

УДК 523–62, 523.9

35-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ В СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 1000–1900 ГГ.

© 2025 г. Н. Г. Птицына^{1,*}, И. М. Демина¹

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

*e-mail: nataliaptitsyna@yahoo.com

Поступила в редакцию 08.08.2024 г.

После доработки 17.09.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

Проведен спектральный анализ солнечной активности в 1000–1900 гг. с помощью Фурье-преобразования и вейвлет-анализа в диапазоне, лежащем между периодом магнитного цикла Хейла (~22 года) и цикла Глейсберга (50–120 лет). В качестве исходных данных были использованы две реконструкции числа солнечных пятен по косвенным данным на основе: а) числа низкоширотных полярных сияний и б) концентрации ^{14}C в кольцах деревьев. Проведенный анализ показал, что в спектрах обеих реконструкций наблюдаются выраженные стабильные вариации с периодом ~30 и ~40 лет, которые присутствуют даже во время гранд-минимумов/максимумов. Источником этой вариации предполагается частотная модуляция циклом Зюсса с периодом ~200 лет основного колебания с периодом ~35 лет, в результате чего образуются две боковые ветви ~30 и ~40 лет. Некоторая разница в полученных спектрах двух реконструкций может быть связана с различным вкладом закрытых и открытых магнитных полей при восстановлении солнечной активности из разных косвенных данных.

Ключевые слова: реконструкция солнечной активности, вариации с периодом 30–40 лет, вейвлет анализ, частотная модуляция

DOI: 10.31857/S0016794025020116, EDN: CYQJTB

1. ВВЕДЕНИЕ

Темные области на солнечном диске – солнечные пятна – являются наиболее эффектным и легко наблюдаемым аспектом солнечной активности (СА). Систематическая регистрация пятен началась с 1610 г., когда был изобретен телескоп. Численное выражение количества и структуры пятен в определенный интервал времени может служить косвенной мерой СА. Наиболее часто употребляемым численным индексом СА является число Вольфа W или его откорректированный вариант SN . W – это комбинация числа групп пятен и количества индивидуальных пятен, с учетом поправки, связанной с приведением наблюдений различных наблюдателей к единой системе.

Число солнечных пятен SN по телескопическим наблюдениям известно более или менее надежно только за последние 400 лет. Более длинные ряды SN могут быть получены с использованием косвенных данных, зафиксированных тем или иным способом на Земле в исторические эпохи. Это, например, сведения о появлении полярных сияний, записи о которых в историче-

ских документах встречаются с V века до нашей эры [Schöve, 1962; Keimatsu, 1968; Eddy, 1980; Silverman, 1992; Siscoe, 1980; Наговицын, 2001; Feynman and Ruzmaikin, 2014]. Кроме того, широко используются данные о космогенных изотопах, сохраненные в природных архивах Земли, как например, концентрация радиоуглерода в кольцах деревьев или содержание нитратов в полярных льдах [Muscheler et al., 2006; Usoskin et al., 2007; Travers et al., 2012; Наговицын, 2014; Usoskin, 2017; Brehm et al., 2021; Kudsk et al., 2022].

СА подвержена квазипериодическим колебаниям, самое известное и стабильное из которых – это 11-летний цикл Швабе. Кроме того, широко изучены 22-летний цикл Хейла, ~100-летний цикл Глейсберга и ~200-летний цикл Зюсса. Менее исследованным является диапазон периодов между циклом Хейла и циклом Глейсберга. Интерес к этому диапазону вариаций СА связан с известным 35-летним климатическим циклом Брюкнера, установленным еще в XIX в. С этого времени делались неоднократные попытки ассоциировать его с возможным аналогичным ци-

клом в числе солнечных пятен SN . Сам Брюкнер [Brückner, 1890] не смог обнаружить 35-летнюю вариацию в числах Вольфа. Более поздние исследования также показали, что циклы продолжительностью ~30–40 лет не проявляют себя в индексах пятнообразования [Витинский и др., 1986]. В работах последних десятилетий в солнечных и геомагнитных данных обнаружены вариации с периодами 31.1, 38.6 и 47 лет [Kane, 1999; Echer et al., 2004; Singh and Badruddin, 2014]. Авторы работ [Raspopov et al., 2000; Echer et al., 2004] полагают, что период в 31 год в спектрах SN , возможно, является солнечным источником 35-летнего цикла Брюкнера. Результаты работы [Kane, 1999] свидетельствуют о том, что спектральные характеристики СА для более ранних интервалов времени (до 1914 г.) и более поздних существенно различаются. В частности, автор работы [Kane, 1999] в спектрах W для 1914–1996 гг. выявил наиболее значительные пики, соответствующие периодам 5.3, 8.3, 10.5, 12.2 и 47 лет. Для более ранних временных интервалов (1748–1827, 1828–1913 гг.) более или менее значительные пики в области периодов $T \sim 30$ –40 лет не были обнаружены.

В последнее время были получены некоторые указания на существование околосорокалетней вариации в некоторых других характеристиках СА. Наличие цикла с периодом 36 лет было найдено при исследовании экспериментальных рядов данных о частоте возникновения магнитных бурь [Veretenenko et al., 2020] по нескольким коротким выборкам XIX и XX вв. Анализ спектрограмм обс. Маунт Вильсон в XX в. (1910–1976 гг.) показал, что в солнечном вращении в это время наблюдается 40-летняя вариация [Bertello et al., 2020]. Однако авторы [Bertello et al., 2020] поднимают вопрос о реальности такой квазипериодичности в связи с ограничениями метода, который они использовали.

