белой вспышки в 1705 г.; 3) полярных сияний, а также характерный «импульсный» характер временных изменений чисел Вольфа с характерной продолжительностью импульса от 6 до 13 месяцев, характерный для развития комплексов активности.

Ключевые слова: цикл солнечной активности, комплексы активности, минимумы Маундера и Дальтона, геоэффективные излучения.

Введение

Гипотеза об определяющем воздействии солнечной активности на климат Земли не является парадигмой [1], однако с течением времени находит все больше доводов в свою пользу и, соответственно, квалифицированных сторонников [1–6]. В качестве основных механизмов воздействия на климат обычно рассматриваются вариации солнечной постоянной и воздействие потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей, в свою очередь, воздействующих на процессы облакообразования и соответствующие изменения общего альбедо и парниковых свойств атмосферы Земли.

Де Ягер с соавторами недавно предложили модель, согласно которой изменения земного климата (рост температуры на протяжении четырех столетий, что уже само по себе указывает на определяющую роль неантропогенных причин) являются следствием воздействия суммы трех факторов [6].

Первый фактор, согласно предложенной модели, связан с незначительным, но систематическим ростом общего потока солнечной радиации в течение последних веков и последующим усилением парникового эффекта за счет увеличения содержания водяного пара в атмосфере. Этот вклад оценен авторами как плюс 0,077 °C/столетие и определяется тороидальной компонентой магнитного поля Солнца, порождающей яркие факельные поля, которые несут основную ответственность за рост солнечной постоянной.

Второй фактор, оцениваемый величиной минус $0,040$ °C/столетие, связан с вариациями потока частиц, извергаемых корональными дырами на Солнце. Мощность корональных дыр, по де Ягеру, связана с полоидальной компонентой глобального магнитного поля светила. Неоднородности межпланетного магнитного поля, вмороженного в солнечный ветер, рассеивают и ослабляют приходящий на Землю поток энергичных частиц галактического происхождения, вызывая так называемые Форбуш-понижения. Соответственно, ослабляется процесс облакообразования за счет уменьшения числа ядер конденсации в атмосфере, что, в свою очередь, должно приводить к падению альбедо Земли и росту ее поверхностной температуры. Наблюдаемое долговременное уменьшение параметров потока солнечного ветра должно приводить к систематическому росту облачного покрова и падения поверхностной температуры Земли. Таким образом, указанные факторы действуют в противоположных направлениях, но не полностью компенсируют (во всяком случае, в нынешнюю эпоху) друг друга; в итоге мы наблюдаем небольшой положительный тренд температуры.

Следует отметить, что детали механизма второго фактора остаются неизвестными. Возможно, здесь имеют значение изменения в геомагнитном поле, вызываемые геоэффективными солнечными процессами, поскольку геомагнитное поле также влияет на проникновение в атмосферу Земли энергичных частиц.

Наконец, третий фактор связан с собственными климатологическими процессами на Земле и оценивается в настоящее время величиной плюс $0,051$ °C/век. В совокупности три выделенных фактора обеспечивают наблюдаемый рост температуры плюс $0,087$ °C/век, из которых, согласно модели де Ягера, вклад Солнца составляет 41 %, но, видимо, может меняться в зависимости от соотношения влияния всех трех факторов в конкретный момент времени.

Можно ли оценить величину вариаций конкретных проявлений солнечной активности, влияющих на эффективность первых двух отмеченных факторов? Применим следующий подход. В качестве основной формы солнечной активности, отвечающей за действие солнечных геоэффективных факторов, будем рассматривать комплексы активности (КА) на Солнце [7]. Комплексами активности (КА) назовем крупномасштабные магнитные структуры на Солнце, для которых характерно длительное (минимум три солнечных оборота) существование солнечных пятен на одном и том же участке солнечной поверхности в кэррингтоновой системе гелиографических координат. Для КА характерны многократные появления новых порций магнитного потока в виде активных областей (АО) и сложные многоярусные системы разновозрастных магнитных петель, поднимающихся в корону. Взаимодействие (пересоединения) в этих системах порождает сильные токи и мощные выделения энергии магнитных полей в виде солнечных вспышек. Следуя логике де Ягера, мощность КА на Солнце определяется тороидальной компонентой глобального магнитного поля Солнца. Заметим, что КА вносят основной вклад в повышение общего потока в

максимумах солнечной активности, поскольку именно высокая площадь обширных ярких факельных площадок КА дает основной избыток излучения по сравнению с фоновым уровнем.

После распада пятен КА эволюционные трансформации их магнитных полей приводят к формированию корональных дыр, являющихся источниками высокоскоростных геоэффективных потоков солнечного ветра [8] и соответствующих возмущений геомагнитного поля, способных оказывать влияние на процессы вторжения энергичных частиц в верхнюю атмосферу.

Полярный дрейф остатков магнитных полей АО и в первую очередь крупных АО в составе КА, приводит в конечном итоге к образованию обширных корональных дыр на полюсах Солнца, которые также являются источниками солнечного ветра, определяющего условия распространения космических лучей в магнитосфере. Согласно де Ягеру, мощность истечения частиц из полярных корональных дыр определяется величиной полюидальной компоненты глобального магнитного поля Солнца, что, с точки зрения авторов, не вызывает возражений.

Таким образом, можно констатировать, что КА на всех этапах эволюции могут рассматриваться как основные источники геоэффективных излучений Солнца [9–11]. Это означает, что именно долгопериодические изменения параметров КА на Солнце могут оказаться наиболее вероятной причиной долговременных трендов в параметрах климата Земли, если модель солнечного влияния (в варианте модели де Ягера либо других моделей) верна. В связи с этим проблема восстановления информации о деятельности КА в прошлом, как основных структур, отвечающих за геоэффективную деятельность Солнца (в том числе, за ее воздействие на земной климат) приобретает особое значение. В настоящей работе рассмотрена одна из частных задач в рамках решения данной проблемы – вопрос о существовании КА в периоды так называемых гранд-минимумов солнечной активности. Выдвинута гипотеза о том, что КА возникали на Солнце даже в эти специфические периоды.

Солнечная активность и ее гранд-минимумы

Наиболее заметные проявления КА на Солнце – это, несомненно, солнечные пятна, входящие в их состав. Непосредственные телескопические наблюдения солнечных пятен продолжаются немногим более 400 лет, при этом достоверный ряд относительных чисел пятен (число Вольфа) определяется только начиная с 1849 г. [12]. Восстановление параметров солнечной активности в далеком прошлом (например, [13–15]) представляет собой сложную задачу, не всегда адекватно решаемую [16]. Помимо отдельных наблюдений солнечных пятен невооруженным глазом, зафиксированных главным образом в восточных летописях [17], для анализа используются данные о наблюдавшихся полярных сияниях, содержании космогенных изотопов углерод ^{14}C , ^{10}Be в природных архивах типа годичных колец деревьев, полярных льдов, кораллов, глинах и т. д. [18]. Эти данные косвенно отражают уровень солнечной активности в соответствующие периоды времени.

