

УДК 523-62,523.9

РЕКОНСТРУКЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 1000–1700 гг. ПО ДАННЫМ О ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2020 г. Н. Г. Птицына^{1, *}, И. М. Демина^{1, **}

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН),
г. Санкт Петербург, Россия

*e-mail: nataliaptitsyna@ya.ru

**e-mail: dim@izmiran.spb.ru

Поступила в редакцию 01.08.2019 г.

После доработки 08.09.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Получена новая реконструкция числа солнечных пятен (SN) в 1000–1700 гг. вместе с возможными ошибками на основе анализа наблюдений полярных сияний на средних и низких широтах и данных о магнитном поле Земли в это время. На проникновение в магнитосферу и атмосферу Земли заряженных частиц солнечного ветра, которые вызывают полярные сияния, влияет напряженность и конфигурация главного магнитного поля Земли. Наша реконструкция отличается от полученных другими авторами тем, что мы учли это влияние на частоту появления полярных сияний. Временной ход реконструированного ряда SN показывает известные ранее минимумы Оорта, Вольфа, Шперера и Маундера. В 1100–1150 гг. (средневековый максимум) значения SN сравнимы с теми, которые наблюдались во второй половине 20-го века во время современного состояния высокой солнечной активности. Показано, что в период минимума Маундера по сравнению с предыдущим периодом SN уменьшается в ~ 2 раза, но при этом в отдельные годы может достигать значений $SN \approx 40$. В начале минимума Маундера происходит раздвоение и вырождение 11-летнего цикла. Это может быть связано с различием в режимах функционирования солнечного динамо.

DOI: 10.31857/S0016794020030153

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование солнечной активности (СА) на больших временных интервалах от сотен лет до тысячелетий представляет большой интерес как для физики солнечного динамо, так и для изучения земных процессов, в частности, земного климата. Обычно для исследования длиннопериодных вариаций и трендов СА применяется индекс пятнообразования – число Вольфа W и/или число групп пятен GN . С 1848 г., когда Вольф начал свои наблюдения, W известно с высокой степенью надежности. Реконструкция GN по прямым архивным наблюдательным данным проведена назад до 1610 г., когда начались наблюдения Солнца с помощью телескопа [Hoyt and Schatten, 1998; Svalgaard and Schatten, 2016].

Однако и до 1610 г., в до телескопическую эру, проводились наблюдения пятен на поверхности Солнца. Такие прямые наблюдения пятен невооруженным глазом велись в основном на Востоке – в Китае, Корее, Вьетнаме [Yau and Stephenson, 1988]. В Европе из-за религиозных догм и связан-

ных с ними философских воззрений считалось, что небесные объекты совершенны, и поэтому астрономы не занимались поиском пятен на Солнце. Несколько зафиксированных случаев наблюдения солнечных пятен в западном мире были сделаны не астрономами, а историками, не обремененными, вероятно, этими философски-религиозными доктринами. В частности, в России в Никоновской летописи были описаны два случая наблюдения пятен на поверхности Солнца в 1365 и 1371 гг. [Святский, 2007]. Зарегистрированная на Востоке невооруженным глазом частота появления крупных солнечных пятен f является почти непрерывным рядом, начиная с 2 века до н. э. [Yau and Stephenson, 1988]. Однако интерпретация этих данных имеет ограничения, связанные с тем, что неизвестно как часто проводились эти наблюдения, проводились ли они в рамках регулярного патруля неба, или были приурочены к каким-либо определенным датам в связи с календарными вычислениями или астрологическими нуждами. Кроме того, ряды f под-

вержены значительному влиянию атмосферных факторов.

Все остальные показатели, которые используются для восстановления исторической СА, являются косвенными индикаторами [например, Ogurtsov, 2002 и ссылки там]. Для наиболее длинных периодов времени (десятки тысяч лет) применяют данные о космогенных изотопах, как например, ^{14}C и ^{10}Be , или содержание нитратов в полярных льдах [Steinhilber et al., 2012; Wu et al., 2018]. Космогенные изотопы образуются в земной атмосфере под воздействием космических лучей, интенсивность которых зависит от СА. Для адекватного описания извлекаемой из природных архивов информации о солнечно-земных связях необходимо учитывать процессы образования, переноса и отложения нуклидов в основные земные теплообменные резервуары (атмосфера и океан), зависимость этих процессов от климата и геомагнитного поля. Поэтому такой способ реконструкции СА имеет ограничения.

Для реконструкции СА в масштабах порядка двух тысяч лет часто используются данные о появлении полярных сияний, записи о которых в исторических документах встречаются с 5 века до н. э. [Shove, 1962; Eddy, 1980; Наговицын, 2008; Feynman and Ruzmaikin, 2014; Nagovitsyn et al., 2015]. Число полярных сияний может служить мерой численных характеристик солнечной активности и ее вариаций, так как ход полярных сияний отражает ход солнечной активности. Особенности этой связи зависят от широты [Siscoe, 1980; Liritzis and Petropoulos, 1987; Vasquez et al., 2014; Птицына и др., 2017]. Корреляция числа полярных сияний с W наблюдается для авроральных событий, регистрируемых на средних и низких широтах, в то время как на высоких широтах наблюдается, напротив, антикорреляция. Это связано с тем, что полярные сияния на разных широтах вызываются различными источниками на Солнце и в межпланетном пространстве. В работах [Liritzis and Petropoulos, 1987; Vasquez et al., 2014; Птицына и др., 2015; Птицына и др., 2017] получено, что низко- и среднеширотные полярные сияния вызваны корональными выбросами массы из закрытых структур солнечного магнитного поля, а высокоширотные – высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр, т.е. открытых структур магнитного поля. Эти солнечные источники полярных сияний имеют различные особенности в цикле солнечной активности. Корональные выбросы массы связаны со вспышечной активностью, поэтому максимальное число таких транзитных событий приходится на максимумы солнечного цикла [Webb et al., 2001]. Короткие солнечные потоки солнечного ветра из корональных дыр доминируют на нисходящей ветви и в минимумах солнечной активности [Вальчук и др., 1978; Simon and Legrand, 1989].

На проникновение в магнитосферу и атмосферу Земли заряженных частиц солнечного ветра, которые вызывают полярные сияния, влияет напряженность и конфигурация главного магнитного поля Земли (ГМПЗ), в первую очередь, величина и направление магнитного момента (MM) его дипольной составляющей. Источники ГМПЗ расположены в жидком ядре Земли, и динамические процессы, происходящие там, приводят к тому, что величина MM с течением времени изменяется, испытывая вариации различной амплитуды и характерных временных масштабов. В периоды ослабления MM количество наблюдаемых полярных сияний должно увеличиваться и наоборот.

Однако до настоящего времени влияние вариаций величины MM не учитывалось при реконструкции солнечной активности из частоты появления полярных сияний в отдаленные эпохи. Данная статья является продолжением работы [Птицына и др., 2018], в которой получена зависимость между SN и N с учетом вклада MM в 1700–1909 гг.

Цель данной работы двоякая: (1) реконструировать солнечную активность (число солнечных пятен) в период 1000–1700 гг. на основе данных наблюдений полярных сияний и изменения MM Земли в этот же период времени, (2) сравнить наш результат с СА, реконструированной с использованием других индикаторов. Ревизия этих данных поможет сделать ряды исторической СА более надежными.

2. ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

2.1. Данные о полярных сияниях и солнечной активности

Мы сформировали сводный каталог ежегодного числа полярных сияний N , которые наблюдались визуально в 1000–1909 гг., из данных нескольких опубликованных каталогов. Полярные сияния в исходных каталогах были зафиксированы в Европе в 1160–1900 г.г. [Krivsky, 1985] и в 1704–1895 гг. [Angot, 1896], а также в Европейской и Азиатской частях России в 305–1850 гг. [Лойша и др., 1989] и в 1837–1909 гг. [Птицына и др., 2017]. Полярные сияния в нашем каталоге наблюдались на средних и низких широтах (геомагнитная широта $\phi < 56^\circ$).

Данные о числе солнечных пятен SN (по версии 2.0) в 1700–1900 гг., и числе групп пятен GN взяты с сайта WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels.

2.2. Нормализация числа полярных сияний

На рисунке 1 представлен ряд частоты регистрации полярных сияний N в сводном каталоге.

