

УДК 523.98

ГЛОБАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА НА ДЛИТЕЛЬНЫХ ВРЕМЕНАХ

© 2008 Ю. А. Наговицын¹

¹ Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук, Пулковое, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 20 августа 2007 г.; принята в печать 25 сентября 2007 г.

Изложены результаты применения нашего подхода к изучению поведения солнечной активности в прошлом, согласно которому:

— При реконструкции изменения солнечной активности, геомагнитных параметров и межпланетного магнитного поля в прошлом мы выделяем последовательные по длительности временные шкалы, которые естественным образом предоставляются возможностями наблюдательного материала, имеющегося в нашем распоряжении. Всего выделяются 4 шкалы: 150–200 лет, 400 лет, 1000 лет и 10000 лет.

— При построении рядов каждой последующей по величине временной шкалы в качестве опорных используются данные предыдущей.

— По возможности мы переходим от рядов традиционных статистических индексов к рядам физических параметров.

— При выведении соотношений между какими-либо параметрами солнечной активности, геомагнитной возмущенности и межпланетного магнитного поля учитывается дифференциальный характер связей на разных временных масштабах. Для этого применяются ранее предложенные методы MSR и DPS.

— Для верификации получаемых реконструкций применяется “принцип свидетелей”, использующий в качестве исходных независимые (иногда косвенные) данные.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная активность (СА) — это процесс циклических изменений глобального магнитного поля Солнца на различных временных масштабах. Говоря “глобальное магнитное поле”, мы в данном случае фиксируем факт того, что кроме цикла пятен на Солнце наблюдаются и цикл крупномасштабного (фонового) поля, образованного открытыми магнитными конфигурациями — корональными дырами, и цикл полярного поля, образованного как полярными корональными дырами, так и полярными факелами. Говоря же о “различных временных масштабах” изменений глобального магнитного поля Солнца и его компонентов, мы напоминаем, что кроме хорошо известного уже более полутора веков 11-летнего цикла (цикла Швабе-Вольфа) существуют и долгопериодические циклы СА: ~ 80–90 лет (цикл Гляйсберга), ~200 лет (цикл Зюсса), ~ 900 лет и больше [1]. Эти длительные циклы связаны с амплитудной модуляцией 11-летних циклов и приводят к картине СА, согласно которой на интервалах длительностью несколько столетий развиваются грандиозные экстремумы СА типа маундеровского минимума или максимума середины XX века. Термин “одиннадцатилетний цикл” заслуживает оговорки: во-первых, его

продолжительность сильно изменяется (от 7 до 17 лет), а во-вторых, закон Хейла устанавливает противоположное направление общего пятенного магнитного поля в каждом из полушарий Солнца в соседних 11-летних циклах, так что с физической точки зрения правильнее говорить о 22-летнем основном цикле на Солнце.

В XX в. накоплены данные о *текущем* влиянии СА на ряд земных процессов, и введено специальное понятие “Космическая погода” (“Space Weather”). В то же время обусловленность *длительных*, эпохальных геомагнитных и климатических изменений активностью Солнца остается до сих пор дискуссионной. Это связано, главным образом, с тем обстоятельством, что мы не располагаем надежными данными о поведении гео- и гелиофизических процессов на достаточно длительном интервале времени. Следовательно, временные ряды, описывающие эти процессы, необходимо реконструировать, т.е. разработать специальные подходы и методы моделирования, способы оценки достоверности получаемых моделей и сценариев. Полученные данные должны позволить нам проводить исследования в рамках проблемы “Космический климат” (“Space Climate”), занимающейся изучением *долгопериодических тен-*

денций *Космической погоды*, или, другими словами, закономерностей долговременных солнечно-земных связей.

Более конкретно, основными целями наших исследований мы видим следующие:

— Получение физически информативных комплексных данных о динамике СА, геомагнитного поля и межпланетного магнитного поля на различных пространственно-временных масштабах.

— Количественный и качественный анализ эволюции СА на основе реконструкции поведения различных компонент магнитного поля Солнца на длительных временах.

— Исследование прогностических сценариев вариаций активности Солнца на интервале нескольких десятков лет.

2. МЕТОД ВРЕМЕННЫХ ШКАЛ

Большая часть наших исследований в рамках обозначенной проблемы представляет собой специальное направление изучения долговременной динамики магнитного поля Солнца [2]. Основная решаемая задача — описание СА на разных временных шкалах, — с одной стороны, приближает нас к пониманию природы СА, а с другой — создает необходимую базу данных для исследований в области геофизики и солнечно-земных связей. В перспективе — сопоставление реконструкции СА на интервалах времени от нескольких сотен до десятков тысяч лет с климатической реконструкцией может продвинуть нас в понимании причин, вызывающих сильные изменения климата Земли.

Основу предлагаемого подхода составляет новое рассмотрение СА и солнечно-земных связей в плане “временных шкал”, выделяемых в соответствии с нашими возможностями использования для реконструкции того или иного наблюдательного материала. В применении к СА могут быть выделены следующие шкалы:

а) шкала 100-150 лет — прямые, регулярные в той или иной степени, наблюдения СА (геомагнитной активности и климатических параметров);

б) шкала 400 лет — эпизодические прямые наблюдения СА, [3] и др.;

в) шкала 1000-2000 лет — набор косвенных данных о солнечной активности (полярные сияния [1], пятна, замеченные невооруженным глазом [4]; радионуклиды в природных архивах [5–8]; археомагнитные данные [9]);

г) шкала 10000 лет — данные о концентрации радиоуглерода-14 [7, 8] и бериллия-10 [5, 6] в датированных образцах (кольцах деревьев и полярных льдах соответственно).

Оправданность и осуществимость такого подхода вытекает, с одной стороны, из выбранной логики исследования: для представления более продолжительных интервалов мы обладаем худшими возможностями, но нам подходит и более грубая информация, а с другой — каждая последующая по длительности шкала опирается на предыдущую как на эталонную, что необходимо для последовательной калибровки реконструкций.

Основное, к чему мы должны стремиться при описании СА на шкале а) — это составление однородных рядов, в том числе и для уже завершившихся, к сожалению, классических рядов индексов: цюрихского числа Вольфа и гринвичского — площади пятен [10, 11]. Именно на этой шкале мы сможем заложить основу перехода от статистических индексов (таких, как числа Вольфа) к физическим параметрам солнечного и геомагнитного поля.

Вторая шкала б) для составления реконструкций требует специальных методов, и они нами предложены [12, 13] — это методы MSR и DPS (подробнее см. ниже). Основное их содержание — учет мультимасштабных по времени связей процессов, позволяющий из рядов опорных индексов получать желаемые.

Шкала в) из-за косвенного характера имеющихся данных также требует специального рассмотрения. Мы предлагаем при ее исследованиях применять “принцип свидетелей” [13], т. е. опираться на весь комплекс имеющихся данных с их взаимной верификацией.