Согласно многочисленным косвенным данным (прежде всего, по вариациям содержания космогенного радиоуглерода ^{14}C в кольцах деревьев и изотопа ^{10}Be в кернах полярного льда, которые зависят от модулирующего воздействия уровня солнечной активности на поток поступающих на Землю галактических космических лучей), солнечная активность, по крайней мере, четыре раза находилась в состоянии глубокой депрессии за последние 400 лет [19–20] – в минимумах Вольфа (1280–1350 гг.), Шперера (1420–1540 гг.), Маундера (1645–1715 гг.) и Дальтона (1790–1830 гг.). Расширяя анализируемый период, к этому списку следует добавить минимум Оорта (1010–1050 гг.) [21] (рис. 1). Самым значительным минимумом из перечисленных считается минимум Маундера [22–23].

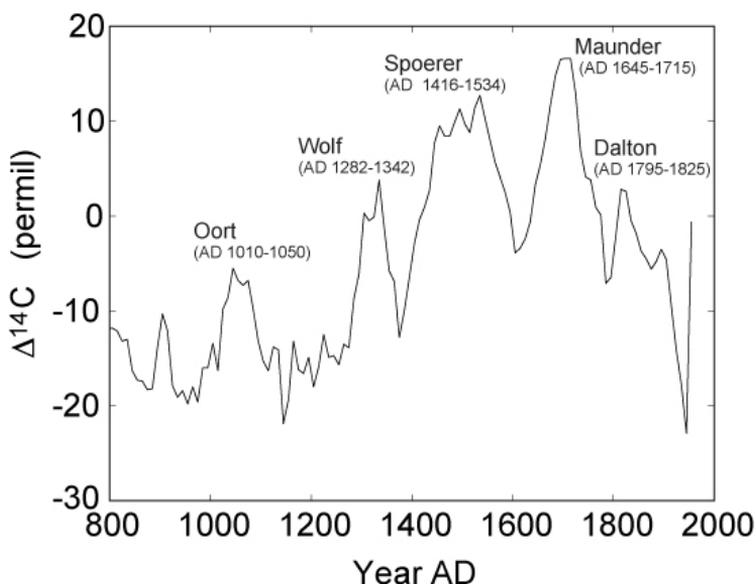


Рис. 1. Глобальные минимумы солнечной активности, определенные по концентрации изотопа радиоуглерода ^{14}C (по Miyahara et al., [21])

Указанные минимумы солнечной активности называют глобальными [24], или гранд-минимумами [25]. Выделяются два типа гранд-минимумов исходя из их глубины и продолжительности: более глубокие, но короткие (типа Маундера) и более продолжительные (типа Шперера), [26]. Обсуждается вопрос о неглубоком минимуме Гневывшева на рубеже XIX–XX вв. [27–28] и даже очередном гранд-минимуме в настоящую эпоху, возможно, начавшемся с минимума, разделяющего 23-й и 24-й циклы Швабе – Вольфа [2; 21; 28–30].

Вопрос о существовании КА в периоды глобальных минимумов представляется важным (в контексте проблемы генерации геоэффективных возмущений в эти периоды) и сложным, поскольку вывод может быть сделан только с использованием косвенных данных.

КА в периоды гранд-минимумов. Методика анализа

Могут быть предложены следующие подходы для решения вопроса.

1. *Анализ прямых наблюдений.* Для этого должны быть использованы исторические данные о наличии либо отсутствии крупных долгоживущих групп солнечных пятен во время гранд-минимумов, поскольку известно, что в КА развиваются преимущественно наиболее крупные группы пятен [31]. Кроме того, дополнительную информацию может дать изучение характера изменений чисел Вольфа в течение цикла. В работе [7] показано, что параметр «мощность ядер КА», отражающий степень запятненности центральных частей КА, и среднемесячные числа Вольфа коррелируют с коэффициентом корреляции 0,86. Импульсные флуктуации чисел Вольфа с характерным периодом от 6 до 14 кэррингтоновых оборотов, по-видимому, обусловлены аналогичным поведением параметров КА. Так, подробный анализ развития КА в начале 24-го цикла показывает, что импульсный характер изменений W практически полностью определяется вариациями индексов КА. Ядра КА возникают квазисовременно (в течение 1–2 солнечных оборотов), развиваются синхронно и в течение 2–3 оборотов исчезают. Среднемесячные числа Вольфа практически воспроизводят тот же характер временного хода, формируя импульсы продолжительностью 6–8 оборотов Солнца [7].

На более поздних фазах циклов (примеры 21–23-го циклов Швабе – Вольфа) картина становится менее регулярной, однако импульсы в развитии КА по-прежнему наблюдаются. Поскольку на околоразмаксовой стадии цикла нарастают и общее число ядер КА, и продолжительность жизни ядер КА [10], соответственно, увеличивается продолжительность (до 11–16, в среднем 13 оборотов, [10; 32]) и усложняется структура каждого импульса.

Если считать, что волнообразный (импульсный) характер развития цикла связан с вкладом КА, то обнаружение подобных импульсов в циклическом ходе значений чисел Вольфа может стать аргументом в пользу тезиса о существовании КА в изучаемый период времени.

Заметим, что есть яркие примеры появления индивидуальных крупных вспышечноактивных групп пятен, которые нельзя по формальным признакам отнести к разряду КА (например, АО № 11158 отличалась большой площадью и высокой вспышечной активностью, – здесь в период с 13 по 22 февраля 2011 г. произошли 57 вспышек рентгеновского класса C, 5 вспышек класса M и одна вспышка класса X2.2). Подобные примеры наблюдались и в 21–23-м циклах активности. Такие структуры, несомненно, могут внести заметный вклад во вспышечный индекс и в индекс суммарной площади пятен и, согласно методике, используемой, например, в работах [33–34], интерпретироваться как проявления КА. В действительности это совсем иной класс явлений.

Тем не менее, в контексте анализа, выполняемого в настоящей работе, существенен вывод о том, что импульсный характер развития солнечной активности, выраженный в особенностях временного хода среднемесячных

чисел Вольфа, индексов площади и вспышек, полностью ([33–34]), либо частично, но в значительной степени, определяется именно особенностями развития КА.