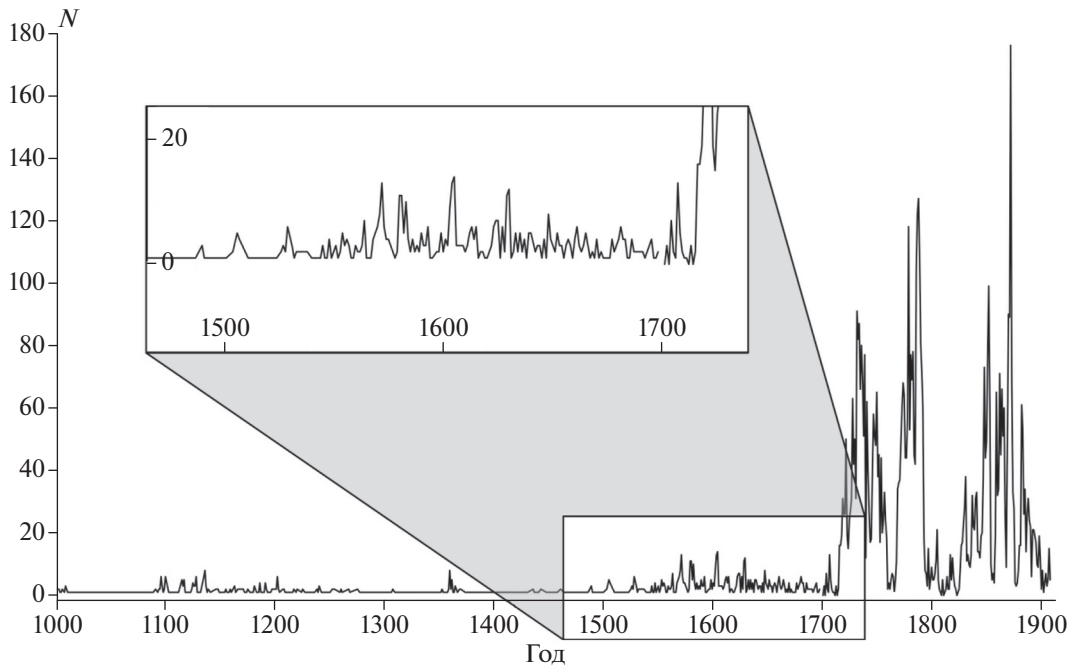


Рис. 1. Ежегодное число полярных сияний N , наблюдаемых в 1000–1900 гг. на средних и низких широтах.

Наиболее характерной чертой рис. 1 является большая разница в величине N в раннем средневековье и значением N в 18–19 вв. Видно, что в 1000–1500 гг. в год фиксировалось 1–2 полярных сияния с максимумом, достигающим до 8/год, в 16 веке — 4–5/год с максимумом ≈ 10 –12/год и в 18 веке средние значения N были порядка 30–40/год, а максимально наблюдалось $N \approx 90$ –120/год.

Ряд N содержит сигналы, связанные с солнечной активностью и геомагнитным полем, а также сигнал, обусловленный социальными факторами. Разделение этих сигналов представляет сложную, до сих пор не решенную задачу. Очевидно, что в отдаленные эпохи фиксировалось лишь небольшое количество особо выдающихся событий из всех полярных сияний $N_{\text{ист}}$, случившихся на средних и низких широтах. Число зафиксированных сияний N в определенную эпоху определяется уровнем общего интереса общества к природным явлениям в это время, что в свою очередь связано с политическими и экономическими условиями жизни людей. Так, войны, эпидемии, голод и т.п. снижают интерес к природным явлениям, в то время как техническое и культурное развитие общества, напротив, способствует его росту, в частности, предоставляя возможности и средства для более эффективной фиксации наблюдаемых природных событий и распространения сведений о них. Например, возрастание N , начавшееся в начале 16 в. и продолжавшееся на всем его протяжении (см выноски на рис. 1)

обычно связывается с изобретением книгопечатания в 1448 г. [Eddy, 1976; Krivskû, 1984; Letfus, 1993], ростом количества типографий и вовлечением в процесс книгопечатания научных трактатов. Скачок в начале 17 в. — с повышенным интересом к природным явлениям, возникшим в Европе в связи с научной революцией в этот период [Eddy, 1976; Krivskû, 1984; Letfus, 1993]. В 1716 г. грандиозное полярное сияние поразило жителей Европы, появившись вновь после периода минимума солнечной активности (1645–1715 гг.), когда сияния наблюдались очень редко [Halley, 1716]. После этого события интерес к полярным сияниям возрос как среди населения, так и среди научной общественности. В результате многие метеорологические/астрономические обсерватории, а также отдельные ученые и частные лица стали регулярно наблюдать эти явления [Mairan, 1733; Loomis, 1866; Lovering, 1868], что повлекло за собой беспрецедентный скачок зафиксированных полярных сияний (рис. 1). Основание университетов и обсерваторий, использование календарей, газет привело к большей информированности населения и способствовало увеличению наблюдений и фиксации полярных сияний. Количество зарегистрированных событий N по отношению к реально произошедшим событиям $N_{\text{ист}}$, так называемая “эффективность наблюдений”, растет с течением времени и зависит от вышеперечисленных факторов, которые в работе [Krivskû, 1984] названы “цивилизационными”. В этой работе Krivskû попытался внести поправку за цивилиза-

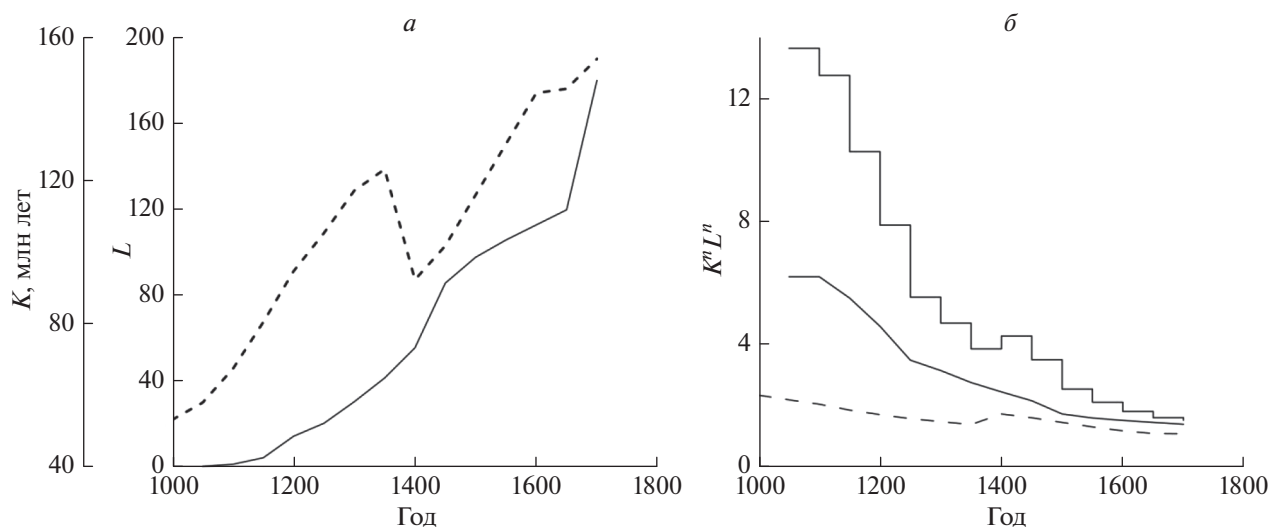


Рис. 2. Нормализующие поправки к ряду N . (а) — численность населения K и число университетов L в Европе в 1000–1700 гг. (б) — нормализующие поправки. Штриховой линией показаны K и K^n , сплошной линией показаны L и L^n , ступенчатой линией показана результирующая поправка.

ционные факторы. Он предположил, что в 1700 г. фиксировались почти все авторы, которые происходили. Затем он достаточно произвольно ввел поправочные множители, ориентируясь на цифровой ряд содержания радиоуглерода в кольцах деревьев. Автор работы [Letfus, 1993], используя результаты работы [Krivský, 1984], а также оценки W из соотношения высоты солнечного цикла и его длины, нашел эффективность наблюдений полярных сияний в 16–19 веках. Однако, относительная значимость цивилизационных факторов, рассматриваемых в работах [Krivský, 1984; Letfus, 1993], их численное выражение, а также их изменения со временем не известны, что делает вводимые поправочные коэффициенты субъективными.