Шкала г) — наиболее трудная для исследования. Бериллиевые данные — из-за особенностей природного процесса попадания ^{10}Be с осадками из атмосферы в “ледовые архивы” — содержат в себе климатический фактор и поэтому вряд ли удобны для использования. Следовательно, у нас остается только один ряд радиоуглерода, и принцип свидетелей мы применить не можем. Тем не менее, рабочие модели поведения СА в Голоцене нам крайне важны. Мы предлагаем решение “обратной задачи баланса радиоуглерода” (термин — наш) на основе MSR метода в применении к ряду Стюйвера относительной концентрации ^{14}C за последние несколько тысяч лет. Первое приближение решения этой задачи опубликовано нами в работе [14]. Как представляется, такой подход к получению длительной реконструкции СА в сравнении с обычными т.н. *n*-резервуарными моделями [15], реализующими “прямую задачу”, более перспективен, поскольку не ограничивает нас априорным выбором числа резервуаров (которые иногда физически трудноразделимы в природе).

Основу нашей методологии реконструкции поведения СА в прошлом представляют подходы,

основанные на вейвлет-преобразовании и методе нелинейной динамики [12, 13].

Первый метод назван методом кратномасштабных регрессий, MSR (Multi-Scale Regression method) [13]. Он позволяет выявлять и учитывать возможные соотношения между рядами, имеющими различную связь для разных временных масштабов. Этот метод основан на построении, вообще говоря, многомерных моделей в пространстве вейвлет-коэффициентов рядов с последующим обратным вейвлет-преобразованием.

Мы знаем, что вейвлет-преобразование [16] временного ряда $f(t)$

$$[Wf](a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

дает возможность разложить его по базису, сформированному из ортогональных растяжений и сдвигов базового вейвлета — осциллирующей функции, локализованной как во времени, так и по частоте. Набор значений $a = 2^q$, $q = 1, 2, \dots, p$ позволяет представить $f(t)$ в виде p -компонентов, описывающих различные временные масштабы, с покрытием всей частотной области. Предположим, что мы хотим рассмотреть зависимость поведения функции $Y(t)$ от некоторого набора функций $X_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, m$. Согласно идее метода MSR, мы выполняем вейвлет-преобразование (1) для всех этих функций и рассматриваем для каждого из масштабов (компонентов вейвлет-преобразования) наивероятные (в смысле метода наименьших квадратов) приближения возможных функциональных соотношений в виде многомерной линейной модели:

$$[WY](2^q, t) = c_0^q + c_1^q [WX_1](2^q, t) + c_2^q [WX_2](2^q, t) + \dots + c_m^q [WX_m](2^q, t). \quad (2)$$

После нахождения приближений $[WY]^*(2^q, t)$, $q = 1, 2, \dots, p$ в (2) можно выполнить обратное вейвлет-преобразование, получив тем самым представление хода $Y(t)$ с помощью “факторов” $X_i(t)$, дающих, вообще говоря, различный вклад в регрессию для разных масштабов. Правила построения многомерных линейных моделей позволяют оценивать различия этого вклада, и мы можем говорить о достоверности обусловленности вариаций $Y(t)$ масштаба 2^q вариациями $X_i(t)$. Коэффициент корреляции (или какой-либо другой статистический показатель сходства) между полученным рядом $Y^*(t)$ и исходным $Y(t)$ будет свидетельствовать об успехе представления ряда $Y(t)$ на основе рядов $X_i(t)$.

В [12] предложен также другой метод, названный DPS-методом (method of Decomposition in terms of pseudo-Phase Space), который позволяет отслеживать мультимасштабные связи процессов. Он вытекает из известного подхода Такенса [17], установившего, в частности, связь динамических систем (а в контексте исследований мы полагаем, что изучаемые процессы могут быть описаны системами дифференциальных уравнений) с авторегрессионными моделями. Следуя основной идее DPS-метода, мы можем по временному ряду одного индекса, описывающего процесс солнечной активности, на основе разложения по его псевдофазовому пространству (с использованием т. н. “преобразования запаздывающих координат”) получить временной ряд другого индекса, полагая, что оба продуцируются одной и той же динамической системой. Пусть мы хотим получить связь процесса, параметризуемого наблюдаемой величиной $Y(t)$ с процессом, параметризуемым наблюдаемой $X(t)$. Разложим $Y(t)$ по компонентам псевдофазового пространства $X(t)$, т.е. найдем на совместном интервале существования рядов коэффициенты разложения a_i в форме:

$$Y(t) = Y_0 + a_1 X(t + n\Delta/2) + a_2 X(t + (n-2)\Delta/2) + \dots + a_{n/2} X(t) + \dots + a_{n+1} X(t - n\Delta/2) \quad (3)$$

(здесь для удобства в (3) сделана замена переменных $t \rightarrow t + n\Delta/2$) и применим эти коэффициенты на расширенном интервале, где значения $X(t)$ известны, а $Y(t)$ — нет. Получаем реконструкцию поведения $Y(t)$ на основе поведения $X(t)$. Близость модельных значений $Y(t)$ к реально наблюдаемым может говорить об успехе реконструкции.

То, что мы обсуждали в этом разделе, имело отношение, главным образом, к солнечной активности. Но, поскольку нас в конечном счете интересует проблема “Космический климат”, рассматривающая долгопериодические связи в системе “Солнце-Земля”, мы можем применить обозначенные выше подходы и методы к реконструкции поведения в прошлом геомагнитного и межпланетного магнитного поля (см. п. 4).

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛАХ

3.1. Шкала 150–200 лет

В нашей электронной базе данных ESAI (“Extended time series of Solar Activity Indices”) [13], которую можно найти по адресу

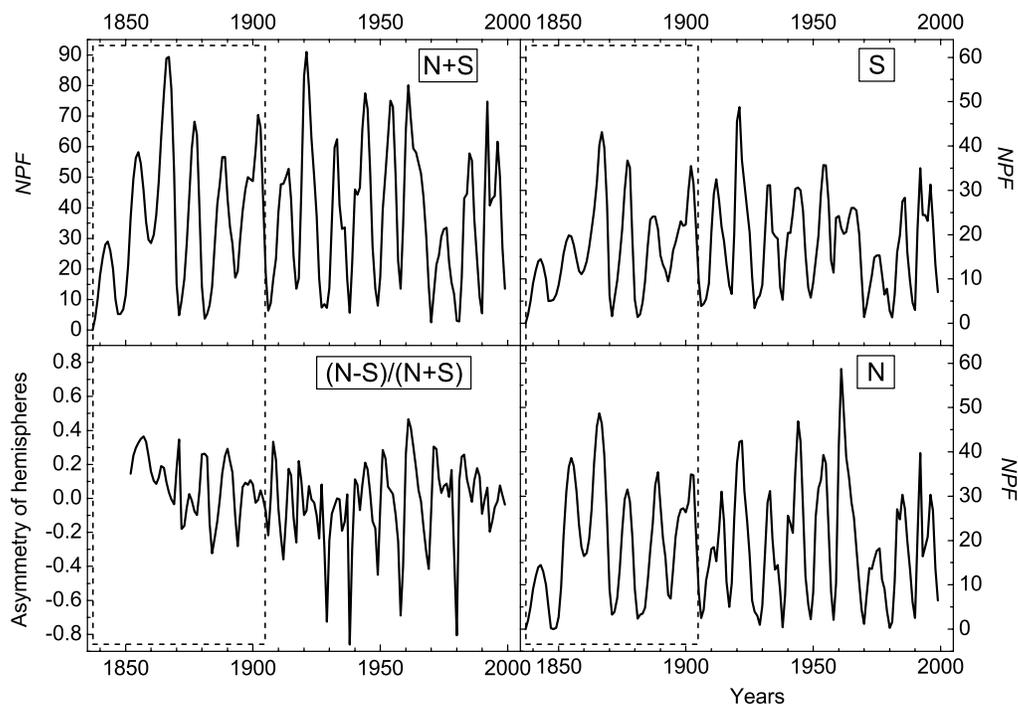


Рис. 1. Временные ряды числа полярных факелов (NPF) из базы данных ESAI. Левая верхняя панель — суммарные по диску значения; правые панели — NPF для южного S и северного N полушарий; левая нижняя панель — величины северо-южной асимметрии активности. Ограниченные штрихами области — продленные нами ряды.