На рис. 2 приведена зависимость суммы максимальных чисел пятен во всех АО, входящих на данном обороте в состав КА, от суммы максимальных площадей пятен, наблюдавшихся в этих АО на том же обороте, по данным текущего 24 цикла. Поскольку в ядрах КА, как правило, развиваются группы пятен с повышенной площадью [31], а число пятен в таких группах быстро растет с площадью, оказывается, что вклад в число Вольфа у КА становится значительным. Судя по рис. 2, при значениях площадей пятен, входящих в КА, превышающих 200 м. д. п. (типичная ситуация), в подавляющем большинстве случаев максимальное число пятен в ядре КА почти всегда превосходит 10 и может лежать в пределах от 10 до 40. Соответствующий вклад в число Вольфа увеличенного количества индивидуальных пятен в одной АО аналогичен вкладу от появления дополнительно 1–3 короткоживущих групп пятен на солнечном диске. Поэтому с ростом площади пятен в КА вклад в число Вольфа компоненты пятнообразовательной деятельности, связанной с КА, растет опережающими темпами по сравнению со стохастической компонентой, для которой характерно небольшое максимальное число пятен (как правило, до 10), приходящихся на одну группу. Это обстоятельство можно рассматривать как довод в пользу гипотезы о том, что импульсы активности, отмечаемые в циклических кривых, описывающих временной ход среднемесячных чисел Вольфа, связаны преимущественно с вкладом КА. Для которых характерны крупные пятна, а, следовательно, и большое число индивидуальных пятен (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость суммы максимальных чисел пятен в АО, входящих в состав КА на данном обороте, от суммы максимальных площадей пятен в этих же АО. По данным о первых 10 КА в 24 цикле

2. *Анализ косвенных данных.* Здесь может использоваться набор признаков, связанных с мощными геоэффективными событиями на Солнце, как правило, ассоциируемых с КА, – полярные сияния как следствия мощных вспышек, происходящих преимущественно в КА, и т. д.

Применим последовательно эти подходы к глобальным минимумам за последние 400 лет (минимумы Маундера и Дальтона), протекавшим в телескопическую эпоху.

КА в минимуме Маундера (1645–1715 гг.)

Ход солнечной активности, выраженный в числах Вольфа, приведен на рис. 3. По крайней мере, два глубоких гранд-минимума (Маундера и Дальтона) здесь четко просматриваются.

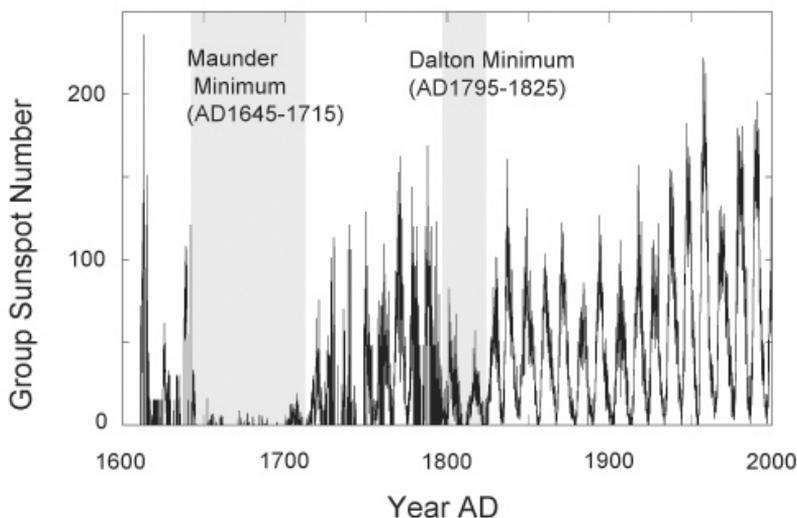


Рис. 3. Циклы солнечной активности, начиная с 1610 г. Гранд-минимумы Маундера и Дальтона показаны цветными полосами (по Hoyt, Schatten, [14])

Существуют ли прямые либо косвенные данные, свидетельствующие в пользу существования КА на Солнце во время минимума Маундера?

На первый взгляд, это маловероятно. В обзоре [35] приведены результаты анализа наблюдений солнечных пятен, выполненных с помощью телескопов и камер-обскур в этот период. Указано, что наблюдатели Солнца отмечали полное отсутствие пятен на протяжении длительных интервалов времени в эпоху минимума Маундера при неплохом покрытии наблюдениями этого периода. Крайне низкий уровень пятенной активности, согласно ряду Шоува [13], а также значительный рост концентрации радиоуглерода ^{14}C в этот период позволяют предположить, что на протяжении нескольких десятилетий на Солнце не наблюдались мощные долгоживущие группы пятен, типичные для КА. Тем не менее, ситуация не столь проста.

В каталоге [17] систематизированы сообщения из китайских и корейских летописей и других источников, отражающих отдельные наблюдения пятен на Солнце в период до 1684 г. (середина минимума Маундера). Приведем отдельные сообщения из указанного каталога (в кавычках) и наши комментарии к ним.

1647. «Фигура, похожая на меч, видна на Солнце». При наблюдениях невооруженным глазом (источник китайский, в Китае еще не было телескопов), на меч может походить длинная цепочка как минимум из двух групп пятен, включающая отдельные крупные пятна.

1647, 28 июля. «На Солнце видна звезда». Это сообщение сложно интерпретировать, поскольку неизвестен точный контекст этого китайского свидетельства, но вряд ли речь идет о яркой детали. Если деталь на Солнце темная, напоминающая звезду (лучистая), то речь может идти о крупном симметричном пятне с протяженной полутенью. С другой стороны, если речь идет о яркой детали (белой вспышке), то ее мощность для наблюдений невооруженным глазом должна быть чрезвычайно высокой. Пример наблюдения белой вспышки в период минимума Маундера приведен ниже. Отметим, что белые вспышки в последние десятилетия XX в. наблюдались почти исключительно в КА.

1648, 16 января. «Темные пятна видны на Солнце».

1648, лето. «На Солнце видна звезда».

1650, 25 октября, после полудня. «Инструмент для измерения риса виден на Солнце». Сложно интерпретировать конфигурацию наблюдавшихся пятен; вероятно, она напоминала образование сложной формы (не просто штрих или темная точка, возможно, темное кольцо, подобное сложной АО в октябре 2003 года (рис. 4).

1655, 30 апреля. Около 4 часов после обеда. «На Солнце присутствуют темные пятна».

1656, 26 января. «Черное пятно (черные пятна?) видно (ы) на Солнце».

1659, 12 июня. «На Солнце было черное легкое мерцание». По-видимому, речь идет о группе (или группах) небольших пятен, чья функция видимости была на грани разрешающей способности глаза наблюдателя.

1660, 22 мая. «Черное испарение (извержение?) на Солнце». Это корейское сообщение подтверждено европейским наблюдателем Робертом Бойлем: 25 мая 1660 г. наблюдалось пятно.

1665, 15 февраля. «На Солнце было черное легкое мерцание».

1665, 20 февраля. «Два черных пятна на Солнце,двигающиеся на протяжении длительного времени».

1665, весна. «На Солнце были черные пятна, мерцающие как челноки».

1665, 27 августа. «На Солнце видна звезда».