С нашей точки зрения, чтобы нормировать ряд наблюдательных данных о полярных сияниях более объективным способом, необходимо опираться только на те факторы, которые можно выразить в численной форме и которые меняются со временем известным образом. Поэтому в качестве корректирующих параметров мы выбрали два численных ряда: количество населения Европы $K(t)$ как общее число потенциальных наблюдателей, и количество университетов $L(t)$ в Европе как число пропорциональное количеству потенциально квалифицированных наблюдателей, которые могли зафиксировать происходящие события в письменных источниках. На рисунке 2а приведены ряды $K(t)$ и $L(t)$ в 1000–1700 гг. [Самаркин 1976; Баччи, 2010]. Видно, что оба ряда растут в течение рассматриваемого периода времени. Заметим, что резкое падение численности населения Европы в 14 в. связано с несколькими

ми волнами эпидемий чумы в это время [Баччи, 2010]. Следует учесть, что и плотность населения, и пространственное распределение университетов в Европе были неравномерными. Так, максимальная плотность университетов приходилась на Апеннинский полуостров, кроме того, университеты имели разную научную направленность. С другой стороны, с ростом населения развивается миграция из района Средиземного моря на север, в сторону Балтийского побережья, что способствует увеличению плотности потенциальных наблюдателей в относительно более высоких широтах. Поскольку частота появления полярных сияний зависит от широты, то этот миграционный процесс приводит к нелинейному росту количества наблюдений сияний. Чтобы снизить влияние этих факторов, мы применили к рядам $L(t)$ и $K(t)$ операцию логарифмирования, и далее рассматривали $L^*(t) = \ln(L(t))$ и $K^*(t) = \ln(K(t))$.

Нормирующие поправки строились из рядов $L^*(t)$ и $K^*(t)$ методом зеркального отражения со сдвигом, обеспечивающим значение корректирующего множителя в 1700 г. равным 1. Соответствующие кривые $K^n(t)$ и $L^n(t)$ показаны на рис. 2б. Окончательная нормировка строилась как произведение этих функций в виде ступенчатой кривой (рис. 2б). При нормализации коэффициент для каждого временного интервала в 20 лет принимался постоянным. Результат нормализации показан на рис. 3 сплошной линией; число N из нашего каталога после 1700 г. показано штриховой линией.

На основе нормализующей функции можно оценить полученную эффективность наблюдений. Средний для каждого века процент наблю-

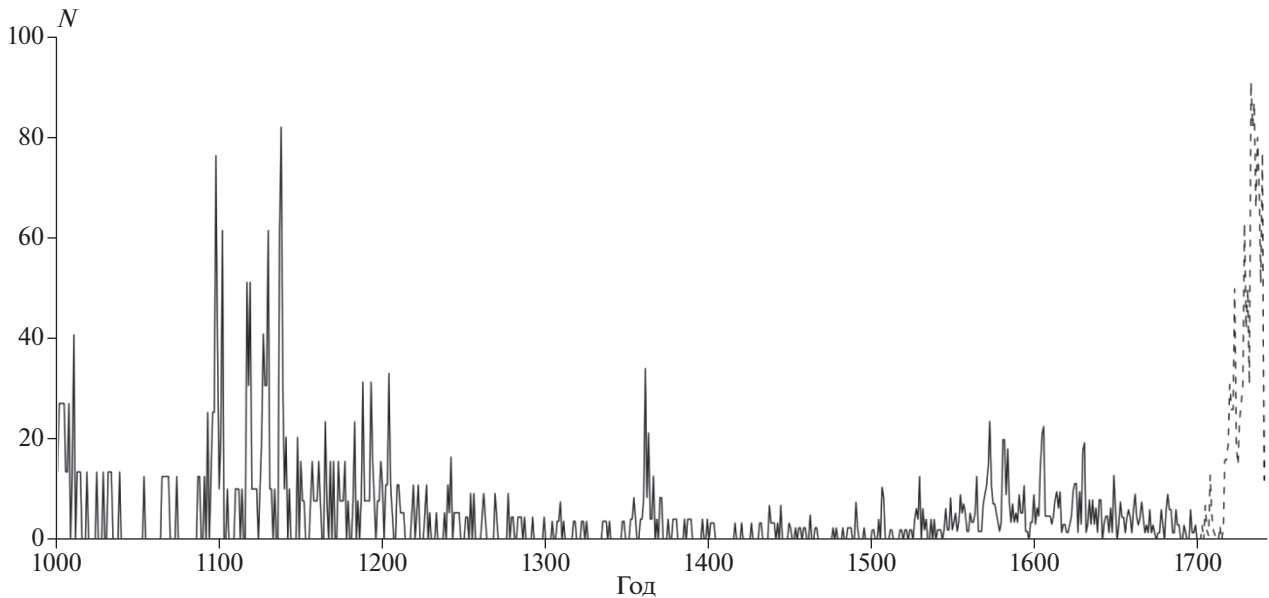


Рис. 3. Нормализованное число полярных сияний на низких и средних широтах в период 1000–1700 гг., дополненное до 1740 г. данными из нашего каталога (штриховая линия).

денных полярных сияний N приведен в таблице 1 в сравнении с аналогичными данными, полученными ранее [Krivský, 1980; Letfus, 1993]. Из таблицы видно, что наши оценки эффективности наблюдений достаточно осторожные, согласно им $N_{\text{ист}}/N$ в течение рассматриваемого периода была выше, чем следует из работ [Krivský, 1980; Letfus, 1993], т.е., наши поправочные коэффициенты существенно ниже. В частности, для минимума Маундера (1645–1715 гг.) он равен 1.5. Заметим, что наши оценки получены на основе цивилизационных факторов и никак не связаны с солнечной активностью SN . Это позволяет использовать нормализованные N для получения независимых оценок SN .

3. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН SN

3.1. Связь N с SN и MM

Поскольку заряженные частицы, вызывающие полярные сияния, попадают в атмосферу Земли на значительном расстоянии от ее поверхности, где более высокие моменты геомагнитного поля становятся несущественными, свойства геомагнитного экрана, в основном, определяются аксиальным дипольным моментом MM . Воспользуемся результатами работы [Птицына и др., 2018], в которой получена связь N с SN и с MM для периода 1700–1900 гг. В предположении, что экранирование магнитным полем Земли уменьшает потенциально возможное количество полярных сияний, и эта зависимость, по аналогии с жесткостью обрезания космических лучей, ли-

нейна, можно представить эту зависимость формулой (1) [Птицына и др., 2018]:

$$N_i = k_1 SN_i (1 - k_2 MM_i) + \varepsilon_i. \quad (1)$$

По описанной в работе [Птицына и др., 2018] методике были получены коэффициенты $k_1 = 0.55$ и $k_2 = 0.049$. Из уравнения (1) можно вывести зависимость SN от N , учитывающую экранирующее влияние геомагнитного поля на наблюдаемое число полярных сияний:

$$SN_i = N_i / k_1 (1 - k_2 MM_i) + \varepsilon_i. \quad (2)$$

Таким образом, по нормализованному ряду N (параграф 2) и изменению величины MM можно получить оценку ряда SN в период времени 1000–1700 гг. На этом этапе ошибкой ε_i мы пренебрегаем.