<http://www.gao.spb.ru/database/esai>, размещены, в частности, ряды индексов, продленные нами на шкалу 150–200 лет путем реставрации догринвичских и доцюрихских наблюдений XIX века. Особое внимание было уделено состыковкам систем наблюдений разных обсерваторий. В ESAI можно найти:

- Ряд среднемесячных и среднегодовых площадей солнечных пятен в гринвичской системе, продленный в прошлое на 1821–1873 гг. (были использованы наблюдения Швабе, Кэррингтона, Деларю, Шперера).

- Ряд среднегодовых значений северо-южной асимметрии пятнообразования, продленный на 1854–1873 гг. (наблюдения Кэррингтона и Деларю).

- “Синтетический” ряд среднегодовых чисел полярных факелов в системе Маунт-Вилсон для 1837–1999 гг., полученный путем объединения рядов обсерваторий Гринвич, Лион, Кодайканал, Токио, Цюрих, Кисловодск и Маунт-Вилсон.

- Ряд среднегодовых значений северо-южной асимметрии полярной активности для 1852–1999

гг. по наблюдениям тех же обсерваторий, что и в предыдущем пункте.

Таким образом, для шкалы 150–200 лет мы сейчас имеем значения индексов, характеризующих действительно глобальную пространственно-временную структуру СА, в том числе и для полярных зон (наши знания о которых до последнего времени были явно недостаточны). На рис. 1 для примера приведены ряды из ESAI, характеризующие как раз полярную активность Солнца в 1835–2000 гг.

3.2. Шкала 400 лет

Для этой шкалы мы располагаем только рядом Хойта-Шаттена относительного числа групп пятен и рядом Вольфа относительного числа пятен, продленным нами с помощью “нелинейной модели” [18] на годы XVII века.

В работе [19] было показано, что числа Вольфа W и относительные числа групп пятен Хойта-Шаттена GSN представляют собой физически различающиеся индексы солнечной активности, и их сравнение между собой, а тем более преимущественный выбор одного из них для дальнейших

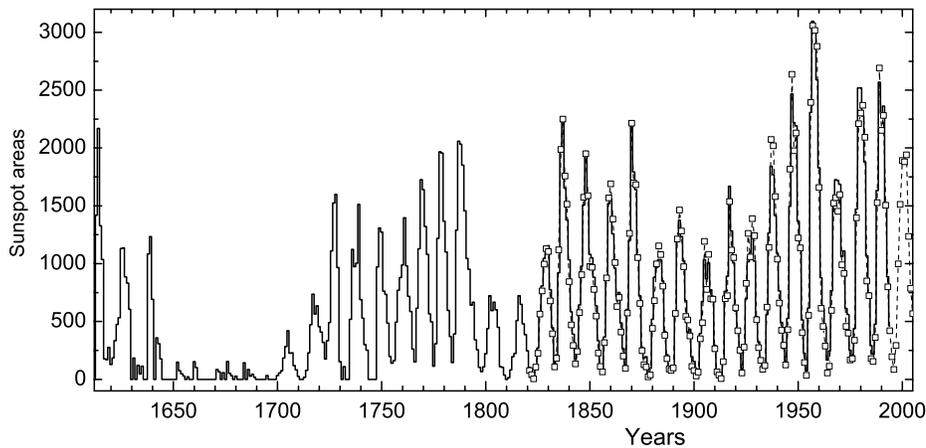


Рис. 2. Среднегодовые суммарные площади пятен в гринвичской системе для 400-летней шкалы и их сравнение с наблюдаемыми (в гринвичской системе — квадраты).

исследований (как предлагали некоторые авторы), непропорционально. Используя подход так называемых “первичных” индексов (М. Копецкий, Г. В. Куклин и др. [20]) из наблюдательных рядов $W(t)$ и $GSN(t)$ мы вывели ряды среднегодовой площади солнечных пятен $S(t)$, начиная с 1610 г., и среднемесячной площади, начиная с 1749. Коэффициенты корреляции, подтверждающие успешность проведенных реконструкций, составляют 0.99 (рис.2) для среднегодовых величин и 0.95 — для среднемесячных.

Полученные серии представляют собой первые длительные, с продолжительностью несколько сотен лет, ряды солнечных индексов с ясным физическим смыслом, поскольку по [19] они могут быть масштабированы в ряды полного пятенного магнитного потока (в максвеллах):

$$\Phi_{\Sigma}(t)[\text{Мкс}] = 2.49 \times 10^{19} S(t)[\text{мдп}]$$

(мдп — традиционные единицы измерения площадей пятен в миллионных долях полусферы Солнца). Это обстоятельство представляется нам крайне важным в плане теоретического моделирования СА, поскольку физические теории оперируют с физическими параметрами, а не с индексами типа “относительного числа пятен” или “относительного числа групп пятен”, введенными наблюдателями из качественных соображений.

В [21] уточнено изменение площади пятен и полного пятенного магнитного потока в эпоху Маундеровского минимума с использованием принципа свидетелей (см. п. 2) по четырем независимым источникам данных. На рис. 3 приведен полученный

временной ход цикличности для этого промежутка времени.

В начале раздела мы упоминали, в частности, ряд средней широты солнечных пятен в гринвичской системе, полученный компиляцией различных наблюдений, начиная с 1854 года. Продлим его с помощью DPS-метода на еще более ранние годы. Выберем в качестве $X(t)$ в (3) ряд площади пятен, полученный в работе [19], и примем $\Delta=3$ года (первый ноль автокорреляционной функции), $n=7$ [12].

Вначале проведем тестовый эксперимент. Построим DPS-модель на интервале 1900–1985 гг. и ее результаты проверим для 1854–1899 гг. Получаем, что реконструированные φ_{SIM} и наблюдаемые φ_{OBS} значения широт пятен для независимого интервала 1854–1899 гг. соотносятся как $\varphi_{OBS} = (1.019 \pm 0.023)\varphi_{SIM}$, $\rho = 0.88$. Т. е. модель выдерживает проверку. Теперь построим DPS-модель для периода с 1621 г., выбрав в качестве опорного весь интервал, на котором у нас имеются значения средних широт, начиная с 1854 г. Полученные результаты иллюстрирует рис. 4. Коэффициент корреляции между реконструированными и наблюдаемыми значениями составил $\rho = 0.89$.

Имея в виду, что Риб и Нем-Риб приводят в [22] широты пятен, наблюдаемых в 1671–1819 гг. вблизи Маундеровского минимума, мы можем провести проверку полученных значений средних широт на этом независимом материале. Рис. 5 иллюстрирует результат. Нам представляется, что DPS-реконструкция достаточно хорошо соответствует данным наблюдений.