1666, 4–5 сентября. «Черное испарение (извержение?) на Солнце».

1684, 16–18 марта. «Инструмент для измерения риса виден на Солнце».

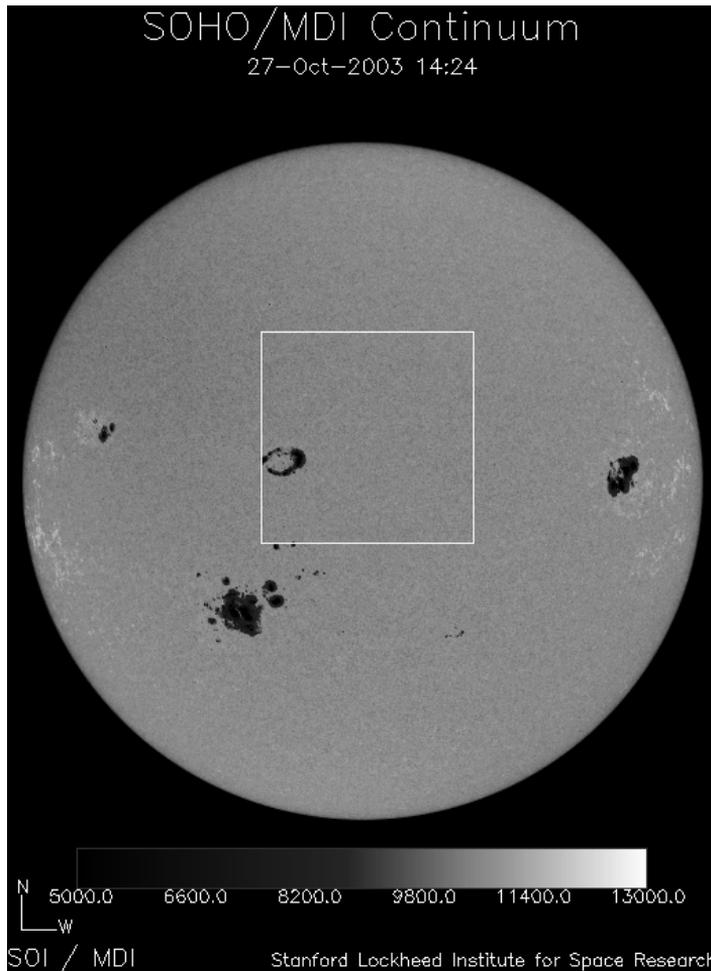


Рис. 4. Мощные АО на Солнце 27 октября 2003. АО в центре изображения (в квадрате) имеет форму кольца. Космический аппарат SOHO

Очевидно, все указанные случаи отражают присутствие на Солнце крупных групп пятен, отличающихся либо сравнительно большой площадью, либо большим количеством небольших пятен, либо обоими признаками. Заметим, что указанные признаки характерны прежде всего для КА. В работе [17] приводятся доводы в пользу того, что невооруженным глазом на Солнце отмечались не только крупные пятна, но и конгломераты небольших пятен.

В работе В. С. Прокудиной [36] приведены данные, собранные Р. Вольфом в середине XIX в. Здесь указано, что солнечные пятна наблюдались, в частности, в следующие временные интервалы: 27 апреля – 9 мая 1660, 9 августа 1671, май – июль, а также ноябрь – декабрь 1676, январь 1677, февраль 1678, 1680, 1681, 1684, 1688, 1695 гг.

Следует особо отметить, что некоторые группы пятен наблюдались в течение нескольких кэррингтоновых оборотов. Поскольку лишь единичные группы пятен в действительности обладают такими временами жизни [24], реально речь может идти о постоянном пятнообразовании на одних и тех же участках солнечной поверхности, что соответствует определению ядер КА [10–11]. Реккурентные группы пятен отмечены в октябре-декабре 1676 г., мае-июне 1680 г., апреле-июне 1681 г., мае-июне 1684 г., сентябре-ноябре 1688 г. Примеры зарисовок пятен приведены на рис. 5.

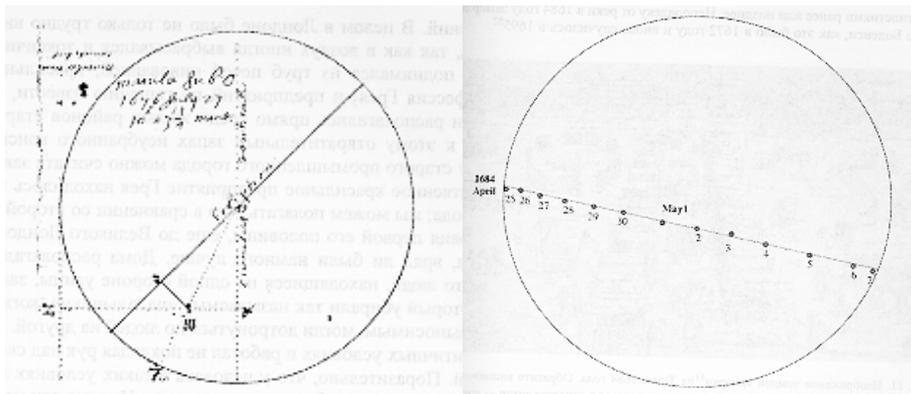


Рис. 5. Солнечные пятна в 1676 (слева) и 1684 гг (справа). Зарисовки Дж. Флемстида (по Сун, Яскелл, [23])

Анализ восстановленных рядов данных, отражающих поведение солнечной активности в период минимума Маундера, позволил сделать следующие выводы [37]. Солнечные пятна, несомненно, наблюдались и в этот период, хотя их было немного, и они появлялись с большими перерывами (например, в 1645–1651 гг. пятна не наблюдались [14, 23]). Солнечная цикличность не прекращалась, хотя сильно уменьшилась по амплитуде. Сильное впечатление производит сообщение о наблюдении одного из самых мощных проявлений солнечной активности – белой вспышки на Солнце 27 декабря 1705 г. («flash of lighting» возле солнечного пятна), выполненном Стефеном Грэм в Кентербери [35]. (Следующая по времени знаменитая белая вспышка была зафиксирована лишь 154 года спустя Кэррингтоном и Ходжсоном 1 сентября 1859 г., [35]). По-видимому, можно говорить о существенной неоднородности ситуации во время минимума Маундера: на фоне общей депрессии солнечной активности имели место отдельные, в том числе мощные, импульсы увеличения активности.

Обратимся к историческим сведениям о полярных сияниях в период минимума Маундера. Отметим, что полярные сияния суть наиболее заметные природные явления, фиксируемые в летописях издавна. Есть свидетельства о них и в XVII в. Хронология, составленная нами по многочисленным источникам [38], содержит по крайней мере три свидетельства о наблюдениях таких явлений в эту эпоху:

- 1661, 21 марта – полярные сияния в Лондоне.
- 1669, 4 января – полярные сияния в Астрахани.
- 1688, 30 октября – полярные сияния в Англии.