Данная работа является продолжением нашего исследования [Птицына и Демина, 2024], в котором для реконструированного по полярным сияниям ряда SN за 700 лет было обнаружено присутствие 30–40-летней вариации в некоторые интервалы времени. Цель данной работы состоит в более детальном исследовании вариабельности СА на временном масштабе 900 лет в диапазоне периодов 25–50 лет, лежащем между периодами циклов Хейла и Глейсберга. Кроме того, нашей задачей также был поиск возможной причины, которая могла бы обусловить наличие 30–40-летнего цикла и вариаций его амплитуды и/или частоты. Важной особенностью нашего исследования является использование двух реконструкций числа солнечных пятен SN , полученных принципиально разными методами: восстановленных на основе данных об

исторических полярных сияниях в 1000–1700 гг. [Птицына и Демина, 2020] и данных о продукции космогенного изотопа ^{14}C в годовых кольцах деревьев в 1000–1900 гг. [Usoskin et al., 2021].

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной работе проведен анализ двух реконструированных рядов СА SN_1 и SN_2 , полученных на основе двух принципиально разных источников косвенной информации.

Ряд SN_1 охватывает период длительностью 700 лет с 1000 по 1700 г. [Птицына и Демина, 2020]. Эта реконструкция основана на данных о наблюдениях полярных сияний в Европе, а также в Европейской и Азиатской частях России на средних и в низких широтах (геомагнитная широта $\phi < 56^\circ$). При синтезировании ряда SN_1 учитывался вклад главного магнитного поля Земли и вносились нормировочная консервативная “цивилизационная” поправка, основанная на росте населения и числа Университетов в Европе. Подробно детали построения реконструкции описаны в работе [Птицына и Демина, 2020]. Число полярных сияний может служить мерой численных характеристик СА и ее вариаций, так как ход полярных сияний отражает ход СА. Особенности этой связи зависят от широты [Siscoe, 1980; Liritz and Petropoulos, 1987; Vasquez et al., 2014; Птицына и др., 2017]. Для авроральных событий, регистрируемых на средних и низких широтах, наблюдается прямая корреляция числа полярных сияний с W .

Ряд SN_2 был реконструирован на основе данных о продукции космогенного изотопа ^{14}C в годовых кольцах деревьев на территории Англии и Швейцарии (геомагнитная широта $\phi \approx 50^\circ$ – 62°) [Usoskin et al., 2021]. Этот ряд охватывает интервал с 971 по 1899 г. Космогенные радионуклиды производятся в атмосфере Земли высокoenергичными частицами галактических космических лучей. Их атмосферная концентрация зависит от потока частиц и уровня СА. При реконструкции СА используется параметр солнечной модуляции Φ , который определяется гелиосферным/солнечным магнитным полем, экранирующим галактические космические лучи. На уровень концентрации радионуклидов оказывает также влияние магнитное поле Земли, изменения которого также учитываются в работе [Usoskin et al., 2021]. Большую неопределенность в оценку транспорта космических нуклидов из атмосферы в природные архивы, где они запасаются, может вносить влияние климатических условий.

Оба использованных в исследовании ряда приведены на рис. 1. Реконструированный ряд SN_1 (рис. 1a) приводится в соответствии с рабо-