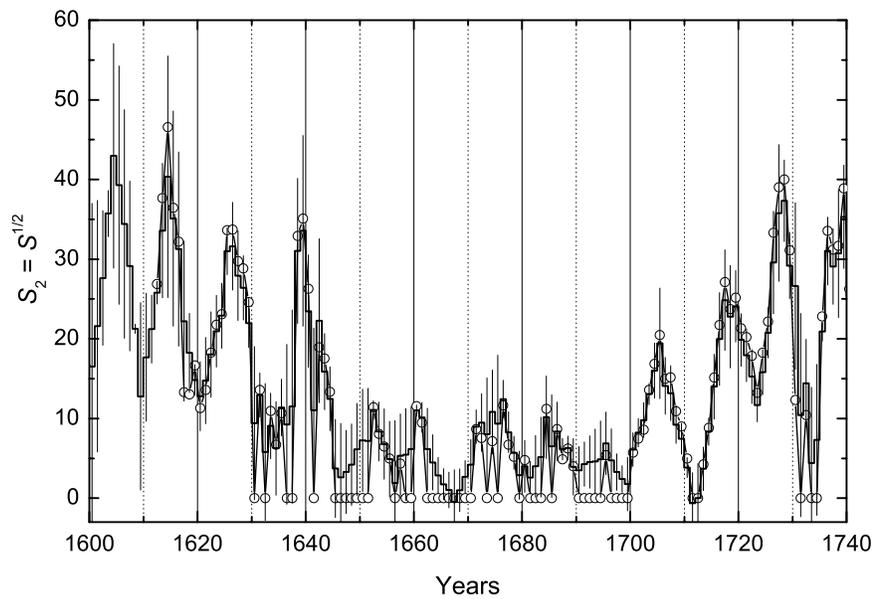


Рис. 3. Средневзвешенный по четырем источникам данных ряд индекса S_2 (корень квадратный из суммарной площади пятен) — сплошная линия и его сравнение с реконструкцией [19] — кружки. Вертикальные линии — доверительные интервалы средневзвешенного ряда.

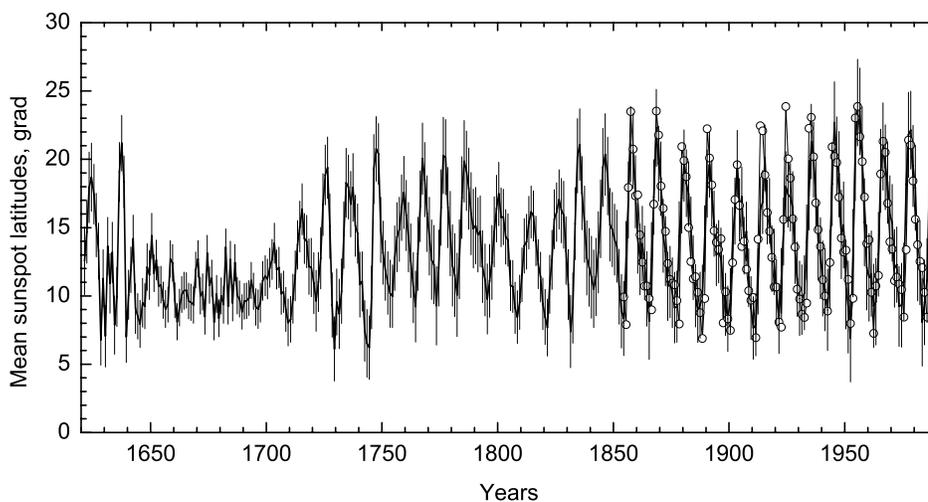


Рис. 4. Временной ход средних широт пятен с 1620 г., полученный с помощью DPS-метода — сплошная линия и его сравнение с наблюдениями — кружки.

3.3. Тысячелетняя шкала

Теперь о 1000-летней шкале. В [18] предложена “нелинейная версия” среднегодового числа Вольфа, начиная с 1060 г. Основные идеи этой работы

следующие. Мы предложили трактовать правило Вальдмайера о связи длины ветви роста 11-летних циклов с их амплитудой не как демонстрацию “взрывного характера” кривых, а как свидетель-

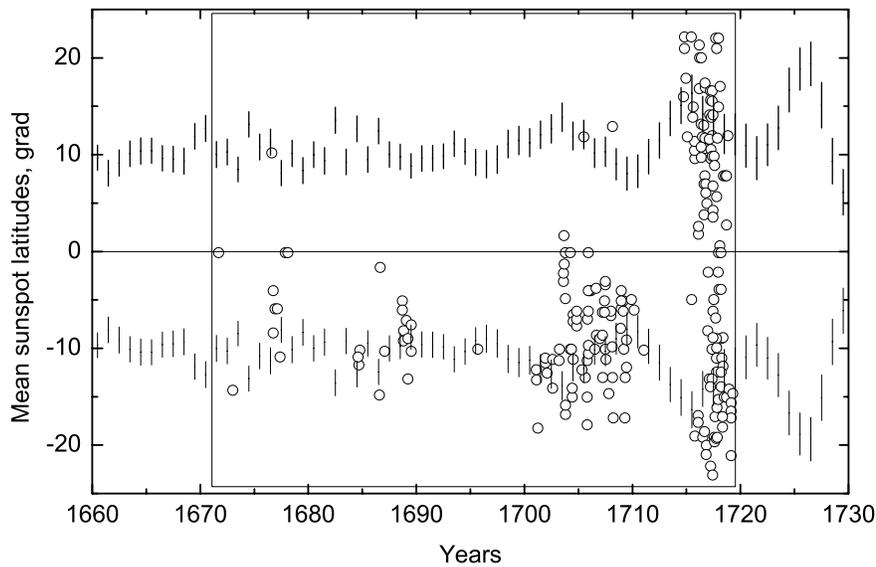


Рис. 5. DPS-модель изменения средних широт пятен близ Маундеровского минимума — сплошная линия и его сравнение с наблюдениями из [22] — кружки.

ство нелинейности колебаний СА. Действительно, как оказалось, для т. н. “альтернированного” ряда W [20] зависимость амплитуд от частот приобретает вид, позволяющий интерпретировать ее как систему двух связанных нелинейных дuffинговских осцилляторов с противоположным типом жесткости. Используя данные Шоува о моментах экстремумов циклов в прошлом, мы смогли с помощью построенной для последних 400 лет экспериментальной амплитудно-частотной зависимости восстановить амплитудную информацию о циклах, начиная с XI века.

Принимая ряд из работы [18] в качестве опорного, теперь можно с помощью методов MSR и DPS получить и другие среднегодовые ряды на 1000-летней шкале. На рис. 6 приведен такой удлиненный ряд индекса площади пятен.

О принципе свидетелей и его возможностях. Для последнего двухтысячелетия мы располагаем тремя независимыми, правда косвенными, источниками данных об изменениях СА: датированными образцами концентрации радиоуглерода в кольцах деревьев (^{14}C), историческими хрониками о крупных пятнах, замеченных невооруженным глазом (Ne), и архивами числа полярных сияний (Au). Определяя интервал времени каждого из этих рядов с помощью MSR-метода [18], мы получили среднюю ($^{14}\text{C}+\text{Ne}+\text{Au}$)-реконструкцию СА в шкале числа Вольфа с начала Н. Э. — см. рис. 7.