3.2. Используемые реконструкции геомагнитного поля

За последние годы было разработано достаточное количество моделей, которые описывают из-

Таблица 1. Эффективность наблюдений полярных сияний в 11–17 вв. в %

Век	Данная работа	[Krivsky, 1980]	[Lefus, 1993]
11	8%	4%	
12	10%	4%	
13	17%	4%	
14	23%	4%	
15	29%	4%	4%
16	56%	15%	10%
17	60%	37%	25%

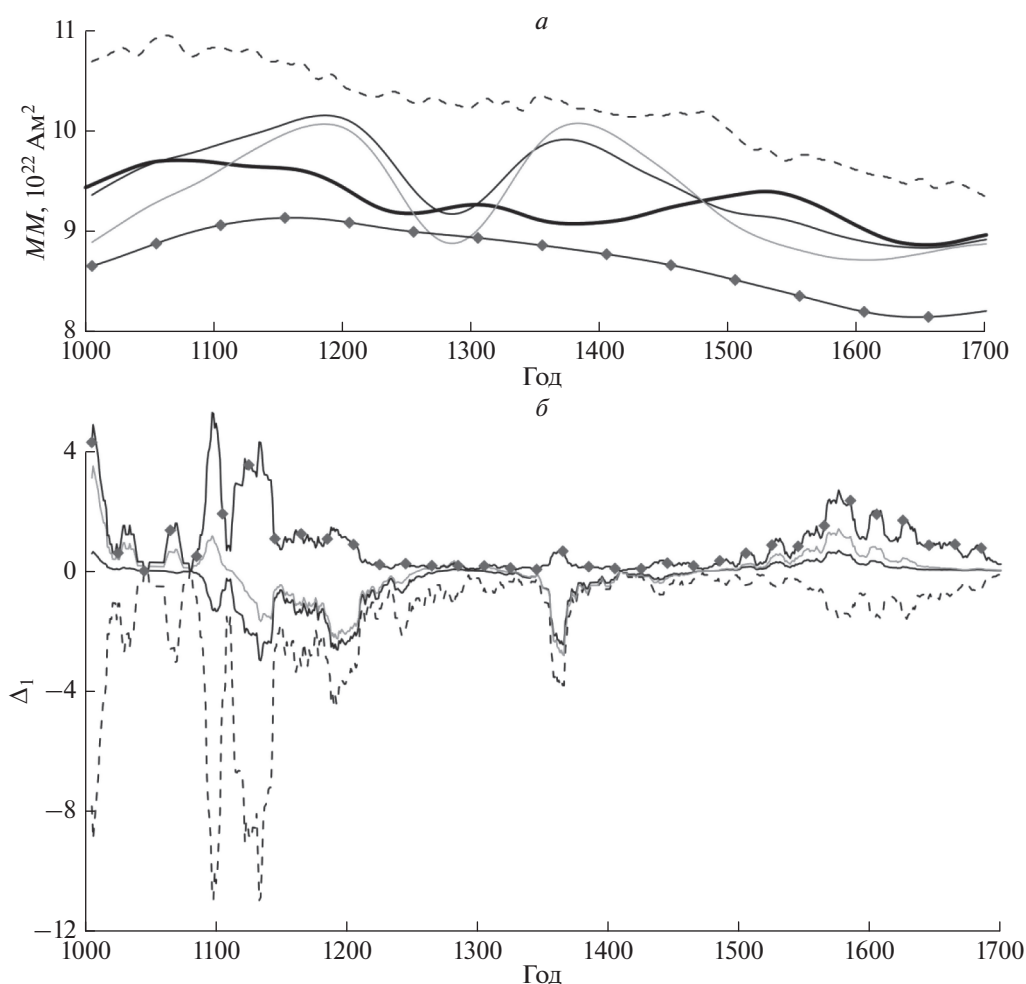


Рис. 4. Влияние выбора модели MM на реконструкцию SN . (а) – изменение MM , вычисленного по разным моделям: жирная линия – ARCH3k.1, тонкая линия – CALC3k.3, линия с ромбами – CALC7k, серая линия – SED3k.1, штриховая линия – GMAG.9K. (б) – разность между SN по модели ARCH3k.1 и по остальным моделям; обозначения те же.

менения MM на протяжении тысячелетий. Для получения оценок SN мы использовали следующие модели, описывающие изменение MM в интервал времени 1000–1700 гг.: ARCH3k.1 [Donadini, 2009; Korte et al., 2009], построенная по археомагнитным данным, SED3k.1 [Donadini, 2009; Korte et al., 2009], построенная по данным осадочных пород, CALS3k.3 [Korte and Constable, 2011] и CALS7k [Korte and Constable, 2005], построенные по комплексу данных, и обобщенная модель GMAG.9K [Usoskin et al., 2016]. Все эти модели охватывают интервал в 3000 лет и включают рассматриваемый нами период. На рисунке 4а приведено изменение MM , описываемое каждой из моделей. Можно видеть, что модели, наиболее далеко продолженные в прошлое CALS7k и GMAG.9K, задают некоторую полосу, в которую вписываются остальные. Поскольку нас интересовало влияние на реконструкцию особенностей более короткопериодных изменений MM , то в ка-

честве базовой была выбрана модель ARCH3k.1, как имеющая на рассматриваемом интервале времени наибольшее количество выраженных экстремумов. Разности Δ_1 между оценками SN , полученными по модели ARCH3k.1 и по всем остальным, представлены на рис. 4б.

Видно, что Δ_1 изменяется, в основном, в пределах ± 4 , достигая максимума $\Delta_1 \approx -11$ в районе 1100 г. при сравнении с оценкой SN , полученной по обобщенной модели GMAG.9K.

3.3. Учет нелинейности связи SN и N

Как указывалось выше, для реконструкции SN использовалась формула (2), при этом ошибками ϵ_i мы пренебрегали. Для получения оценки ϵ_i , проанализируем рис. 5а, где представлена связь SN и числа полярных сияний N , исправленных согласно [Птицына и др., 2018] за влияние магнитного момента MM для 1700–1909 гг. За счет

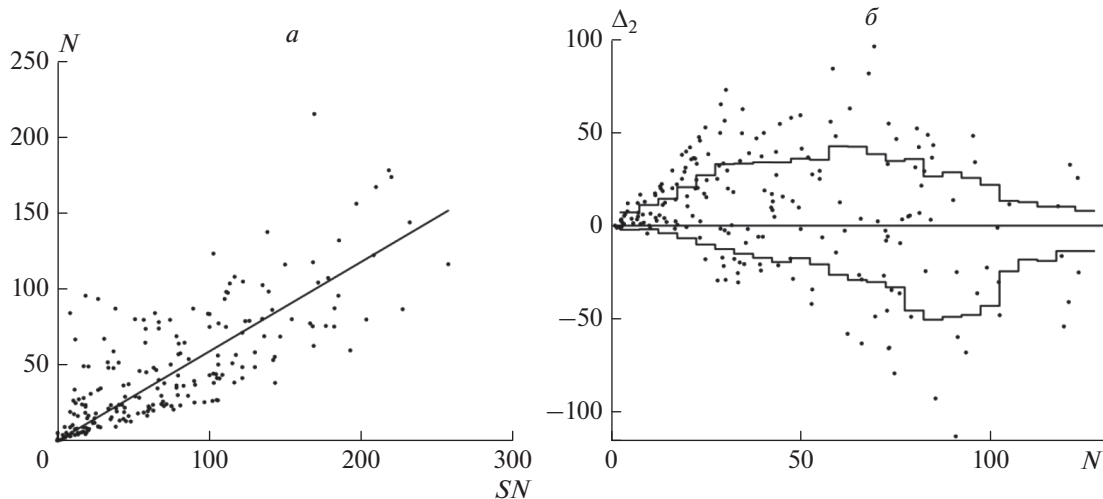


Рис. 5. Связь солнечной активности и числа полярных сияний. (а) — связь между SN и числом N , исправленным за влияние MM для 1700–1909 гг., прямая линия — линейная аппроксимация этой связи. (б) — разница Δ_2 между фактическими значениями SN и их линейной аппроксимацией.

введения поправки за MM удалось достичь коррелированности числа полярных сияний N с SN на уровне $r = 0.86$, однако, видно, что разброс значений относительно линейной аппроксимации (прямая линия на рис. 5а) остался. Эту разницу мы используем для оценки ошибки ϵ в формуле (2), предполагая, что статистическое отклонение от линейной зависимости, оцененное для периода 1700–1909 гг., может быть перенесено на более ранние эпохи. Для получения такой оценки зависимость N от SN была перестроена на обратную, выполнена линейная аппроксимация $SN_{\text{лин}} = kN$, и вычислена разность между фактическими значениями SN и результатом линейной аппроксимации $SN_{\text{лин}}$: $\Delta_2 = SN - SN_{\text{лин}}$. Анализ изменения Δ_2 от времени показал, что Δ_2 не является случайной функцией и фактически зависит от N . Эта зависимость представлена на рис. 5б. Видно, что при количестве полярных сияний $N < 70$, значение SN , вычисленное по линейной формуле, оказывается скорее заниженным. Завышенную оценку SN можно получить для значений N от 80 до 100, что, как показывает анализ временных кривых, связано с отдельными случаями несинфазности N и SN . Для получения $\pm\epsilon(N)$ значения разностей Δ_2 были осреднены в интервалах $\Delta N = 5$ раздельно для положительных и отрицательных значений. При вычислении средних были отброшены отдельные выбросы по правилу 3σ . На рис. 5б показаны полученные ступенчатые кривые. Эти кривые мы использовали для построения зависящей от N ошибки $\pm\epsilon(N)$ к ряду SN , реконструированному для периода 1000–1700 гг.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. SN на интервале 1000–1700 гг.