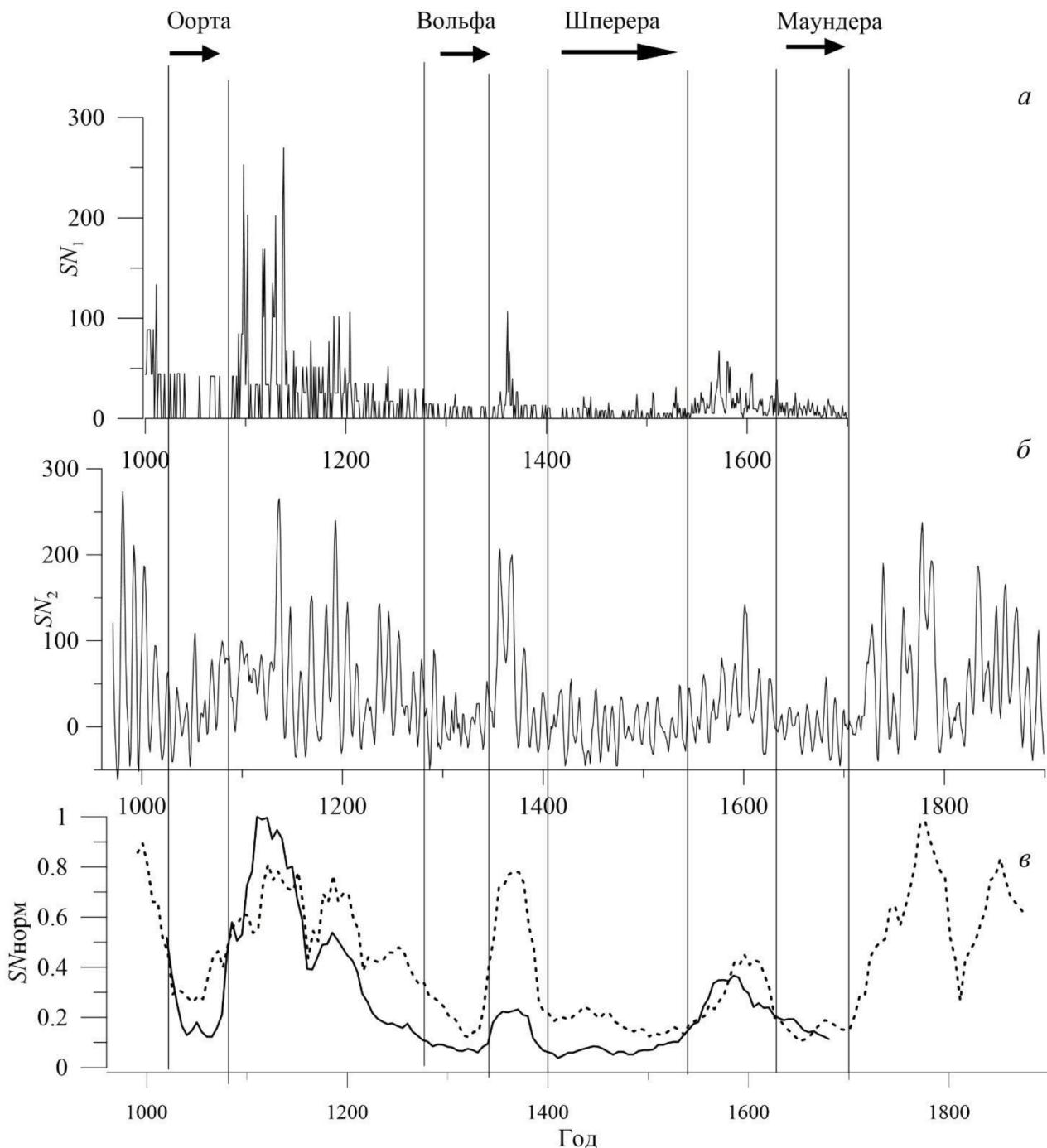


Рис. 1. Реконструированные ряды солнечной активности. (а) – по полярным сияниям ряд SN_1 , (б) – по ^{14}C ряд SN_2 ; (в) – сглаженные и нормированные ряды: сплошной линией показан ряд SN_1 , штриховой линией – ряд SN_2 . Вертикальными линиями отмечены гранд-минимумы.

той [Птицына и Демина 2020]. В качестве ряда SN_2 , реконструированного по ^{14}C (рис. 1б), нами использовались годовые значения без сглаживания в соответствии с работой [Usoskin et al., 2021], этот ряд доступен на сайте (<https://cdsarc.cds.unistra.fr/ftp/J/A+A/649/A141/osn.dat>).

Вертикальными линиями отмечены гранд-минимумы Оорта, Вольфа, Шперера и Маундера.

На рис. 1 заметна разница амплитуд SN_1 и SN_2 . Меньшая амплитуда ряда SN_1 (пропорциональ-

ная числу полярных сияний) возникает из-за того, что при его реконструкции использовались не все происходившие на Земле авроральные события, а только самые большие исторические полярные сияния, видимые на средних и в низких широтах. Несмотря на систематическую разницу амплитуд, ясно виден общий характер изменений СА во времени. В частности, для обоих рядов глобальные уменьшения и повышения амплитуды (гранд-минимумы и длительные максимумы) хорошо согласуются по времени. Чтобы подчеркнуть сходство этих рядов, мы сгладили их скользящим окном 40 лет и нормировали на максимальное значение. Результат показан на рис. 1в, сплошной линией – реконструкция по полярным сияниям, штриховой линией – по ^{14}C . Размер выборки выбирался так, чтобы он не превышал временной интервал всех гранд-минимумов. Общий характер изменения рассматриваемых временных рядов не вызывает сомнения.

Для анализа спектров SN_1 и SN_2 использовались анализ Фурье и вейвлет-преобразование. Первое давно известно и широко применяется на практике, поскольку позволяет выявить основные доминирующие периоды, средние за рассматриваемый период времени. В последние десятилетия для анализа сигналов широко используется вейвлет-преобразование [Daubechies, 1992]. Основное отличие вейвлет-преобразования от Фурье-анализа состоит в том, что оно позволяет локализовать сигнал заданной формы и получить информацию о спектральной структуре сигнала в отдельные моменты времени и, как следствие, об изменении во времени величины присутствующих в сигнале периодов и их амплитуды. По сути, вейвлет-преобразование представляет собой свертку заданного сигнала с исследуемым временным рядом, чем и обеспечивается временная локализация отдельных спектральных составляющих. Заданный сигнал носит название порождающей функции. Эта функция масштабируется на разные временные интервалы, и это дает зависимость спектра от масштаба порождающей функции, который может быть пересчитан в периоды. Таким образом, вейвлет-спектр представляет собой матрицу, которая отражает изменение доминирующих периодичностей во времени. Подробно см., например, [Daubechies, 1992].

3. АНАЛИЗ ФУРЬЕ РЯДОВ SN_1 И SN_2

Первичные оценки спектрального состава анализируемых временных рядов были сделаны на основе применения к ним преобразования Фурье. Результат вычисления показан на рис. 2а. Поскольку исходные временные ряды отличают-

ся по интенсивности, и, как следствие, спектры достаточно сильно отличаются по амплитуде, то они показаны в разных масштабах. Масштаб для каждого спектра выбирался из соображений наглядности представления. Ось периодов переведена в логарифмический масштаб, что позволяет получить лучшее разрешение в интересующем нас диапазоне вариаций.