Доверительные интервалы показывают неопределенность, вызванную рассогласованием различных данных (“показаний свидетелей”). Использовались значения, усредненные за 5 лет.

Еще более продолжительный ряд чисел Вольфа, охватывающий несколько тысячелетий, построен в [14] на основе расширенных радиоуглеродных данных. Также использовался метод MSR. Числа Вольфа вычислены для средних 10-летних величин. Этот ряд достаточно хорошо очерчивает грандиозные максимумы и минимумы СА, так что может быть использован для статистического изучения их свойств.

Таким образом, подытоживая результаты этого раздела, можно сказать, что по крайней мере фрагментарной картиной развития СА в прошлом мы сейчас располагаем. Дальнейшие исследования должны заполнить неопределенности ней.

4. РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛАХ

4.1. Геомагнитная возмущенность и aa -индекс

Геомагнитный aa -индекс по Майо [23] вычисляется по измерениям горизонтального компонента магнитного поля Земли, наблюдаемого на антиподальных станциях в Южной Англии и Австралии в

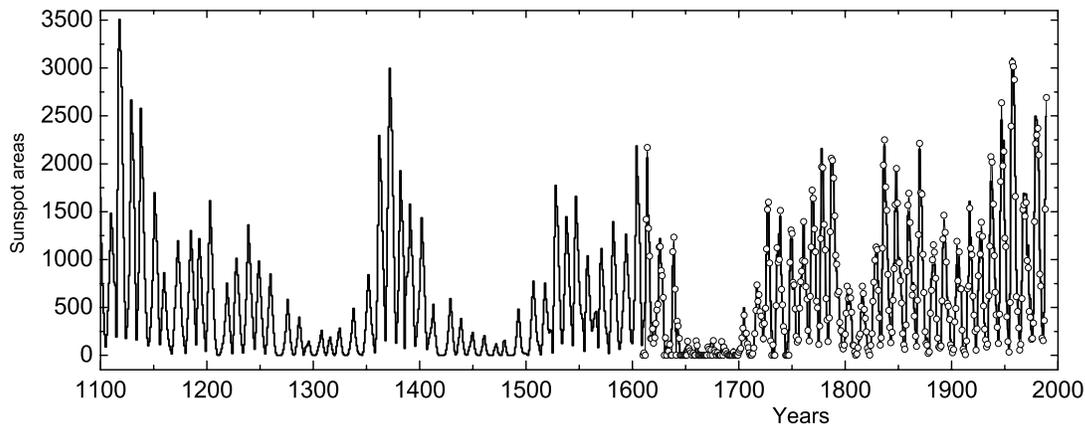


Рис. 6. Ряд изменений суммарной площади пятен на 1000-летней шкале, полученный с помощью MSR- и DPS-методов — сплошная линия, и его сравнение с рядом из [19] 400-летней шкале — кружки.

3-часовые интервалы. Несомненным достоинством имеющегося ряда aa -индекса является его сравнительно большая продолжительность: с 1868 года до наших дней. Однако и этот интервал часто бывает недостаточен для гелио-геофизических исследований.

В [12] с помощью метода DPS проведена реконструкция поведения среднегодовых значений aa -индекса геомагнитной активности в более ранние годы. Были приведены два варианта рядов: для последних 400 лет и на почти тысячелетнем временном интервале (рис.8). Рассмотрены типичные значения aa -индекса в моменты грандиозных экстремумов солнечной активности. Показано, что такой высокий уровень геомагнитной активности, какой наблюдался последние 50 лет, имел место также в начале XII и конце XIV веков (см. рис. 8), и заключение о его беспрецедентном характере в наше время (также как и о беспрецедентном характере текущей солнечной активности на временах Голоцена [24]) неправомерно.

4.2. IDV -индекс и напряженность межпланетного магнитного поля

В последние 5–7 лет в литературе была развернута дискуссия, касающаяся долговременных тенденций изменения геомагнитной активности и межпланетного магнитного поля. Так, Локвуд и др. [25] заключили, что межпланетное магнитное поле усилилось за 20-е столетие в два раза. Данные этих авторов основывались на поведении оригинального наблюдательного ряда aa -индекса (с 1868 г.). В то же время, как показали последующие работы, калибровка этого геомагнитного показателя для

второй половины XX в. может вызывать некоторые сомнения [26]. В качестве альтернативы продолжительному ряду aa Свальгаард и Клайвер [27] предложили почти столь же длительный ряд введенного ими IDV -индекса. Как показали эти авторы, IDV -индекс хорошо соответствует u -мере по Бартельсу (коэффициент корреляции $\rho = 0.95$), и именно за счет измерений данного параметра в прошлом они продлили свой ряд от наших дней до 1872 года.

Кроме того, Свальгаард и Клайвер указали на достаточно сильную линейную связь между IDV -индексом и измеряемой космическими аппаратами с 1965 г. напряженностью межпланетного магнитного поля B ($\rho=0.86$). Полученное линейное соотношение

$$B(nT) = a + b * IDV, \quad (4)$$

($a = 3.04 \pm 0.37$; $b = 0.361 \pm 0.035$) позволило им оценить увеличение напряженности магнитного поля в течение 1900–1960 гг. лишь как 20-процентное с последующей тенденцией к уменьшению. Понятно, что это заключение в сильной степени противоречит выводу [25].

Кроме того, в работе Свальгаарда и Клайвера с помощью опять же линейного соотношения ($\rho=0.84$) выведено уравнение регрессии между напряженностью межпланетного магнитного поля и Цюрихским (международным) числом Вольфа в варианте:

$$B(nT) = (4.62 \pm 0.16) + (0.272 \pm 0.015)R_Z^{1/2}, \quad (5)$$

которое вместе с аналогичным для индекса Хойта-Шаттена (нормализованного числа групп пятен) позволило продлить оценки значений B к началу

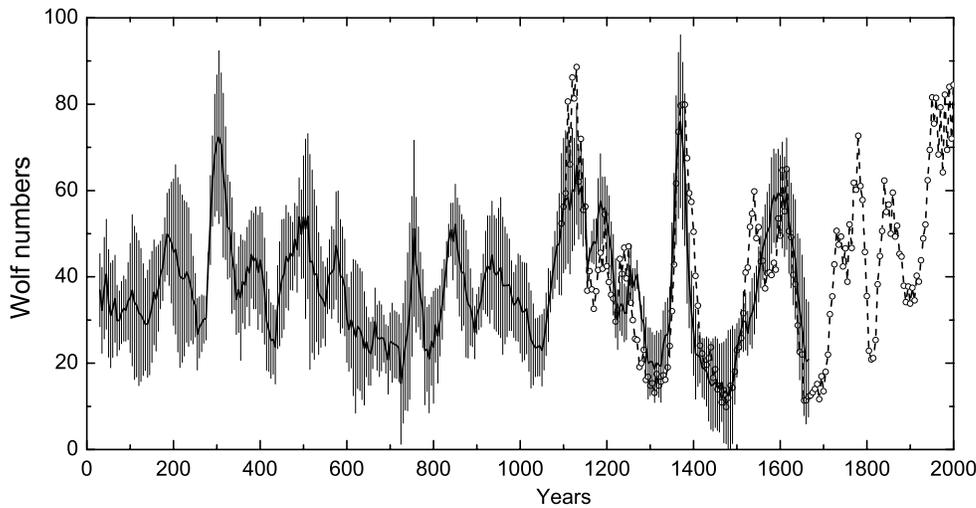


Рис. 7. Суммарная реконструкция числа Вольфа за последние 2000 лет, основанная на концентрации углерода в датированных образцах, пятнах, замеченных невооруженным глазом, и полярных сияниях — сплошная линия, а также нелинейная модель [18] — пунктир и кружки.