Последнее перед началом минимума Маундера, согласно хронологии [38], наблюдалось 10 марта 1643 г. в Южной Англии. Наконец, 6 марта 1716 г. в Европе снова наблюдались сильные полярные сияния, как бы знаменуя окончание минимума Маундера.

Особенность хронологий такова, что если сообщения о полярных сияниях нет, это не означает, что их действительно не было (могли отсутствовать записи по субъективным причинам, была плохая погода и т. д.). В то же время имеющимся сообщениям о наблюдениях сияний нет оснований не доверять. Возникновение полярных сияний в период минимума Маундера свидетельствует о том, что геоэффективные события на Солнце в это время все-таки происходили. Отметим, что, например, в 1688 г. наблюдались как солнечные пятна [36], так и полярные сияния [38].

По-видимому, может быть добавлен и следующий вывод: в течение минимума Маундера на Солнце наблюдались, как минимум иногда, и КА, включавшие в себя крупномасштабные и долгоживущие системы из нескольких крупных АО. Соответствующие группы пятен наблюдались даже невооруженным глазом, некоторые системы существовали, как минимум, на протяжении 2–3 солнечных оборотов. В некоторых случаях наблюдались полярные сияния, свидетельствовавшие о вторжении в верхнюю атмосферу Земли геоэффективных потоков солнечных частиц. С точки зрения авторов, их источниками с наибольшей вероятностью являлись КА.

КА в минимуме Дальтона (1795–1825 гг.)

В отличие от минимума Маундера, в период минимума Дальтона проводились более регулярные наблюдения солнечных пятен, хотя до начала подлинного ежедневного мониторинга, начатого Р. Вольфом в 1843 г., еще оставались десятилетия. Тем не менее, ряд среднемесячных значений чисел Вольфа на этот период восстановлен (рис. 6).

Рассмотрим изменения среднемесячных чисел Вольфа в ходе развития циклов Швабе–Вольфа 5–7 (рис. 6). Могут быть замечены всплески (импульсы), аналогичные описанным в работе [7] для начала цикла № 24.

Анализ этих циклов затруднен, поскольку наблюдения солнечных пятен в эту эпоху еще не были регулярными, и некоторые параметры циклов могут оказаться артефактами. В частности, вызывает интерес соотношение длительностей фаз роста и фаз спада для всех рассматриваемых циклов. Все известные циклы, наблюдавшиеся после начала квалифицированного мониторинга Р. Вольфом в середине XIX в., отличались относительно короткой фазой роста и более длинной фазой спада с типичным соотношением 1 : $\sqrt{2}$. Рисунок 6 демонстрирует либо равенство этих фаз, либо обратное соотношение, что, вероятно, является артефактом. Тем не менее, отдельные детали кривых (флуктуации среднемесячных значений), возможно, отражают реальную картину. Для нашего анализа важен сам факт наличия флуктуаций.

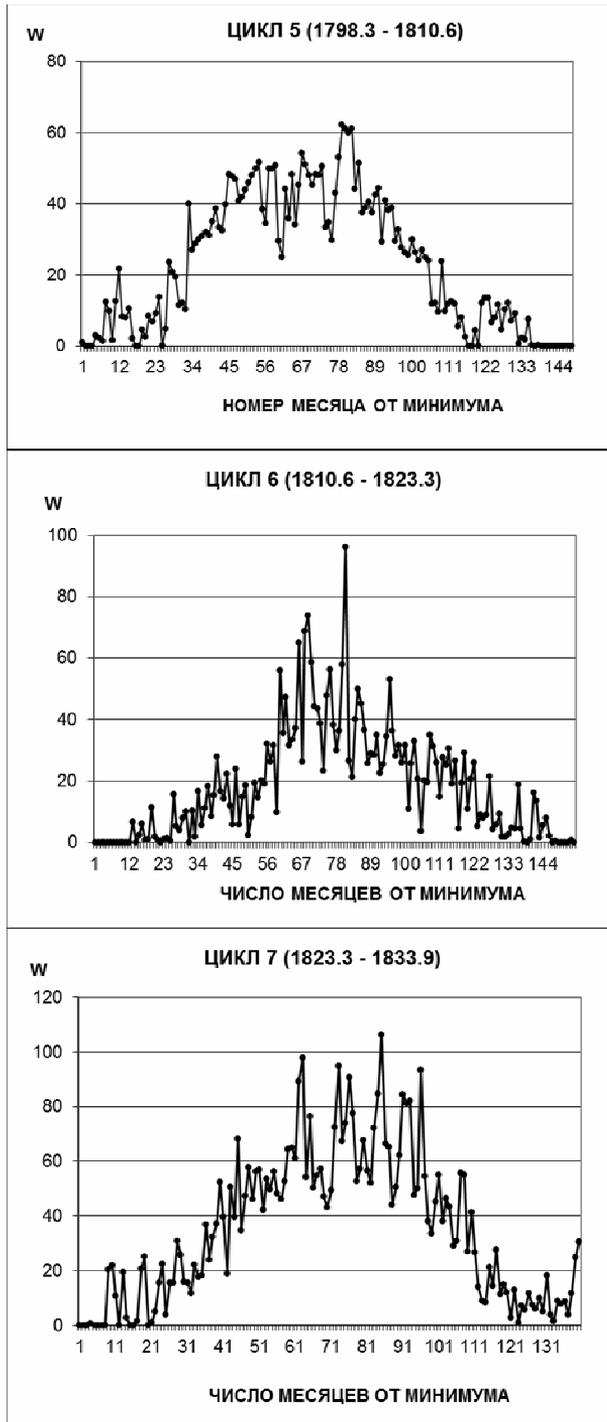


Рис. 6. Среднемесячные числа Вольфа во время минимума Дальтона (1795–1825 гг.), циклы солнечной активности № 5 (а), 6 (б) и 7 (в)

Для цикла Швабе–Вольфа № 5 ярко выраженные импульсы почти не наблюдаются, типичная амплитуда флуктуаций среднемесячных значений чисел Вольфа – порядка 10, рис. 6, *а*. Однако в конце фазы максимума цикла выделяется импульс большой амплитуды (около 30 единиц и продолжительностью с 76-го по 85-й месяц после предыдущего минимума). Такое событие типично для деятельности КА.