На рис. 2а видно, что в спектрах обоих рядов SN_1 , SN_2 доминируют 11-летняя составляющая и несколько пиков в области периодов цикла Глейсберга $T \sim 50$ –120 лет, которые резко выделяются по интенсивности. Кроме этого, можно заметить отдельные максимумы в области периодов 25–50 лет, проявляющиеся в рядах SN_1 и SN_2 в разной степени. Однако четко выраженный пик в этом частотном диапазоне ($T \sim 31.8$ лет) присутствует только для ряда SN_1 . Далее все временные ряды были пропущены через полосовой фильтр с полосой пропускания 20–55 лет. Спектры полученных в результате фильтрации сигналов показаны на рис. 2б. Удалось заметно перераспределить спектральную мощность в область периодов ~ 30 –40 лет. Так, для ряда SN_2 повысилась интенсивность в области от 25 до 50 лет, стали четко проявляться максимумы около 35 лет: в порядке убывания интенсивности 45.7, 26.1, 31.48 лет (рис. 2б). Для спектра реконструкции SN_1 полоса ~ 30 -летних периодов заметно усилилась. Кроме доминирующего пика 31.8 лет, видны равнозначные пики 43.75 и 21.88 лет.

В спектре временного ряда чисел солнечных пятен SN , полученному по наблюдательным данным за последние 300–400 лет, среди множества пиков кроме доминирующего 11-летнего были обнаружены пики с периодами $T = 22$ и $T > 50$ лет [Petrovay, 2020]. Во многих работах найдены кратковременные, непостоянныепериодичности, которые отличаются для разных массивов данных [Kane, 1999]. Для некоторых коротких интервалов были найдены пики 31.1, 38.6 и 47 лет [Kane, 1999; Echer et al., 2004; Singh and Badruddin, 2014]. Таким образом, полученные в этом параграфе результаты для реконструированных рядов не противоречат тем, что получены для наблюдательного ряда, а их спектральные характеристики позволяют надеяться на выделение 30–40-летних циклических особенностей хотя бы на отдельных временных интервалах. Для этого далее мы проведем вейвлет-анализ рядов SN_1 и SN_2 в диапазоне масштабов, соответствующих ~ 30 –40-летним периодичностям, на длительном временном интервале (1000–1900 лет), что позволит выявить изменчивость этих периодичностей во времени.

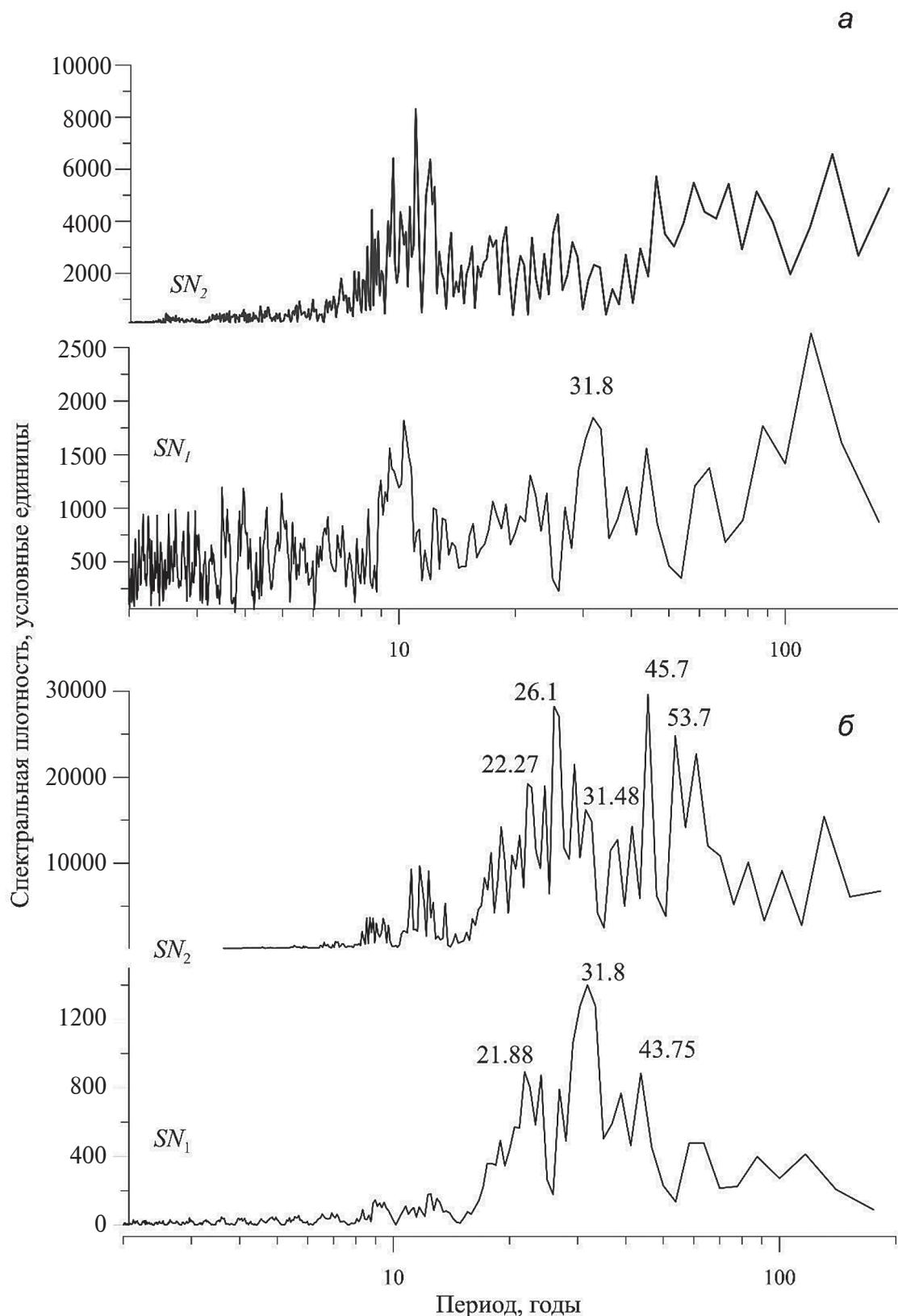


Рис. 2. Спектры анализируемых временных рядов до (а) и после фильтрации (б).