телескопических наблюдений солнечной активности.

Как мы показали в [28], при выведении соотношений между индексами (4)–(5) необходимо учитывать дифференциальный характер связи между ними для различных временных шкал. Сделав эту коррекцию с помощью наших методов MSR и DPS, мы получили уточненный по сравнению с [27] ряд *IDV*-индекса, а с ним и напряженности межпланетного магнитного поля (см. рис. 9).

Как мы видим, вывод о неуникальности уровня геомагнитной активности во второй половине XX века, к которому мы пришли, проследив изменения *aa*-индекса на тысячелетней шкале, можно дополнить и аналогичным заключением о межпланетном магнитном поле (даже по 400-летней шкале): со средними величинами его напряженности в середине прошлого столетия конкурируют величины конца XVIII и середины XIX веков.

5. КРУПНОМАСШТАБНАЯ И ПЯТЕННАЯ КОМПОНЕНТЫ ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

В [29] для описания крупномасштабного (фоновое) магнитного поля Солнца предложен т. н. *A*-индекс. Он вычисляется на основе бинарных данных *N α* -синоптических карт (полярность магнитного поля принимается равной +1 или -1 в зависимости от знака поля) и представляет собой сумму квадратов дипольного μ_1 и октупольного μ_3

магнитных моментов крупномасштабного магнитного поля Солнца

$$A(t) = (\mu_1^2 + \mu_3^2/3). \quad (6)$$

Макаров и Тлатов [30] вычислили из наблюдений *A*-индекс для последних 120 лет. В [12] мы продолжили ряд этого индекса на 400-летнюю шкалу. Это важно, поскольку, как мы уже отмечали, типичным сильным изменениям солнечной активности соответствуют времена порядка нескольких столетий — циклы Гляйсберга и Зюсса. Методология нашей реконструкции была следующей.

В работе Ричардсона и др. [31] рассмотрены солнечные источники геомагнитных возмущений за 1972–2000 гг. Было показано, что процессы, связанные с корональными выбросами массы (в том числе со вспышечными процессами в активных областях), развиваясь в фазе с 11-летним циклом, дают вклад 50% и больше в величину *aa*-индекса в максимумах циклов. В то же время процессы, связанные с высокоскоростными потоками солнечного ветра из открытых крупномасштабных конфигураций магнитного поля, развиваясь в противофазе с низкоширотной активностью, обеспечивают соответствующий вклад до 70% в минимуме. Вклад других компонентов, таких как низкоскоростные потоки солнечного ветра, — приблизительно равномерный по времени и не превышает по величине 20% от суммарной величины геомагнитных возмущений. Таким образом, мы можем представить модель временного поведения *aa*-индекса, по

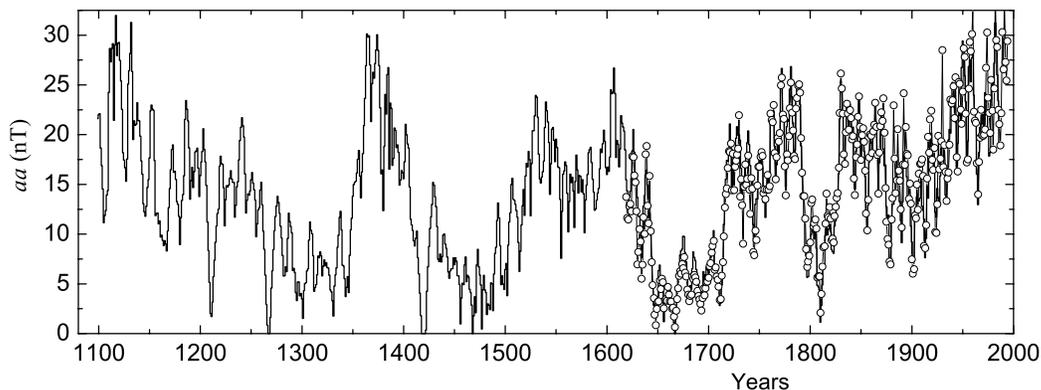


Рис. 8. DPS-реконструкция хода aa -индекса на тысячетлетней шкале на основе нелинейной модели чисел Вольфа [18] — сплошная линия и ее сравнение с опорным рядом для 400-летней шкалы — кружки.

крайней мере, в первом приближении как суперпозицию изменений двух компонент, пропорциональных соответственно индексу пятенной активности $B_{AR}(t) \sim S_2(t)$ и индексу крупномасштабного поля $B_{LS}(t) \sim A(t)$. Здесь в качестве показателя пятенной активности выбран так называемый индекс Козика-Омшанского [32], вычисляемый как корень квадратный из площади пятен: $S_2(t) = S^{1/2}(t)$ (строго говоря, по [32] этот индекс вычисляется по числам Вольфа, но, как мы уже упоминали, числа Вольфа — нефизический индекс).

Полагая, как и ранее, дифференциальность связи между параметрами для разных временных масштабов, запишем почастотное соотношение:

$$A(\omega, t) = k(\omega)aa(\omega, t) + m(\omega)S_2(\omega, t), \quad (7)$$

имея в виду, что $m(\omega) < 0$. Формула (7) позволяет решить задачу реконструкции поведения индекса крупномасштабного магнитного поля $A(t)$ методом MSR. Коэффициент корреляции, фиксирующий успешность процедуры, оказался равным 0.84. На рис.10 приведен полученный ряд параметра крупномасштабного магнитного поля $A(t)$, начиная с 1700 г.

Сравним между собой изменение крупномасштабной компоненты магнитного поля Солнца $B_{LS}(t)$ и его компоненты, связанной с активными областями $B_{AR}(t)$. Для этого нормируем индексы $S_2(t)$ и $A(t)$ в шкалу единиц $aa(t)$, т. е. магнитной индукции, с помощью единого по масштабам регрессионного соотношения

$$aa(t) = aS_2(t) + bA(t). \quad (8)$$

Вычисления дали величины $a=0.458 \pm 0.006$, $b = 0.136 \pm 0.003$, $\rho = 0.95$. На рис. 11 приведен

временной ход величин $B_{AR}(t) = aS(t)$ и $B_{LS}(t) = bA(t)$. Сравнивая модуляции максимумов 11-летних циклов $B_{LS}(t)$ и $B_{AR}(t)$, легко видеть, что вывод об опережающем характере развертывания крупномасштабного магнитного поля по сравнению с локальным низкоширотным, к которому исследователи до сих пор приходили по наблюдательному материалу, ограниченному столетним промежутком (Макаров и др., [29, 30]), подтверждается для длительной временной шкалы. Это заключение представляется нам крайне важным в плане построения будущей теории цикличности солнечной активности.