На рисунке 6 представлены результаты нашей реконструкции числа солнечных пятен SN в период времени 1000–1700 гг. Кроме того, на рис. 6 показана реконструкция SN на основе комбинации относительного содержания радиоуглерода в кольцах деревьев и ^{10}Be в полярных льдах [Steinhilber et al., 2012], а также на комбинированном использовании различных нуклидов [Wu et al., 2018]. В нижней части рисунка в виде диаграммы приведен ряд наблюдения солнечных пятен невооруженным глазом [Yau and Stephenson, 1988]. Для удобства сравнения с нашими данными, ряды SN , реконструированные по космогенным изотопам, были калиброваны до ряда SN по версии 2.0 при помощи умножения на коэффициент 1.66.

Из рисунка 6 видно, что ход SA по нашей кривой хорошо совпадает с ходом SA по другим кривым. Во временных изменениях реконструированного нами SN хорошо прослеживаются те особенности, которые были получены ранее другими исследователями. Эти основные особенности: периодическое увеличение и уменьшение солнечной активности, которое обнаруживает так называемый “средневековый максимум” в первой половине 12 в., максимумы в конце 14 в. и 16 в., а также минимумы Оорта (~1125–1175 гг.), Вольфа (~1210–1350 гг.), Шперера (~1400–1500 гг.) и Маундера (~1650–1715 гг.). Ряды f наблюдений пятен невооруженным глазом также указывают на эти характерные особенности.

Наши результаты свидетельствуют о том, что средневековый максимум был самым значитель-

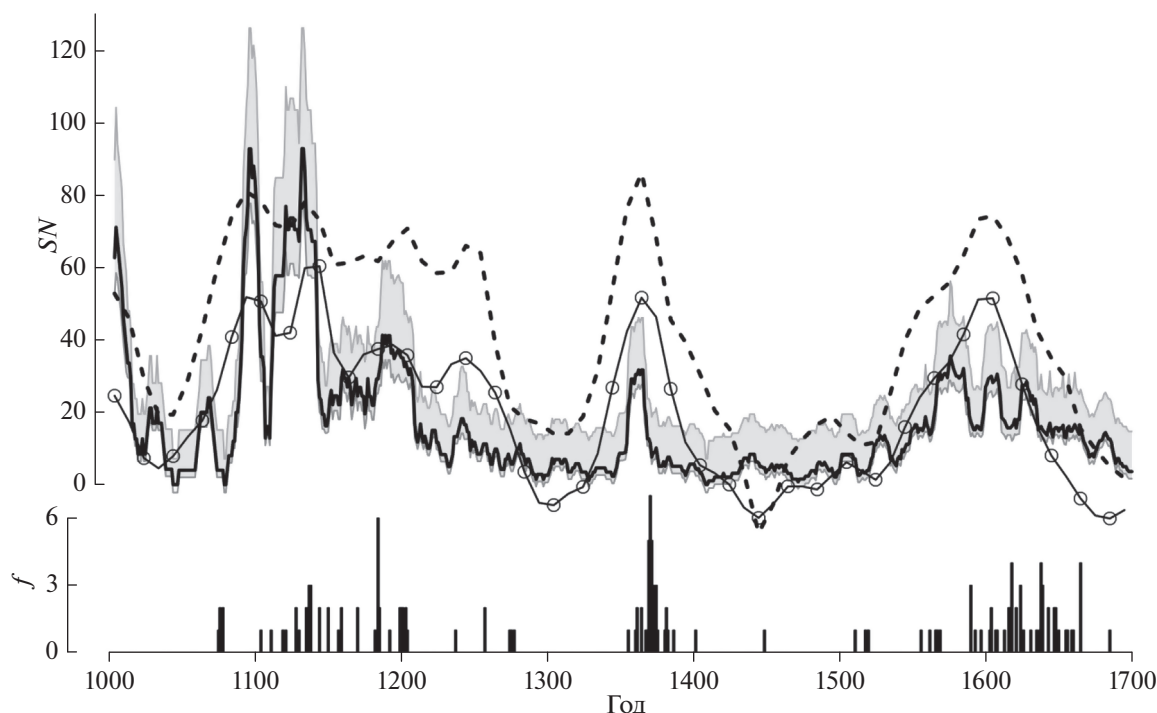


Рис. 6. Реконструкции числа солнечных пятен в 1000–1700 гг. Сплошная линия – SN полученное в данной статье, сглаженное окном 11 лет, серым цветом показана возможная ошибка; линия с символом o – SN , полученное на основе данных о радиоуглероде в кольцах деревьев и ^{10}Be в полярных льдах [Steinhilber et al., 2012]; пунктирная линия – SN на основе данных о пяти космогенных изотопах [Wu et al., 2018]; диаграмма – число солнечных пятен f , наблюдаемых невооруженным глазом [Yau and Stephenson, 1988].

ным за исследуемый период времени, его амплитуда в ~ 3 раза превышала амплитуду остальных максимумов. Годовые значения в 1100–1150 гг. достигали максимальных значений $SN = 200$ –280. Согласно реконструкциям с использованием радионуклидов все три максимума SN были примерно одинаковы по высоте. Следует отметить, что кривые нашей реконструкции SN с учетом ошибки ϵ и реконструкция с использованием данных ^{14}C и ^{10}B [Steinhilber et al., 2012] лежат очень близко друг к другу.

4.2. SN в 1550–1715 гг. Минимум Маундера

Рассмотрим несколько более подробно поведение полученной реконструкции SN во время минимума Маундера (~ 1650 –1715 гг.). Минимум Маундера приходится на 17 век, когда после 1610 г. стали производиться телескопические наблюдения солнечных пятен в Европе. На рисунке 7 приведен реконструированный ряд годовых значений SN совместно с имеющимися наблюдательными данными о солнечной активности – GN , реконструированными из записей инструментальных наблюдений различных астрономов в Европе [Hoyt and Schatten, 1998; Svalgaard and Schatten, 2016], а также число крупных пятен f , наблюдавшихся невооруженным глазом астрономами на Востоке [Yau and Stephenson, 1988].

На рисунке 7а видно, что, согласно нашей реконструкции, на всем протяжении 17 в. наблюдается систематический монотонный спад амплитуды пиков SN (максимумов циклов). В 1605 г. амплитуда пика $SN \approx 70$, а в конце 17 в. $SN \approx 20$. Т.е. пиковые значения SN уменьшились в \sim три раза. В 1600–1650 гг. $\Sigma SN = 1099$ (среднее $SN = 21$), а в 1650–1700 гг. $\Sigma SN = 543$ (среднее $SN = 11$). Т.е. во время минимума Маундера суммарная и средняя SN уменьшилась в ~ 2 раза. Согласно рис. 7а GN в 1645–1705 гг. не показывает такого драматического падения интенсивности, как следует из данных о GN (рис. 7в).

Обратимся теперь к данным о числе крупных пятен f , которые наблюдались астрономами на Востоке (рис. 7б). В 1600–1650 гг. $\Sigma f = 38$, а в 1650–1700 гг. $\Sigma f = 10$, т.е. по сравнению с предыдущим периодом число крупных пятен на Солнце во время минимума Маундера уменьшается значительно, чем реконструированное SN . Возможно, этим частично объясняется более значительное падение числа GN (рис. 7в) по сравнению с SN (рис 7а) во второй половине 17 в.