В цикле № 6 (рис. 6, *б*) наблюдаются, по крайней мере, два высокоамплитудных импульса активности (63–74 месяцев после минимума, амплитуда более 40, и 78–88 месяцев после минимума, амплитуда более 60). Достаточно большая амплитуда колебаний среднемесячных чисел Вольфа – резкие возрастания на 60 единиц (рис. 6, *б*, *в*) – успешно объясняется тенденцией, когда сразу несколько КА формируется одновременно на разных долготях (см., например, [10, 39]). Отметим, что резкое падение числа Вольфа в течение одного оборота и возвращение на следующем обороте к высоким значениям – ситуация маловероятная и связана, скорее, с качеством наблюдений, чем с реальностью. Поэтому локальное падение числа Вольфа на 83-м месяце после минимума не учитывалось: учитывались падения лишь в случае систематических уменьшений на протяжении нескольких оборотов.

В цикле № 7 просматривается ярко выраженный импульс (56–70-й месяцы после минимума, амплитуда импульса 35) на фазе максимума цикла, рис. 6, *в*. Следующие импульсы (70–82-й месяцы после минимума, амплитуда 30, а также 82–88 месяцев после минимума, амплитуда более 50) также выглядят, как типичное проявление многоядерных КА на фазе максимума цикла [10].

На рис. 7 приведен пример развития цикла № 22 в единицах среднемесячных чисел Вольфа. Общая высота цикла существенно выше, чем у циклов 5–7, но форма кривой, описывающей развитие цикла в эпоху максимума, оказывается сходной с формой для цикла № 7. В обоих случаях наблюдаются контрастные импульсы продолжительностью 3–5 месяцев. Во время развития этого цикла специальный мониторинг КА уже велся [32], и связь импульсов активности, выраженных в числах Вольфа, с деятельностью КА в этот период можно считать доказанной. Естественно предположить, что в цикле № 7 наблюдалась аналогичная картина (существовали КА).

Указанные аналогии позволяют предполагать, что наиболее вероятным объяснением высокоамплитудных флуктуаций среднемесячных чисел Вольфа является возникновение КА и их существование на протяжении нескольких оборотов.

Хронология [38] содержит сообщения о двух полярных сияниях, наблюдавшихся во время минимума Дальтона в Иркутске – в 1805 г. (дата неизвестна), максимум 5-го цикла Швабе–Вольфа, и 23 января 1807 г. Любопытно, что в январе 1807 г. (106 месяцев после минимума, фаза спада цикла) среднемесячное число Вольфа составило всего 12. Вероятнее всего, ситуация была близка к событиям в декабре 2006 г., когда перед началом эпохи минимума последний КА 23-го цикла, основу которого составляло одиночное долгоживущее пятно, при низком числе Вольфа произвел мощные вспышки, сопровождавшиеся геомагнитной бурей и полярными сияниями [40–41].

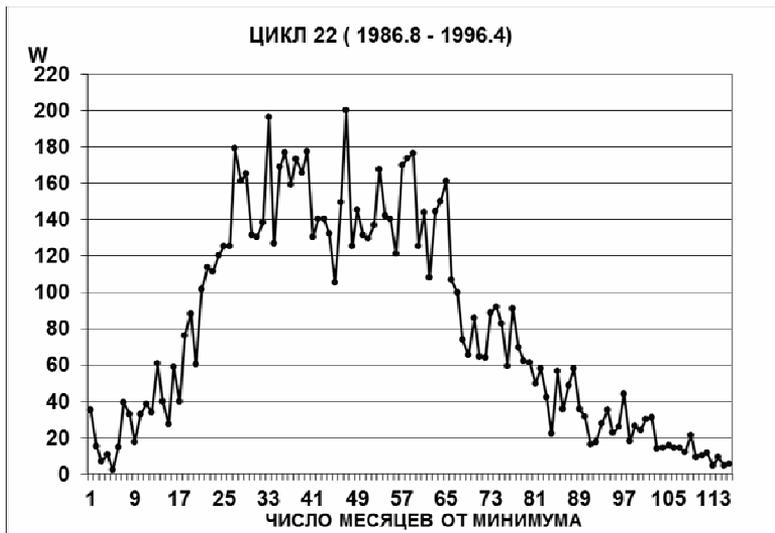


Рис. 7. Ход среднемесячных значений чисел Вольфа в течение 22-го цикла солнечной активности

Рассмотрим другие данные. В работе [42] показано, что концентрация космогенного изотопа ^{10}Be в слоях гренландского льда в периоды маундеровского и дальтоновского минимумов достоверно возрастает. Считается, что этот изотоп порождается космическими лучами галактического происхождения и модулируется уровнем солнечной активности (чем больше уровень солнечной активности, тем меньше концентрация ^{10}Be). Важно, что на концентрацию ^{10}Be не оказывает воздействия антропогенный эффект [43]. Ход концентрации ^{10}Be и уровня солнечной активности приведен на комбинированном графике (рис. 8), где отчетливо выражены минимумы Маундера и Дальтона, а также минимум Гневывшева на рубеже XIX и XX вв.

Обратим внимание на тонкую структуру кривых в районе указанных гранд-минимумов. Кривые отличаются сильными флуктуациями с характерным периодом порядка продолжительности цикла Швабе–Вольфа (около 11 лет). В частности, кривая, отражающая вариации концентрации ^{10}Be , выглядит изрезанной так же, как и кривая чисел Вольфа. Концентрация изотопа ^{10}Be во время периода Маундера заметно повышается на рубеже XVII–XVIII вв. (кривая ^{10}Be перевернута, левая ось ординат на рис. 8). Следует заметить, что минимум Маундера, определяемый по числам Вольфа, более продолжителен, чем по изотопу бериллия.

Тем не менее, видно, что на эти повышения накладываются локальные понижения с продолжительностью порядка длительности цикла и значениями, близкими к минимальным значениям кривой в обычную (неминимальную эпоху). Другими словами, цикличность обусловленных флуктуациями солнечной активностью вариаций концентрации ^{10}Be не исчезала во время гранд-минимумов.

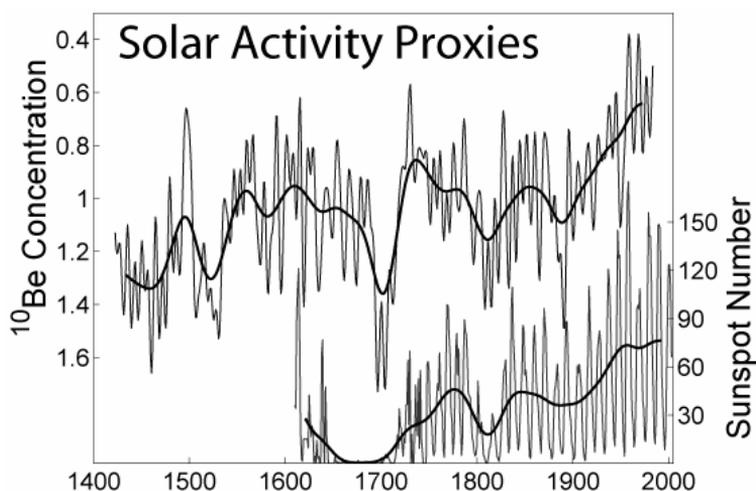


Рис. 8. Временные изменения концентрации изотопа ^{10}Be и уровня солнечной активности (по Beer et al., 1990, Васильев et al., 2002 [42–43])

При этом циклические вариации ^{10}Be происходили практически с обычной амплитудой, но флуктуировали при другом уровне фона. Может быть выдвинута гипотеза о том, что эти вариации связаны в первую очередь с возникновением на Солнце КА, как основных источников геоэффективных излучений, влияющих на уровень генерации изотопов в атмосфере Земли.