4. АНАЛИЗ ЦИКЛИЧНОСТИ SN_1 С ПЕРИОДОМ 30–40 ЛЕТ

4.1. Вейвлет-анализ

В приведенном выше результате Фурье-преобразования временного ряда солнечной активности SN_1 , реконструированной по полярным сияниям, отчетливо проявляется 30–40-летняя составляющая. Для подробного анализа временного изменения спектра в этом диапазоне нами был применен вейвлет-анализ. В качестве порождающей или базовой функции была выбрана функция Морле [Grossman and Morlet, 1984] $morl(x) = \exp(-x^2/2)\cos(5x)$, представляющая собой плоскую волну, модулированную гауссианой. Масштабы этой базовой функции близки по значениям к периодам, что позволяет легко выделить нужный диапазон при интегрировании. Поскольку вейвлет-преобразование представляет собой свертку сигнала и порождающей функции

$$\Psi(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где $f(t)$ – анализируемый сигнал, a – масштаб вейвлета, b – сдвиг, Ψ – порождающая функция, за счет изменения масштаба мы, фактически, изменяем период, а сдвиг обеспечивает локализацию данной спектральной составляющей во времени. В результате вычисления свертки (1) получаем матрицу коэффициентов. Для ее визуализации использует-

ся представление в виде карты изолиний модуля коэффициентов. Результат, полученный для ряда SN_1 , показан на рис. 3. Символами отмечены максимумы, которые мы отнесли к 30- и 40-летним составляющим. Часть наблюдаемых максимумов остались непомеченными, поскольку соответствуют периодам < 27 лет. Представляется, что эти максимумы могут отражать суммарный эффект от вкладов изменяющихся периодов 30- и 22-летних составляющих. В силу малой разности частот этих составляющих выполненной полосовой фильтрацией невозможно полностью разделить вклады столь близких периодов.

На рис. 3 видно стабильное наличие 30- и 40-летнего циклов, период которых меняется с течением времени. Следует отметить, что в некоторые интервалы времени (1000–1070 и 1200–1420 гг.) одновременно присутствуют две ветви с периодами $T_1 \sim 30$ лет и $T_2 \sim 40$ лет. Ветви этой вариации хорошо прослеживаются также во время гранд-минимумов Оорта (1020–1080 гг.), Вольфа (1265–1345 гг.) и Шперера (1400–1540 гг.) и длинных максимумов (~ 1080 – 1250 гг., ~ 1350 – 1400 гг. и ~ 1550 – 1625 гг.). К сожалению, нет возможности оценить наличие 30-летнего цикла во время минимума Маундера (1650–1710), поскольку здесь уже сказывается краевой эффект. С 1200 г. ветви с периодами T_1 и T_2 находятся в подобии антикорреляции. Мы предположили, что наличие такой картины может быть обусловлено модуляционными эффектами более длинноволнового процесса.

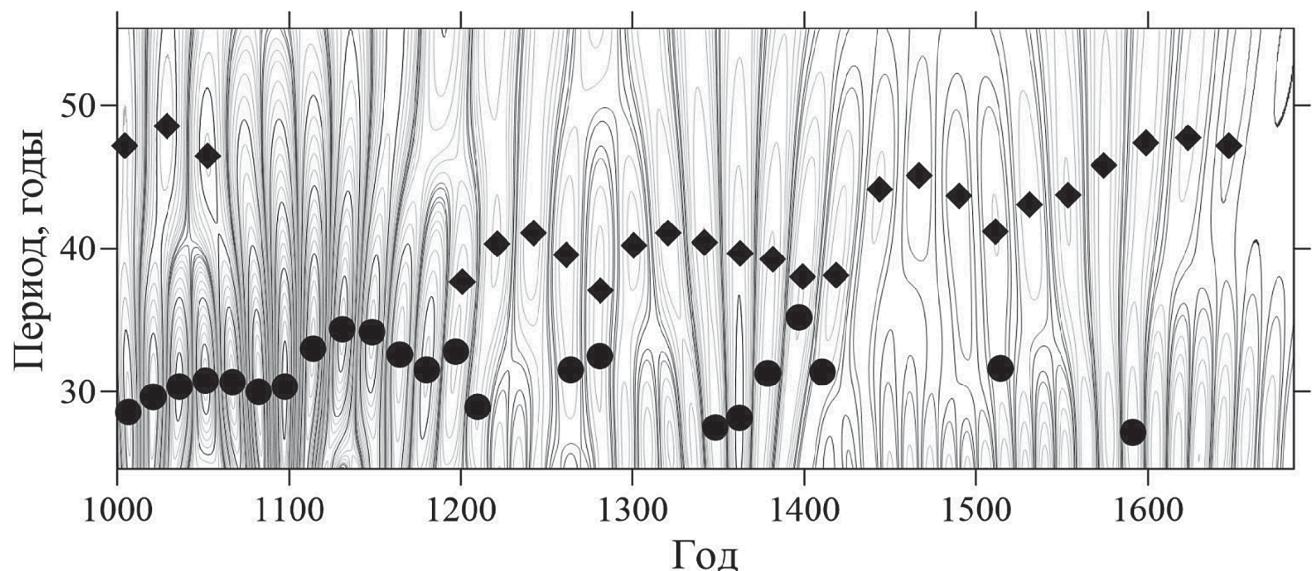


Рис. 3. Вейвлет-спектр временного ряда SN_1 . Изолинии – модуль вейвлет-коэффициентов, круги – максимумы 30-летней составляющей, ромбы – максимумы 40-летней составляющей.