На рисунке 7а видно, что в конце 16 в. и в первой половине 17 в. до ~ 1630 г. наблюдаются значительные всплески активности ($SN = 60$ –80), которые перемежаются глубокими минимумами. Всплески активности показывают периодичность

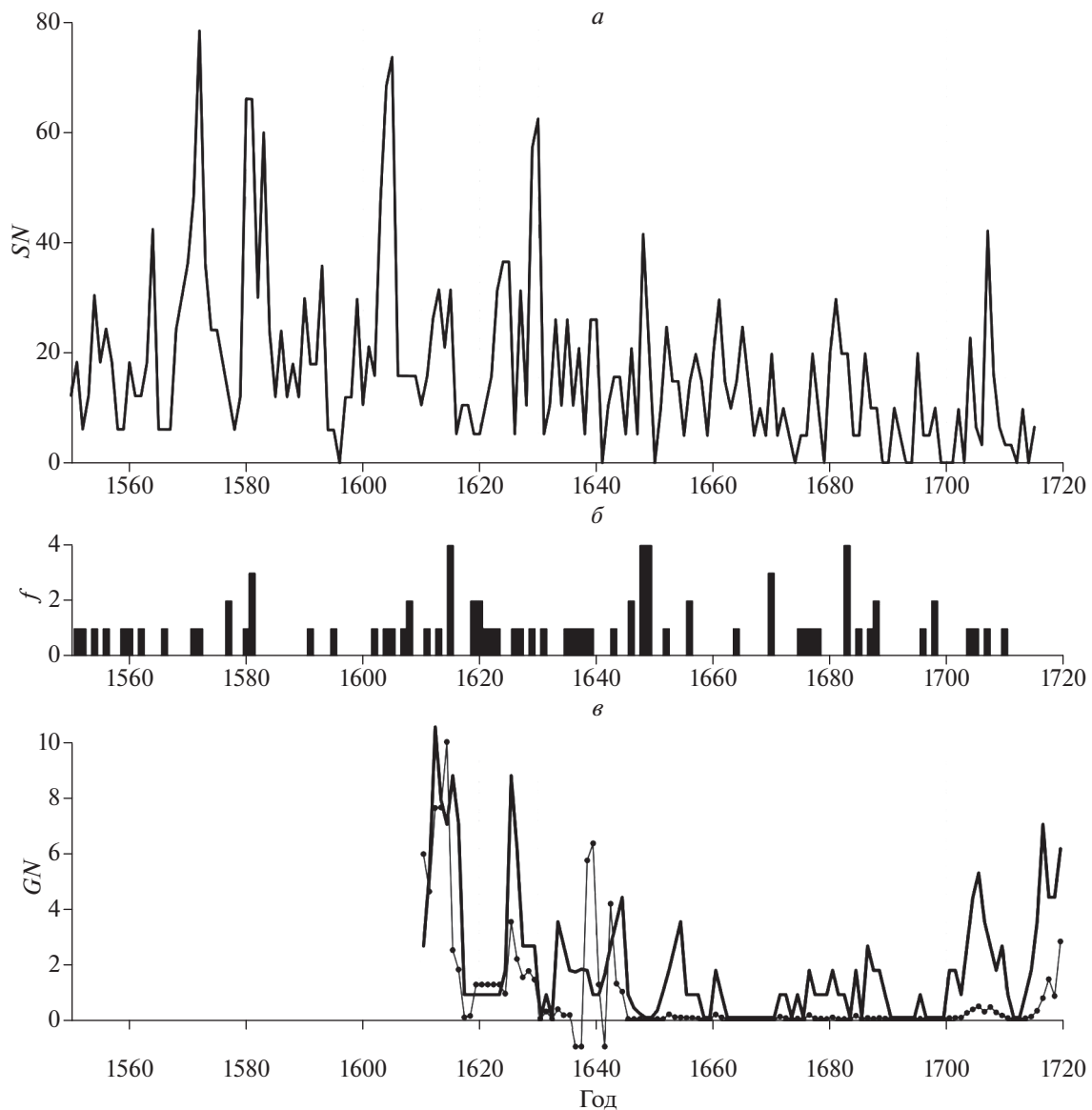


Рис. 7. Солнечная активность во время минимума Маундера (годовые значения). (а) – SN . (б) – наблюдения f невооруженным глазом. (в) – оригинальный (черные точки) [Hoyt and Schatten, 1998] и альтернативный [Svalgaard and Schatten, 2016] ряды GN .

порядка 11 лет. Далее режим вариаций СА резко меняется. Начиная с ~ 1650 г., в каждом десятилетии наблюдаются вместо одного ярко выраженного пика, два практически равновеликих всплеска активности, которые не столь сильно отличаются по амплитуде ($SN \approx 15-25$) от соседних колебаний (рис. 7а). Т.е происходит раздвоение 11-летнего цикла и его вырождение.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наша реконструкция числа солнечных пятен SN хорошо определяет на временной шкале

второго тысячелетия н.э. местоположение продолжительных максимумов и минимумов, которые известны из рядов СА, полученных с использованием космических изотопов [Eddy, 1980; Usoskin, 2017; Kuleshova et al., 2018] – “средневековый максимум”, максимумы в конце 14 в. и 16 в., минимумы Оорта, Вольфа, Шперера и Маундера. Однако при сравнении величин SN наблюдаются расхождения. В частности, согласно реконструкциям, основанным на поведении во времени концентрации космических изотопов, все три максимума наблюдаемые в 1000–1700 гг. имеют примерно одинаковую амплитуду. В то же время наши результаты свидетельствуют о том,

что амплитуда средневекового максимума (1100–1200 гг.) почти в ≈ 3 раза превышала амплитуду остальных максимумов. К сожалению, в настоящее время нет надежных методов для определения амплитуды реконструированной СА и выбора наиболее “правильной”. Можно отметить, что, например, реконструкции из радионуклидных данных могут существенно различаться между собой по амплитуде в зависимости от использованных рядов, калибровки, модели геомагнитного поля и пр. В частности, в последние десятилетия был очень актуален вопрос об определении амплитуды больших максимумов СА в историческом прошлом, так как он связан с интерпретацией современного эпизода очень высоких значений СА, наблюдавшихся во второй половине 20 в. В результате анализа космических изотопов получены противоречивые результаты. Разными группами авторов было найдено, что такая высокая СА, которая наблюдалась в конце 20 в., не наблюдалась ни разу за 10000 лет [Usoskin et al., 2003], наблюдалась лишь однажды, 8000 лет назад [Solanki et al., 2004] и, наконец, наблюдалась трижды только за последнее тысячелетие, в частности, во время средневекового максимума [Наговицын, 1997; Muscheler et al., 2005]. Наша реконструкция дает максимальные годовые значения $SN = 200–280$ в $\sim 1100–1150$ гг., сравнимые с SN во время современного максимума, что согласуется с результатами работ [Наговицын, 1997; Muscheler et al., 2005].

Исследуемый нами период времени покрывает весь 17 век вместе с продолженным минимумом Маундера в 1645–1715 гг., который произошел уже после изобретения телескопа. Тем не менее, наблюдательных данных о СА в это время явно недостаточно. Привлечение косвенных данных, как например, наблюдения хвостов комет, также не улучшило ситуацию [Золотова и др., 2017]. Поэтому до сих пор не сделан однозначный вывод о природе минимума Маундера и цикличности СА в это время.

Согласно работе [Hoyt and Shatten, 1998] пятна практически полностью отсутствовали в период минимума Маундера. В альтернативной серии GN [Svalgaard and Schatten, 2016] нет столь экстремально низких значений во второй половине 17 в. Оценки, приведенные в работе [Vaquero et al., 2015], показали, что максимальная амплитуда солнечных 11-летних циклов в это время была $< 5–10$. Напротив, анализ астрономических данных, полученных на Востоке, показал, что в некоторые периоды Маундеровского минимума (например, в 1645–1651 и в 1663–1671 гг.) СА была сравнительно высока [Ogurtsov et al., 2003]. Для того чтобы возникли пятна, видимые без телескопа, число Вольфа должно достигать $W \approx 50$ [Eddy, 1980; Ogurtsov et al., 2003]. Оценки, приведенные в работе [Витинский, 1986], основанные на ис-

пользовании статистики 11-летних и 22-летних циклов СА в 15–18 вв., а также данных о полярных сияниях, позволили автору заключить, что число Вольфа во время минимума Маундера $W \approx 30–80$. В статье [Zolotova and Ponyavin, 2015] приведены доказательства того, что минимум Маундера не является глубоким гранд-минимумом, что число пятен в это время было гораздо больше, чем содержится в исторической базе данных, которая используется в [Hoyt and Shatten, 1998; Clette et al., 2014].

Согласно нашим результатам, во время минимума Маундера не происходило драматического падения числа солнечных пятен, в среднем SN уменьшается в ~ 2 раза по сравнению с предыдущими 50 годами, в максимальных всплесках $SN \approx 40$. Это свидетельствует в пользу вывода работ [Zolotova and Ponyavin, 2015, 2016] о недооценке количества солнечных пятен в работах [Hoyt and Shatten, 1988; Clette et al., 2014].