Заключение

Сопоставление циклических кривых среднемесячных чисел Вольфа и индексов мощности КА приводит к выводу, что именно возникновение и эволюция КА вносит основной вклад в феномен «импульсов» – всплесков пятнообразовательной деятельности в течение цикла [7]. Продолжительность импульса составляет 5–8 солнечных оборотов в начале цикла и может достигать 12–16 оборотов. Всего в течение цикла наблюдается 6–8 импульсов. Провал Гневешева (локальный спад активности), наблюдаемый в некоторых циклах на фазе максимума цикла, вероятно, связан с депрессией между двумя соседними импульсами, развивающимися на фазе максимума цикла, – как правило, между третьим (четвертым) и четвертым (пятым) импульсами. Эти импульсы, имеющие наибольшую амплитуду в цикле, являются причиной двухвершинной формы цикла. В период между этими импульсами КА на Солнце практически отсутствуют, наблюдается только спорадическая пятенная компонента [10].

Исходя из полученного результата, свидетельствующего в пользу гипотезы о том, что импульсы активности, отражающиеся во флуктуациях среднемесячных чисел Вольфа с амплитудой 30–60 единиц и продолжительностью 6–13 месяцев, связаны с квазисинхронным развитием нескольких КА на Солнце, могут быть сделаны следующие выводы.

1. Свидетельства наблюдателей, отмечавших крупные группы солнечных пятен невооруженным взглядом в период минимума Маундера, а также материалы телескопических наблюдений солнечных пятен в Европе и белой вспышки в 1705 г. в этот же период, указывают на то, что КА, как крупномасштабные долгоживущие структуры, возникали и в это время.

2. Циклы активности Швабе-Вольфа № 5, 6 и 7, наблюдавшиеся в течение минимума Дальтона, обладают теми же особенностями, что и другие циклы: в структуре цикла выделяются несколько импульсов во временном ходе среднемесячных чисел Вольфа. Это позволяет сделать вывод, что КА, по крайней мере, иногда, наблюдались и во время минимума Дальтона. Результат подтверждается тонкой структурой вариаций концентрации космогенного изотопа ^{10}Be в этот период.

3. Отдельные наблюдения полярных сияний во время гранд-минимумов Маундера и Дальтона позволяют предположить, что они были следствиями активных процессов в КА на Солнце.

По-видимому, как и другие проявления солнечной активности, КА в упомянутые периоды были угнетены, и отличались от аналогичных структур, наблюдаемых во время последних циклов. В то же время, по крайней мере, в отдельных случаях, проявления КА были полноценными, включая появления АО большой площади, позволявшие наблюдать пятна на Солнце невооруженным глазом, а также возможные вспышки и корональные выбросы вещества, сопровождавшиеся полярными сияниями на Земле.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 11–02–92202-Монг_а «Изучение комплексов активности и их проявлений в хромосфере и короне Солнца», госконтракта № 02.740.11.0576 «Исследование солнечных активных образований на основе комплекса обсерваторий Института солнечно-земной физики СО РАН и Иркутского государственного университета, подготовка научно-педагогических кадров в рамках НОЦ», а также проекта № 2.2.3.1/13693 «Исследование проявлений солнечной активности на фазе минимума и фазе начального роста цикла солнечной активности с использованием цифрового астрокомплекса астрономической обсерватории ИГУ» в рамках аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)».

Список литературы

1. Язев С. А. Глобальное потепление и вопросы научной методологии / С. А. Язев, К. Г. Леви, Н. В. Задонина // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 198–213.
2. Обридко В. Н. Циклы активности на Солнце и некоторые особенности 23 цикла / В. Н. Обридко // Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 9–18.
3. Обридко В. Н. Циклы солнечной активности и особенности 23-го цикла // Земля и Вселенная. 2011. – № 1. – С. 3–17.
4. Башкирцев В. С. Циклы активности на Солнце и звездах / В. С. Башкирцев, Г. П. Машнич. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 235–240.

5. *Дергачев В. А.* Циклы активности на Солнце и звездах / В. А. Дергачев, О. М. Распопов, Х. Юнгнер. С.Пб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 225–234
6. *Jager de C.* Quantifying and specifying the solar influence on terrestrial surface temperature / C. de Jager, S. Duhau, B. van Geel // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2010. – Vol. 72. – P. 926–937.
7. *Язев С. А.* Комплексы активности в циклах Швабе-Вольфа / С. А. Язев, А. В. Коротких, И. Г. Тарлюк // *Солнечно-земная физика.* – 2011. – Вып. 19. – в печати.
8. *Язев С. А.* Корональные дыры и комплексы активности // *Изв. Иркут. Гос. ун-та. Сер. Науки о Земле.* – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 226–241.
9. *Язев С. А.* Феномен комплексов активности на Солнце / С. А. Язев, В. И. Сидоров // *Труды X конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы».* – Иркутск : ИО ИСЗФ СО РАН, 2007. – С. 65–71.
10. *Язев С. А.* Комплексы активности на Солнце в 23 цикле активности / С. А. Язев // *Солнечно-земная физика.* – 2010. – Вып. 16. – С. 94–101.
11. *Язев С. А.* Комплексы активности на Солнце в 1980–2008 г. Комментарии к каталогу данных / С. А. Язев // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле.* – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 217–225.
12. *Ишков В. Н.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования / В. Н. Ишков, И. Г. Шибяев // *Изв. РАН. Сер. физ.* – 2006. – Т. 70, № 10. – С. 1439–1442.
13. *Schove D. J.* The sunspot cycle, 649 B. C. to A. D. 2000 / D. J. Schove // *Journal of Geophysical Research.* – 1955. – Vol. 60. – P. 127–146.
14. *Hoyt D. V.* Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction / D. V. Hoyt, K. H. Schatten // *Solar Physics.* – 1998. – Vol. 179, N 1. – P. 189–219.
15. Реконструкция физических параметров космической погоды на 400-летней шкале / Ю. А. Наговицын, Е. В. Милецкий, В. Г. Иванов, С. А. Гусева // *Косм. исслед.* – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 291–302.
16. *Огуцов М. Г.* Анализ качества современных реконструкций активности Солнца в доинструментальную эпоху // *Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления* : тр. X Пулков. Междунар. конф. по физике Солнца. – СПб. : ГАО РАН, 2006. – С. 139–146.
17. *Wittman A. D.* A catalog of non-telescopic sunspot observations / A. D. Wittman, Z. Xu // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1987. – Vol. 70. – P. 83–94.
18. *Наговицын Ю. А.* Солнечная активность двух последних тысячелетий: «Служба Солнца» в древнем и средневековом Китае / Ю. А. Наговицын // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 711–720.
19. *Крымский Г. Ф.* Космические лучи в прошлом / Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2002. – Т. 42, № 3. – С. 321–324.
20. *Kocharov G. E.* Paleoastronomy and cosmic rays // *Nuovo Cimento.* – 1996. – Vol. 19C, № 6. – P. 883.
21. Is the Sun Heading for Another Maunder Minimum? Precursors of the Grand Solar Minima / H. Miyahara [et al.] // *Journal of Cosmology.* – 2010. – Vol. 8. – P. 1970–1982.
22. *Eddy J. A.* The Maunder minimum / J. A. Eddy // *Science.* – 1976. – Vol. 192. – P. 1189.
23. *Сун В.* Минимум Маундера и переменные солнечно-земные связи / В. Сун, С. Яскелл.– М. ; Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, Ин-т компьютер. исслед., 2008. – 336 с.