4.2. Модуляция

При частотной модуляции период основного колебания изменяется в зависимости от амплитуды модулятора. Главные характеристики – это девиация или наибольшее отклонение частоты (периода) основного колебания от среднего и индекс модуляции K , определяющий степень воздействия модулятора на основной сигнал. Понятие частотной модуляции и все ее свойства разработаны для гармонических сигналов. Основное отличие частотной модуляции от амплитудной состоит в том, что при амплитудной модуляции с периодичностью, задаваемой модулятором, во времени изменяется амплитуда сигнала, но не его период, а при частотной модуляции наоборот – изменяется период, но не амплитуда. Причем в спектрах результирующего сигнала в обоих случаях появляются дополнительные комбинационные гармоники. В случае частотной модуляции их количество и соотношение амплитуд зависят от индекса $K = \Delta\omega/\omega_m$, где $\Delta\omega$ – максимальное отклонение, или девиация, частоты, а ω_m – частота модулятора. Рассматриваемые нами временные ряды не являются гармоническими или суммой гармонических сигналов. Мы предполагаем присутствие в этих рядах квазипериодических составляющих. И, судя по изменению отдельных спектральных составляющих в вейвлет-спектрах, исходные сигналы подвержены и амплитудной (изменение интенсивности), и частотной (изменение периода) модуляции. Вообще в случае негармонических сигналов влияние модулятора (также негармонического) носит сложный характер, однако ранее в работе [Птицына и Демина, 2023] нами было выполнено моделирование частотной модуляции 11-летнего цикла, в результате был получен вейвлет-спектр, в котором наблюдалась все особенности, характерные для вейвлет-спектра исходного сигнала. Это позволило нам предположить, что для проверки гипотезы о роли частотной модуляции в формировании 30- и 40-летних составляющих и получения оценки периода возможного модулятора возможно использование основных формул, описывающих частотную модуляцию. Если A_0 и ω_0 – амплитуда и частота исходного сигнала, а ω_m – частота модулятора, то результирующая зависимость от времени будет выражаться формулой

$$F(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\omega \cos(\omega_m t + \phi_m) + \phi_0),$$

где ϕ_0 и ϕ_m – соответствующие фазы. Тогда, положив фазы равными нулю, а $K=1$ – в этом случае

девиация частоты равна частоте модулятора – получим, что изменение частоты основного колебания можно записать как

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_m \cos \omega_m t. \quad (2)$$

Отсюда получаем связь периода основного колебания T_0 , периода модулятора T_m и наблюдаемых в спектре периодов T_1 и T_2 . Для точек максимального отклонения частоты ($t=0$), переходя к периодам, из (2) получим

$$\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_m} = \frac{1}{T_1} \quad \text{и} \quad \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_m} = \frac{1}{T_2}. \quad (3)$$

Очевидно, что, зная T_1 и T_2 и сложив выражения в (3), можно получить T_0 . Однако для этого простого действия нужно знать T_1 и T_2 в один и тот же момент времени и с максимальной разницей между T_1 и T_2 , прежде всего, чтобы снизить влияние ошибок определения каждого периода на конечный результат. Заметим, что для оценки T_0 знание точного значения девиации не требуется, поскольку разность частот исключает зависимость от ω_m . Таких пар точек немного, но они позволяют оценить $T_0 = 35 \pm 1$ год. Чтобы получить оценку периода модулятора по формуле (3) уже требуется точное знание девиации. В нашем случае нужна такая пара точек, которая имеет одно и то же время, а отклонение периодов от T_0 в этих точках максимально. Пар, которые бы в точности удовлетворяли этим условиям, нет, а использование точек со свойствами, близкими к требуемым, вызывает значительный разброс результата $T_m = 188 \pm 9$ лет. Заметим, что полученные результаты носят оценочный характер, поскольку рассматриваемые временные ряды не представляют собой гармонических сигналов.

В рамках гипотезы о модуляции основного колебания T_0 длинноволновым сигналом можно для каждой ветви построить зеркальную, приняв за каждую из ветвей полученные из вейвлет-спектра периоды T_1 и T_2 и воспользовавшись формулами (3), при этом считаем период основного колебания известным и равным полученной выше оценке 35 лет. Будем далее называть построенные зеркальные ветви прогнозируемыми периодами. По сути, периоды боковых ветвей непрерывно меняются синхронно с амплитудой модулятора, но для краткости будем везде далее называть их 30-летней и 40-летней ветвями.