6. ПРОГНОЗ ВЕЛИЧИНЫ СЛЕДУЮЩЕГО 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА: МЕТОД А. И. ОЛЯ

Составление прогноза величины максимума следующего цикла всегда вызывает интерес в сообществе гелиофизиков. И сейчас, когда до эпохи максимума 24-го цюрихского цикла осталось несколько лет, ряд прогнозов уже опубликован. Они сильно отличаются: от 70 по [33] до 180 по [34] в терминах среднегодовых значений числа Вольфа.

Отметим, что ранее наибольшие успехи в прогнозировании давал метод А. И. Оля [35, 36], опирающийся на величину рекуррентных геомагнитных возмущений в эпоху минимума цикла, предшествующих его данному циклу. Как понятно из соображений, обсуждаемых в предыдущем пункте, с физической точки зрения это объясняется опережающим характером развития крупномасштабного магнитного поля (ответственного за рекуррентные возмущения) по сравнению с низкоширотным.

Одним из приложений наших исследований, описанных в этой статье, была проверка метода

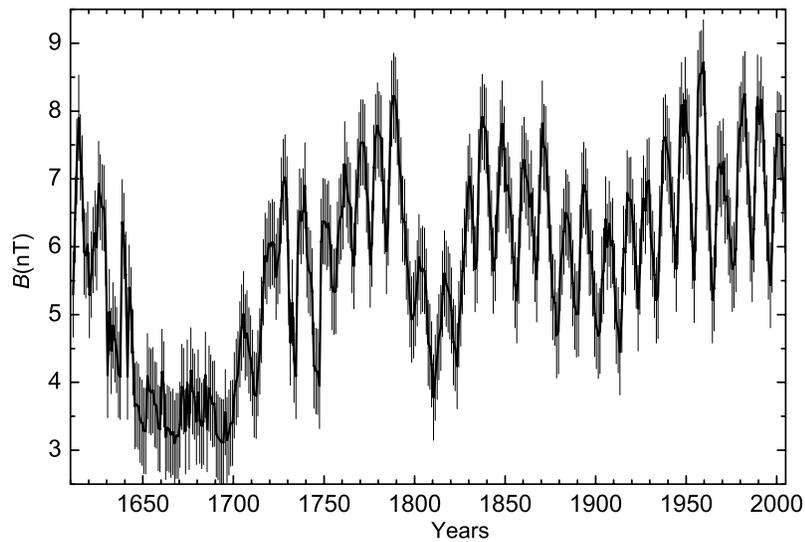


Рис. 9. Средняя MSR-DPS-модель напряженности межпланетного магнитного поля на четырехсотлетней шкале.

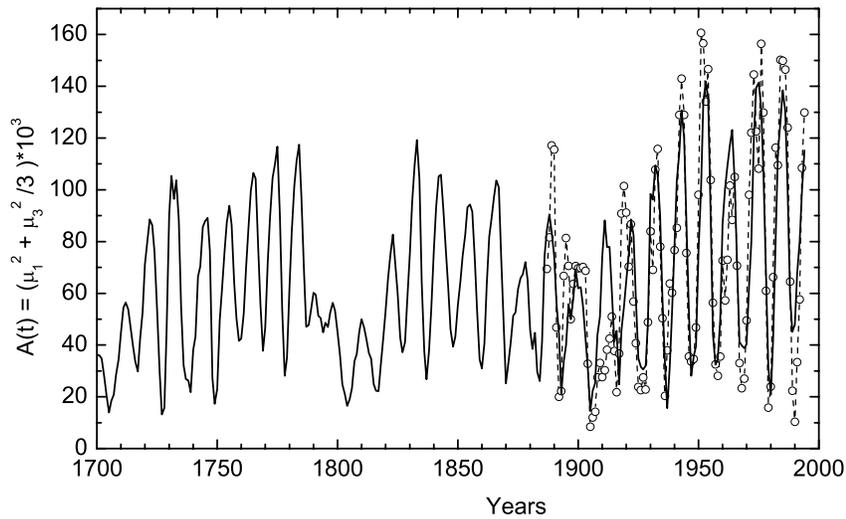


Рис. 10. Реконструкция изменения диполь-октупольного индекса крупномасштабного магнитного поля $A(t)$ для 1700–2000 гг. — сплошная линия и ее сравнение с наблюдениями — кружки, пунктир.

Оля на большой временной шкале. Эта проверка [12] показала его достоверность, начиная с XVII века, и позволила уточнить коэффициенты регрессии:

$$W_{Max}(t) = (4.68 \pm 0.33)aa(t - 6) + (21.3 \pm 5.9), \quad \rho = 0.93. \quad (9)$$

Здесь W_{Max} — среднегодовое число Вольфа, соответствующее эпохе максимума 11-летнего цикла, $aa(t - 6)$ — среднегодовой aa -индекс за 6 лет до его максимума. Таким образом, подставляя в (9) значения aa за 2006 и 2005 гг., мы можем заключить, что если максимум 24-го цикла наступит в 2011 г., то $W_{Max} = 130 \pm 10$, а если в 2012 г.,

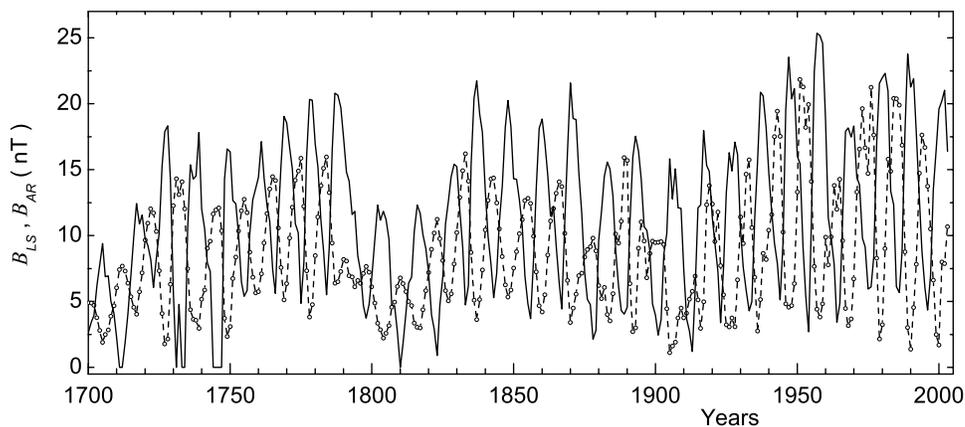


Рис. 11. Реконструкция временных изменений компонент магнитного поля Солнца, определяющих изменения aa -индекса: крупномасштабной B_{LS} (штриховая линия) и связанной с активными областями B_{AR} (сплошная линия).

то $W_{Max} = 95 \pm 10$. Нельзя также исключать и еще более позднее наступление эпохи максимума следующего цикла. В этом случае, скорее всего, $W_{Max} = 60 - 70$, а более точный прогноз можно составить в следующем году. Вероятность максимума в 2010 г. (и соответственно его большой величины) мы оцениваем как крайне невысокую.