24. *Витинский Ю. И.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца / Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин. – М. : Наука. Гл. изд. физ.-мат. лит., 1986. – 296 с.

25. *Mordvinov A. V.* Long-term changes in sunspot activity and its evolution in cycles 23,24 / A. V. Mordvinov, A. P. Kramynin // Циклы активности на Солнце и некоторые особенности 23 цикла. Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 85–92.

26. *Кичатинов Л. Л.* Модель переменяемости глобальных минимумов и максимумов в солнечном динамо / Л. Л. Кичатинов, С. В. Олемской // Солнечно-земная физика. – 2010. – Вып. 15. – С. 3–8.

27. *Рывин Ю. Р.* Основные характеристики амплитудных изменений магнитного поля по числам Вольфа и ряду Шоува за последние ~500 лет // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. – 1993. – Т. 70, вып. 6. – С. 1257–1264.

28. *Nagovitsin Yu. A.* Scenario of variations of solar activity level in the next decades: low cycles? / Yu. A. Nagovitsin // Циклы активности на Солнце и некоторые особенности 23 цикла. Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 99–106.

29. *Обридко В. Н.* Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов / В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг // Письма в астроном. журн. – 2009. – Т. 35, № 4. – С. 279–285.

30. *Язев С. А.* Переходная эпоха 23/24 циклов в контексте долговременных трендов солнечной активности / С. А. Язев // Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 197–204.

31. *Язев С. А.* К вопросу о ранней идентификации комплексов активности на Солнце / С. А. Язев, А. И. Рожина // Тр. IV съезда астроном. о-ва. – М., 1998. – С. 287–291.

32. *Банин В. Г.* ПДА в циклах солнечной активности / В. Г. Банин, С. А. Язев // Современные проблемы солнечной цикличности : конф., посвящ. памяти М. Н. Гневышева и А. И. Оля : труды. – СПб., 1997, С. 9–13.

33. *Рябов М. И.* Комплексы активности и их роль в аномальной активности северного и южного полушария Солнца / М. А. Рябов, С. А. Лукашук // Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2009. – С. 121–134.

34. *Рябов М. И.* Характеристики 23-го солнечного цикла и роль комплексов активности в развитии его вспыхивающих проявлений / М. И. Рябов, С. А. Лукашук // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 77–85.

35. *Vaquero J. M.* Historical sunspot observations: A review // Advances in Space Research. – 2007. – Vol. 40. – P. 929–941.

36. *Прокудина В. С.* Наблюдения солнечных пятен в период минимума Маундера // Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга. – М., 2011. – Т. 71. – С. 43–48.

37. *Наговицын Ю. А.* О солнечной цикличности в течение маундеровского минимума // Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления : тр. X Пулков. Междунар. конф. по физике Солнца. – СПб. : ГАО РАН, 2006. – С. 147–154.

38. Природно-климатические изменения в периоды глобальных минимумов солнечной активности / К. Г. Леви, Н. В. Задонина, С. А. Язев, В. И. Воронин, Р. М. Хантемиров, М. М. Наурзбаев. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2012 (в печати).

39. *Банин В. Г.* Комплексы активности на 1705–1709 оборотах / В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев // Солнечные данные. – 1988. – № 5. – С. 82–88.

40. *Савинкин М. Ю.* Уникальный комплекс активности на рубеже 2006–2007 гг. / М. Ю. Савинкин, В. И. Сидоров, С. А. Язев // Солнечно-земная физика / СО РАН, Ин-т солнечно-земной физики. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – Вып. 12 (125), т. 1. – С. 8–9.

41. *Savinkin M. Yu.* Unique complex of activity between 2006 and 2007 / M. Yu. Savinkin, V. I. Sidorov, S. A. Yazev // Geomagnetism and aeronomy. – 2009. – Vol. 49, N 8. – P. 1072 – 1075.

42. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity / J. Beer [et al.] // Nature. – 1990. – Vol. 347. – P. 164–166.

43. *Васильев С. С.* Проявление долговременных изменений солнечной активности и их связь с ~ 210 -летним циклом солнечной активности / С. С. Васильев, В. А. Дергачев, О. М. Распопов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 2. – С. 147–154.

Complexes of activity during grand solar minima

S. A. Yazev, K. G. Levi, N. V. Zadonina

Annotation. We have put forward and substantiated the hypothesis that complexes of activity, which are the main sources of geoeffective disturbances on the Sun, were developed, at least sometimes, during so-called grand minima of solar activity. This hypothesis is supported by the observation of 1) large sunspots by the naked eye and by telescopes during the said periods, 2) the white flare in 1705, and 3) aurora polaris, as well as by the pulse pattern of temporal variations in Wolf numbers with characteristic pulse duration from 6 to 13 months, typical for development of complexes of activity.

Key words: solar activity cycle, complexes of activity, Maunder minimum, Dalton minimum, geoeffective radiation.

Язев Сергей Артурович
кандидат физико-математических наук,
доцент

Иркутский госуниверситет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
директор астрономической обсерватории
ИГУ

*Институт солнечно-земной физики СО
РАН*
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
старший научный сотрудник
тел.: 8–9025–115–419

Задонина Наталья Витальевна
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент

*Национальный исследовательский
Иркутский государственный технический
университет*

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
научный сотрудник
тел.: (3952) 40–51–13

Леви Кирилл Георгиевич
доктор геолого-минералогических наук
член-корреспондент РАН

Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
заместитель директора по научной
работе

Иркутский госуниверситет
профессор
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1,
тел.: (3952) 42–45–62