На рис. 4 черными кругами показано изменение периода 30-летней ветви, а черными ромбами – то же 40-летней. По значениям периодов 30-летней ветви были вычислены прогнозируемые значения периодов 40-летней, на рис. 4 они

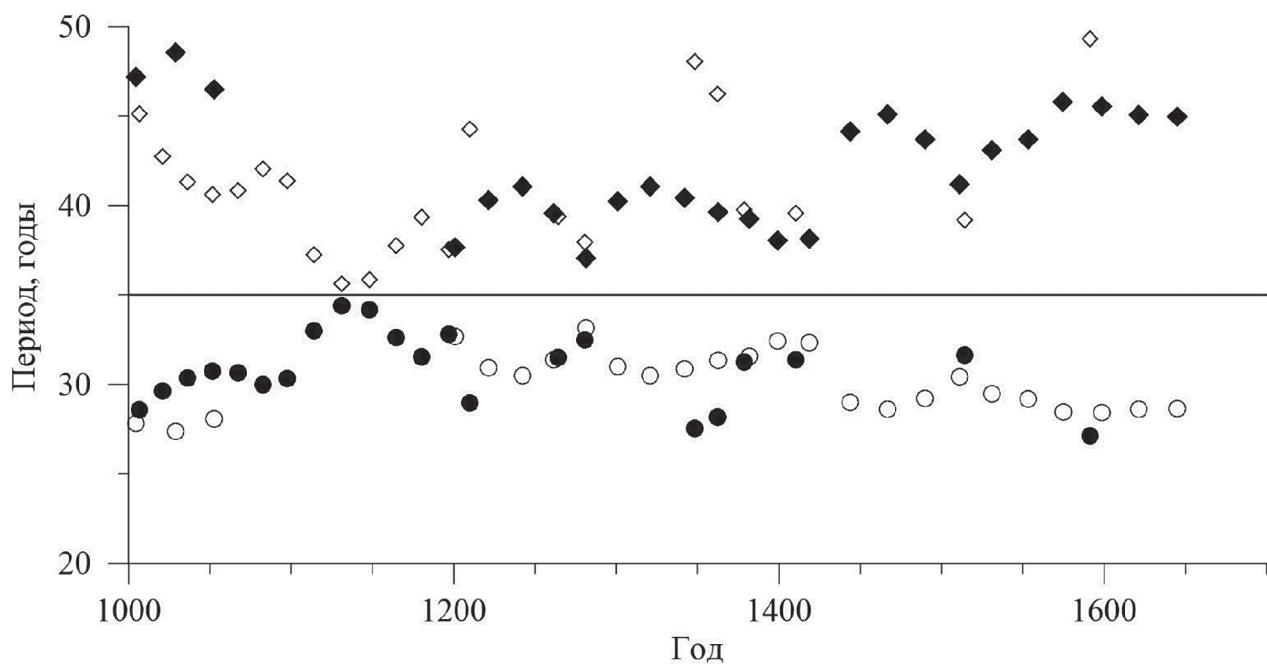


Рис. 4. Изменение периода 30–40-летних составляющих, найденных по вейвлет-спектру SN_1 и прогнозируемых в рамках гипотезы о модуляции длинноволновым сигналом. Кругами обозначены периоды 30-летней составляющей, ромбами – 40-летней, закрашенные – полученные из вейвлет-спектра, незакрашенные – прогнозируемые.

показаны незакрашенными ромбами. И наоборот, по значениям 40-летней ветви были вычислены прогнозируемые 30-летние, показанные на рис. 4 незакрашенными кругами. Можно видеть, что отдельные выделенные точки сильно отличаются от прогнозируемых. Однако, если посмотреть на положение этих максимумов спектра на рис. 3, то можно заметить, что эти точки приходятся на области сильного влияния на 30-летние более коротких периодов, т.е. значения периодов 27–28 лет, скорее всего, не относятся в чистом виде к 30-летней ветви. Можно предположить, что длинноволновая ~200-летняя составляющая модулирует по частоте не только 35-летний цикл и, как мы получили ранее [Птицына и Демина, 2022], цикл Глейсберга, но тот же эффект можно ожидать для 22-летней составляющей. Для нее девиация частоты/периода в этом случае составила бы 2–3 года. А если, по аналогии с 11-летней составляющей, предположить наличие влияния цикла Глейсберга, то девиация может составить 7–8 лет. И тогда спектры нижней ветви 35-летней и верхней 22-летней будут в значительной степени перекрываться.

Следует отметить, что на рис. 3 хорошо просматриваются боковые ветви, а основная частота $T = \sim 35$ лет практически не выявляется в виде отдельной ветви. Надо иметь в виду, что разность между периодами основного колебания и боко-

вых ветвей не превышает 10 лет, что при шаге шкалы периодов 1.23 года создает большие трудности для выделения всех 3 ветвей разной амплитуды. Однако на рис. 4 видно, что основная частота, тем не менее, косвенно хорошо проявляется в изменении боковых ветвей. Смена характера изменения 30- и 40-летних ветвей от роста к убыванию (ветви сходятся и расходятся) приходится как раз на значения периодов ~ 35 лет. Это дополнительно говорит в пользу гипотезы о природе 30- и 40-летних ветвей как проявлениях в спектре частотной модуляции длинноволновым процессом основного колебания с периодом ~ 35 лет.

5. АНАЛИЗ ЦИКЛИЧНОСТИ SN_2 С ПЕРИОДОМ 30–40 ЛЕТ

5.1. Вейвлет-анализ

К временному ряду SN_2 были применены все те же этапы обработки, что и к ряду SN_1 . Полученный вейвлет-спектр показан на рис. 5.