Отметим также, что в работе [37] предложенным методом “кратномасштабного клонирования” составлен сценарий развития СА в XXI веке. Получено, что 11-летние циклы активности в это время будут сравнительно низкими (в среднем их максимумы будут меньше 100 единиц чисел Вольфа), а число Вольфа в 24-ом цикле может составить $W_{Max} = 60$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы постарались описать наше видение проблемы “Космический климат” и привести некоторые результаты исследований в рамках соответствующего направления. Приведем сводку основных моментов нашего подхода.

— При реконструкции поведения СА, геомагнитных параметров и межпланетного магнитного поля в прошлом важно выделять последовательные по длительности временные шкалы, которые естественным образом предоставляются возможностями наблюдательного материала, имеющегося в нашем распоряжении.

— Временные ряды каждой последующей по величине охвата временного промежутка шкалы

должны использовать в качестве опорных данные предыдущей временной шкалы.

— В рамках исследований по проблеме “Космический климат” по возможности следует переходить от традиционных статистических индексов к физическим параметрам.

— При выведении соотношений между какими-либо параметрами СА, геомагнитной возмущенности и межпланетного магнитного поля необходимо учитывать дифференциальный характер связей на разных временных масштабах.

— Для верификации получаемых реконструкций может быть применен “принцип свидетелей”, использующий в качестве исходных независимые, пусть иногда косвенные, данные.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NN 05-07-90107, 06-02-16268 и 07-02-00379), Научной программы Санкт-Петербургского научного центра и Программы Президиума РАН N 16 “Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы”, часть 3 “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля”. Автор выражает глубокую благодарность всем перечисленным организациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Schove *Sunspot cycles* (Hutchinson Ross. Publ., Stroudsburg, 1983).
2. Ю. А. Наговицын, *Квазипериодические проявления солнечной активности на различных временных шкалах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук* (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2006).
3. D. V. Hoyt, K. H. Schatten, *Solar Physics* **179**, 491 (1998).
4. Ю. А. Наговицын, *Геомагнетизм и Аэрономия* **41**, 711 (2001).
5. E. Bard, G. M. Raisbeck, F. Yiou, and J. Jouzel, *Earth and Planetary Science Letters* **150**, 453 (1997).
6. J. Beer, *Space Science Reviews* **93**, 107 (2000).
7. M. Stuiver, B. Kromer, B. Becker, and W. Ferguson, *Radiocarbon* **28**, 969 (1986).
8. M. Stuiver, P. J. Reimer and T. F. Braziunas, *Radiocarbon* **40**, 1127 (1998).
9. D. M. Volobuev, *Solar Phys.* **224**, 387 (2004).
10. М. Н. Гневышев, Ю. А. Наговицын, Е. Ю. Наговицына, *Солн. данные* **2**, 72 (1985).
11. Ю. А. Наговицын, В. В. Макарова, Е. Ю. Наговицына, *Астрон. вестник* **1**, 1 (2007).
12. Ю. А. Наговицын, *Письма в Астрон. журн.* **32**, 382 (2006).
13. Yu. A. Nagovitsyn, V. G. Ivanov, E. V. Miletsky, and D. M. Volobuev, *Solar Phys.* **224**, 103 (2004).
14. D. M. Volobuev, Yu. A. Nagovitsyn, H. Jungner, et al., *Holocene ¹⁴C production rate and solar activity. Proceedings of IAU Symposium No 223. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity.* St. Petersburg. p. 565, 2004.
15. M. G. Ogurtsov, *Solar Physics* **231**, 167 (2005).
16. A. Grosmann and J. Morlet, *SIAM J. Math. Anal.* **15**, 723 (1984).
17. F. Takens, *Lect. Notes Math.* **898**, 336 (1981).
18. Ю. А. Наговицын, *Письма в Астрон. журн.* **23**, 851 (1997).
19. Ю. А. Наговицын, *Письма в Астрон. журн.* **31**, 622 (2005).
20. Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Ку克林, *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца* (Наука, Москва, 1986).
21. Ю. А. Наговицын, в сб. *Труды 10-й Пулковской международной конференции по физике Солнца "Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления"*, Санкт-Петербург, Россия, 2006, под ред. А. В. Степанова, А. А. Соловьева и Ю. А. Наговицына (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2006), с. 147.
22. J. C. Ribes and E. Nesme-Ribes, *Astron. Astrophys.* **276**, 549 (1993).
23. P. N. Mayaud, *J. Geophys. Res.* **77**, 6870 (1972).
24. S. K. Solanki, I. G. Usoskin, B. Kromer, et al., *Nature* **431**, 1084 (2004).
25. M. Lockwood, R. Stamper, and M. N. Wild, *Nature* **399**, 437 (1999).
26. L. Svalgaard, E. W. Cliver, and P. Le Sager, *Adv. Space Res.* **34(2)**, 436 (2004).
27. L. Svalgaard and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **110**, A12103 (2005).
28. Ю. А. Наговицын, в сб. *Труды 10-й Пулковской международной конференции по физике Солнца "Квазипериодические процессы на Солнце и их геоэффективные проявления"*, Санкт-Петербург, Россия, 2006, под ред. А. В. Степанова, А. А. Соловьева и Ю. А. Наговицына (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2006), с. 175.
29. V. I. Makarov, A. G. Tlatov, D. K. Callebaut, et al., *Solar Phys.* **198**, 409 (2001).
30. В. И. Макаров, А. Г. Тлатов, *Известия ГАО* **217**, 105 (2004).
31. I. G. Richardson, H. V. Cane, and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **107**, SSH 8-1, 2569 (2002).
32. Ю. И. Витинский, *Цикличность и прогнозы солнечной активности* (Наука, Москва, 1973).
33. L. Svalgaard, E. W. Cliver, and Y. Kamide, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L01104 (2005).
34. M. Dikpati and P. A. Gilman, *Astrophys. J.* **649**, 498 (2006).
35. А. И. Оль, *Солн. данные* **12**, 84 (1966).
36. А. И. Оль, *Солн. данные* **9**, 73 (1976).
37. Ю. А. Наговицын, М. Г. Огурцов, в сб. *Труды 7-й Пулковской международной конференции по физике Солнца "Климатические и экологические аспекты солнечной активности"*, под ред. В. И. Макарова, Ю. А. Наговицына и В. Н. Обридко (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 2003), с. 321.

GLOBAL SOLAR ACTIVITY ON LONG TIME SCALES

Yu. A. Nagovitsyn

We report the results of the application of our approach to study the behavior of solar activity in the past, where:

— When reconstructing the variations of solar activity, geomagnetic parameters, and the interplanetary magnetic field in the past we select a sequence of increasing time scales, which can be naturally represented by the potentials of available observational data. We select a total of four time scales: 150-200 years, 400 years, 1000 years, and 10000 years.

- When constructing the series of each successive (in terms of length) time scale we use the data of the previous time scale as reference data.
- We abandon, where possible, the series of traditional statistical parameters in favor of the series of physical parameters.
- When deriving the relations between any parameters of solar activity, geomagnetic disturbance, and the interplanetary magnetic field we take into account the differential nature of relations on different time scales. To this end, we use the earlier proposed MSR and DPS methods.
- To verify the resulting reconstructions, we use the “principle of witnesses”, which uses independent (in some cases, indirect) information as initial data.