Анализ телескопических наблюдений, данных о полярных сияниях, а также концентрации космогенных изотопов, проведенный в работе [Ogurtsov et al., 2003], показал наличие хаотических всплесков СА, случайно распределенных по временному интервалу 1645–1715 гг. Авторы не обнаружили 22-летней периодичности, хотя отметили возможность 11-летней. Напротив, в работе [Usoskin et al., 2000] при анализе GN выявлена ~ 22 -летняя вариация. В работе [Miyahara et al., 2006] было найдено, что пятна концентрируются в виде кластеров, которые свидетельствуют о существовании 22-летнего цикла; 11-летняя периодичность отмечена только в конце минимума Маундера. Согласно [Letfus, 2000] ни число пятен, ни количество полярных сияний не демонстрируют 11-летней цикличности в этот период. Напротив, анализ полученных в работе [Наговицын, 2007] версий 400-летних рядов индексов числа Вольфа W , относительного числа групп пятен G и суммарной площади пятен S позволил автору сделать вывод о том, что 11-летний цикл в течение Маундеровского минимума не прекращался. При анализе данных ^{10}Be в полярных льдах также найдена доминирующая 11-летняя вариация [Beer et al., 1998]. Согласно работам [Zolotova and Ponyavin, 2015, 2016] минимум Маундера является минимумом столетней вариации, во время которого 11-летняя цикличность солнечного динамо не прекращалась. В то же время в работе [Feinman and Gabriel, 1990] было получено, что во время минимума Маундера происходит удвоение 11- и 22-летнего цикла, что интерпретируется авторами как свидетельство бифуркации в режиме перехода солнечного динамо из регуляриной моды в хаотическую. Результаты нашего анализа свидетельствуют о раздвоении 11-летнего цикла во время минимума Маундера; момент сбоя режима, точка бифуркации, находится около 1650 г.

Вопрос о сбоях в 11-летнем цикле во время минимума Маундера привлекает большое внимание исследователей, потому что он связан с фундаментальной проблемой солнечной физики — с функционированием солнечного динамо. Вопрос заключается в том, происходит ли генерация магнитных полей на Солнце постоянно и регулярно или она перемежается гранд-минимумами, во время которых солнечное динамо прекращает работу или функционирует в специальном режиме отличном от того, в котором оно работает сейчас [Eddy, 1976; Feinman and Gabriel, 1990; Sokoloff, 2004; Miyahara et al., 2006; Zolotova and Poniavín, 2016]. Наш результат об изменении режима цикличности в начале минимума Маундера, который сопровождается раздвоением 11-летнего цикла и его вырождением, является дополнительным аргументом в поддержку того, что в это время произошел некий сбой в работе солнечного динамо, который привел к другому типу генерирования магнитных полей на Солнце.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя нашу базу данных о появлении полярных сияний на средних и низких широтах в 1000–1700 гг. и данных о магнитном поле Земли в это время, мы получили новую реконструкцию числа солнечных пятен SN вместе с возможными ошибками. Анализ реконструированного ряда SN показал следующее:

1. Наличие известных особенностей во временном поведении SA — средневековый максимум, минимумы Оорта, Вольфа, Шперера и Маундера.

2. Во время средневекового максимума число солнечных пятен сравнимо с SA , которая наблюдалась во время современного максимума во второй половине 20 в.

3. Во время минимума Маундера число солнечных пятен SN уменьшается в ~ 2 раза по сравнению с предыдущим периодом; всплески активности достигают $SN \approx 40$.

4. В начале минимума Маундера происходит явное изменение режима цикличности солнечных пятен, которое сопровождается раздвоением и вырождением 11-летнего цикла. Это может быть связано с различием в режимах функционирования солнечного динамо.

Новая реконструкция SA , основанная на числе появления средне- и низкоширотных полярных сияний с учетом MM , подтверждает и дополняет заключения, сделанные из анализа исторических наблюдений солнечных пятен, а также данных о космогенных изотопах.

Результаты реконструкции доступны на сайте СПбФ ИЗМИРАН (<http://db.izmiran.nw.ru/data/recNandSN.dat>).

Авторы выражают благодарность Г.А. Ковальцову за предоставление данных о поведении величины MM в модели GMAG.9k, а также анонимному рецензенту за конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Баччи М.Л. Демографическая история Европы. СПб. Александрия. 304 с. 2010.

— Вальчук Т.Е., Лившиц М.А., Фельдштейн Я.И. Зондирование геомагнитным полем высокоширотного магнитного поля Солнца // Письма в Астрон. журн. Т. 4. С. 515–519. 1978.

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

— Золотова Н.В., Сизоненко Ю.В., Вохмянин М.В., Веселовский И.С. Попытка извлечь косвенные данные о солнечном ветре из наблюдений кометных хвостов в минимуме Маундера / Тр. XXI Всероссийской ежегодной конф. “Солнечная и солнечно-земная физика—2017”. Санкт-Петербург, 9–13 октября 2017 г, Санкт-Петербург. ГАО РАН. С. 157–160. 2017.

— Лойша В.А., Краковецкий Ю.К., Попов Л.Н. Полярные сияния. Каталог IV–XVIII вв. М.: Межведомственный геофизический комитет АН СССР. 128 с. 1989.

— Наговицын Ю.А. Нелинейная математическая модель процесса солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом // Письма в Астрон. журн. Т. 23. С. 851–858. 1997. (*перевод Nagovitsyn Yu.A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past // Astronomy letters. V. 23. P. 742–748. 1997.*)

— Наговицын Ю.А. Циклы солнечной активности во время маундеровского минимума. 2007 г. // Письма в АЖ: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 33. С. 283–289. 2007. Engl. Transl.: (*перевод Nagovitsyn Yu.A. Solar cycles during the Maunder minimum // Astronomy letters. V. 33. P. 340–345. 2007.*)

— Наговицын Ю.А. Глобальная активность Солнца на длительных временах // Астрофиз. Бюлл. Т. 63. № 1. С. 45–58. 2008.

— Птицына Н.Г., Тясто М.И., Храпов Б.А. Вариации частоты появления полярных сияний в 1837–1900 гг. по данным сети метеорологических обсерваторий России // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 5. С. 696–705. 2015.

<https://doi.org/10.7868/S0016794015040124> (Engl. Transl.: *Ptitsyna N.G., Tyasto M.I., Khrapov B.A. Variations in the occurrence frequency of aurora in 1837–1900 from data of the Russian network of meteorological observatories // Geomagn. Aeron. V. 55. № 5. P. 679–687. 2015.*)

— Птицына Н.Г., Тясто М.И., Храпов Б.А. 22-летний цикл в частоте появления полярных сияний в XIX веке: широтные эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 2. С. 208–216. 2017.

<https://doi.org/10.7868/S0016794017020110> (Engl. Transl.: *Ptitsyna N.G., Tyasto M.I., Khrapov B.A. 22-year cycle in the frequency of aurora occurrence in XIX century: Latitude*

- dinal effects // *Geomagn. Aeron.* V. 57. P. 190–198. 2017). <https://doi.org/10.7868/S0016794017020110>
- *Птицына Н.Г., Демина И.М., Тясто М.И.* Вариации авроральной активности и главного магнитного поля Земли за триста лет (1600–1909 гг.) // *Геомagnetизм и Аэрoномия*. Т. 58. № 6. С. 818–827. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060123> (Engl. Transl.: *Ptitsyna N.G., Demina I.M., Tyasto M.I.* Variations in the auroral activity and main magnetic field of the earth over 300 years (1600–1909) // *Geomagn. Aeron.* V. 58. № 6. P. 784–792. 2018.) <https://doi.org/10.1134/S0016794018060123>
- *Самаркин В.В.* Историческая география Западной Европы в средние века. М.: Высшая школа, 248 с. 1976.
- *Святский Д.О.* Астрономия Древней Руси. М. Русская панорама. 664 с. 2007.
- *Angot A.* The Aurora Borealis. Int. Sci. ser. New York. D. Appleton & Co. 264 p. 1897.
- *Beer J., Tobias S., Weiss N.* An active Sun throughout the Maunder minimum // *Solar Phys.* V. 181. P. 237–238. 1998.
- *Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W.* Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle // *Space Sci. Rev.* V. 186. № 1–4. P. 35–103. 2014. doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2
- *Donadini F., Korte M. and Constable C.* Geomagnetic Field for 0-3ka: 1. New Data Sets for Global Modeling // *Geochem. Geophys. Geosys.* V. 10. Q06007. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GC002295>
- *Eddy J.A.* The historical record of solar activity. In: The ancient sun: Fossil record in the earth, moon and meteorites / Proceedings of the Conference. Boulder. CO. October 16–19. 1979. (A81-48801 24-91) New York and Oxford. Pergamon. P. 119–134. 1980.
- *Eddy J.A.* The Maunder minimum // *Science.* V. 192. № 4245. P. 1189–1202. 1976.
- *Feynman J., Gabriel S.B.* Period and phase of the 88-year solar cycle and the Maunder minimum – Evidence for a chaotic sun // *Solar Phys.* V. 127. P. 393–403. 1990.
- *Feynman J., Ruzmaikin A.* The centennial Gleissberg cycle and its association with extended minima. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 119. № 8. P. 6027–6041. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019478>
- *Halley E.* An account of the late surprising appearance of the lights seen in the air, on the sixth of March last; with an attempt to explain the principal phenomena thereof // *Philos. Trans. R. Soc. London.* V. 29. P. 406–428. 1716.
- *Hoyt D.V., Schatten K.H.* Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. Part 1 // *Solar Phys.* V. 179. P. 189–219. 1998.
- *Krivskiy L.* Long term fluctuations of solar activity during the last thousand year // *Solar Phys.* V. 93. P. 189–194. 1984.
- *Krivskiy L., Pejml K.* Solar activity, aurorae and climate in Central Europe in the last 1000 years / *Trav. Inst. Geophys. Acad. Techoslovaque Sci., Publ. Astron. Inst. Czech. Acad. Sci.* V. 33. № 606. P. 77–151. 1985.
- *Korte M., Constable C.G.* Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: CALS7K // *Geochem. Geophys. Geosys.* V. 6. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004GC000801>
- *Korte M., Donadini F., Constable C.* Geomagnetic field for 0–3ka: 2. A new series of time-varying models // *Geochem. Geophys. Geosys.* V. 10. Q06008. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GC002297>
- *Korte M., Constable C.* Improving geomagnetic field reconstructions for 0–3 ka // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 188. P. 247–259. 2011.
- *Kuleshova A.I., Dergachev V., Kudryavtsev I.V., Nagovitsyn Yu.A., Ogurtsov M.G.* Reconstruction of the Wolf numbers based on radiocarbon data from the early 11th century until the middle of the 19th century with respect to climate changes // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 58. P. 1097–1102. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016793218080108>
- *Lefus V.* Solar activity in the sixteenth and seventeenth centuries // *Solar Phys.* V. 145. № 2. P. 377–388. 1993.
- *Lefus V.* Sunspot and auroral activity during Maunder minimum // *Solar Phys.* V. 197. P. 203–213. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026577130556>
- *Liritzis Y., Petropoulos B.* Latitude dependence of auroral frequency in relation to solar-terrestrial and interplanetary parameters // *Earth, Moon Plan.* V. 39. № 1. P. 75–91. 1987.
- *Loomis E.* The aurora borealis or polar light; its phenomena and laws. Ann. Rep. Smithsonian. Inst. 13. 1866.
- *Lovering J.* On the periodicity of the aurora borealis // *Mem. Amer. Acad. Arts Sci.* V. 10. P. 9–351. 1868.
- *Mairan J.J.* Traite physique et historique de l’aurore boreale. Suite des memoires de l’Academie Royale des Science. An. M. DCCXXXI. 2nd ed. De l’Imprimerie Royale. Paris. 1733.
- *Miyahara H., Sokoloff D.D., Usoskin I.G.* The Solar Cycle at the Maunder Minimum Epoch / *Advances in Geosciences, solar terrestrial (ST)*. Eds. Ip W.H., Duldig M. V. 2. Singapore: World Scientific, 120 p. 2006. https://doi.org/10.1142/9789812707185_0001
- *Muscheler R., Joos F., Muller S.A., Snowball I.* How unusual is today’s solar activity? // *Nature.* V. 436. E3–E4. 2005.
- *Nagovitsyn Yu.A., Georgieva K., Osipova A.A., Kuleshova A.I.* Eleven-Year Cyclicity of the Sun on the 2000-Year Time Scale // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 55. № 8. P. 1081–1088. 2015. <https://doi.org/10.1134/S0016793215080108>
- *Ogurtsov M.G., Nagovitsyn Yu.A., Kocharov G.E., Jungner H.* Long-period cycles of the sun’s activity recorded in direct solar data and proxies // *Solar Physics.* V. 211. P. 371–394. 2002.
- *Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Nagovitsyn Yu.A.* Solar cyclicity during the Maunder minimum // *Astronomy Reports.* V. 47(6). P. 517–524. 2003. <https://doi.org/10.1134/1.1583779>
- *Schove D.J.* Aurora numbers since 500 B.C. // *J. Brit. Astron. Assoc.* V. 72. № 1. P. 31–35. 1962.
- *Simon P.A., Legrand J.P.* Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part II. The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity // *Ann. Geophysicae.* V. 7. P. 579–594. 1989.
- *Siscoe G.L.* Evidence in the auroral record for secular solar variability. // *Rev. Geophys.* V. 1. № 8. P. 647–658. 1980.

- *Sokoloff D.* The Maunder minimum and the solar dynamo // *Solar Phys.* V. 224. P. 145–152. 2004.
- *Solanki S., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M., Beer J.* Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // *Nature.* V. 431. P. 1084–1087. 2004.
- *Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J. et al.* 9400 year cosmogenic isotope data and solar activity reconstruction. IGBP PAGES/WDC Paleoclimat. Data Contr. Ser. # 2012-040. NOAA/NCDC Paleoclimat. Program Boulder CO, USA. 2012. <https://doi.org/pnas.1118965109>
- *Svalgaard L., Schatten K.H.* Reconstruction of the sunspot group number: The backbone method. // *Sol. Phys.* V. 291. P. 2653–2684. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0815-8>
- *Usoskin I.G., Mursula K., Kovaltsov G.A.* Sunspot activity during the Maunder minimum // *Astron. Astrophys.* V. 354. L33. 2000.
- *Usoskin I.G., Solanki S.K., Schüssler M., Mursula K., Alanko K.* Millennium-scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940s // *Phys. Rev. Lett.* V. 91. 211101. 2003. <https://doi.org/10.1103/Phys.Rev.Lett.91.211101>
- Usoskin I.G., Gallet Y., Kovaltsov G.A., Hulot G.* Solar activity during the Holocene: the Hallstatt cycle and its consequence for Grand Minima and Maxima // *A&A.* V. 587. A150. 2016. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527295>
- *Usoskin I.G.* A history of solar activity over millennia // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 14. № 3. 2017. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- *Vasquez M., Vaquero J.M., Gallego M.C.* Long-term spatial and temporal variations of aurora borealis events in the period 1700–1905 // *Solar Phys.* V. 289. № 5. P. 1843–1861. 2014.
- *Vaquero J.M., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G., Carrasco V.M.S., Gallego M.C.* Level and length of cyclic solar activity during the Maunder minimum as deduced from the active day statistics // *Astron. Astrophys.* V. 577. A71. P. 1–6. 2015.
- *Webb D.F., Crooker N.U., Plunkett S.P., St. Cyr O.C.* The solar sources of geoeffective structures / *Space Weather: Progress and Challenges in Research and Applications.* Ed. Song P., Siscoe G., Singer H.J. Geophys. Monograph Ser. V. 125. AGU. Washington. DC. 123 p. 2001.
- *Wu C.J., Usoskin I.G., Krivova N., Kovaltsov G.A., Baroni M., Bard E., Solanki S.K.* Solar activity over nine millennia: A consistent multi-proxy reconstruction // *Astron. Astrophys.* V. 615. A93. P. 1–13. 2018.
- *Yau K.K.C., Stephenson F.R.* A revised catalogue of Far Eastern observations of sunspots (165 BC to AD 1918) // *Q.J. R. Astr. Soc.* V. 29. P. 175–197. 1988.
- *Zolotova N.V., Ponyavin D.I.* The Maunder minimum is not as grand as it seemed to be // *Astroph J.* V. 800. № 42. P. 1–14. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/1/42>
- *Zolotova N.V., Ponyavin D.I.* How deep was the Maunder minimum? // *Solar Phys.* V. 291. № 9–10. P. 2869–2890. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0908-z>