Выделяемые периоды отражают общий характер спектра ряда SN_2 , приведенный выше на рис. 2. Кроме того, на рис. 5 видны те же тенденции, что и для вейвлет-спектра SN_1 (рис. 3). В спектре SN_2 наблюдается стабильное присутствие 30–40-летней вариации, состоящей из двух ветвей с периодами $T \approx 30$ и $T \approx 40$ лет на протяжении всего интервала времени (1000–1900 гг.),

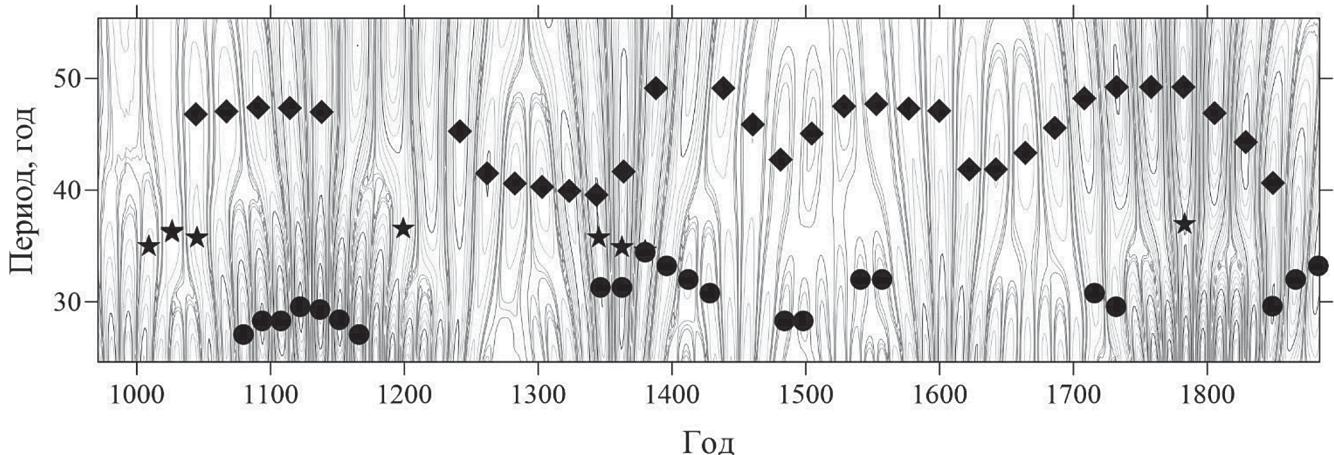


Рис. 5. Вейвлет-спектр временного ряда SN_2 . Условные обозначения те же, что и для рис. 3, звездочками отмечен выделяемый период основного колебания с периодом $T = 35 \pm 1$ год.

в том числе и во время гранд-минимумов, включая минимум Маундера (1610–1710 гг.), и длительных максимумов. Однако это относится в основном к ветви с периодом 40 лет, так как 30-летний цикл хуже выделяется на фоне изменения периодов в полосе 22-летних вариаций. Рост периода последних до 26–27 лет, так же как это наблюдалось для ряда SN_1 , делает разделение растущих 22-летних и убывающих 30-летних практически невозможным. Если сравнить интегральную интенсивность спектра в полосах 22–27 лет (I_1) и 28–33 года (I_2), то для временного интервала 1080–1180 гг. их отношение составляет $I_2/I_1=1.19$, и 30-летняя ветвь может быть выделена, а для временного интервала 1750–1850 гг. это отношение составляет 0.77, и 30-летняя ветвь не выделяется. Можно заметить также, что 30- и 40-летние ветви, как и для спектра ряда SN_1 , демонстрируют тенденцию к антикорреляции. Однако хорошо видно, что 40-летняя составляющая по большей части лежит выше 45 лет, в то время как 30-летняя наибольшую интенсивность имеет в полосе 27–30 лет, что может быть прямым следствием влияния 22–25-летней и 50–60-летней составляющих, доминирование которых сохранилось в спектре SN_2 и после фильтрации (рис. 2). В результате этого влияния полученные из спектра периоды 30- и 40-летних составляющих могут быть занижены и завышены, соответственно. В то же время именно благодаря тому, что 30- и 40-летние составляющие сильно “разбегаются”, в вейвлет-спектре можно видеть периоды, близкие к 35 годам (помечены на рис. 5 звездочками). В соответствии с нашей гипотезой о частотной модуляции 35 лет – это как раз период основного колебания, а 30 и 40 лет представляют собой наблюдаемый в спектре результат частотной модуляции. Пар-

точек, принадлежащих разным ветвям и пригодных для оценки периода модулятора, было найдено всего 3. Оцененный по ним период модулятора составил 205 ± 53 года. Ошибка довольно значительная, но следует иметь в виду, что на полученные оценки оказывают сильное влияние как 50–60-летние, так и 20–25-летние составляющие.

5.2. Модуляция

Вынесем изменения периодов на отдельный график и вычислим прогнозируемые значения 30- и 40-летних ветвей в предположении частотной модуляции 35-летнего колебания, как это было сделано выше для ряда SN_1 . Результат показан на рис. 6.

Сравнение прогнозируемых значений периодов с полученными из вейвлет-спектра показывает, что наибольшее отличие наблюдается в периоды максимального влияния 50–60-летних вариаций (1050–1150 гг., около 1400 и 1700 гг.). Для этих временных интервалов значения периодов в спектре получаются явно завышенными.

Наше предположение о природе 30- и 40-летних колебаний, как результате частотной модуляции 35-летней составляющей длинноволновым процессом, предполагает, что для рассматриваемых двух временных рядов SN_1 и SN_2 , полученных на основе разных данных, этот модулятор должен иметь один период и одинаковую фазу. Что касается периода, то для него получены близкие значения, практически, в пределах погрешности ($T_m = 188 \pm 9$ лет для ряда SN_1 и 205 ± 53 года для ряда SN_2). Что касается фазовой характеристики, то для сравнения на рис. 7 приведены отдельно прогнозируемые значения, вы-

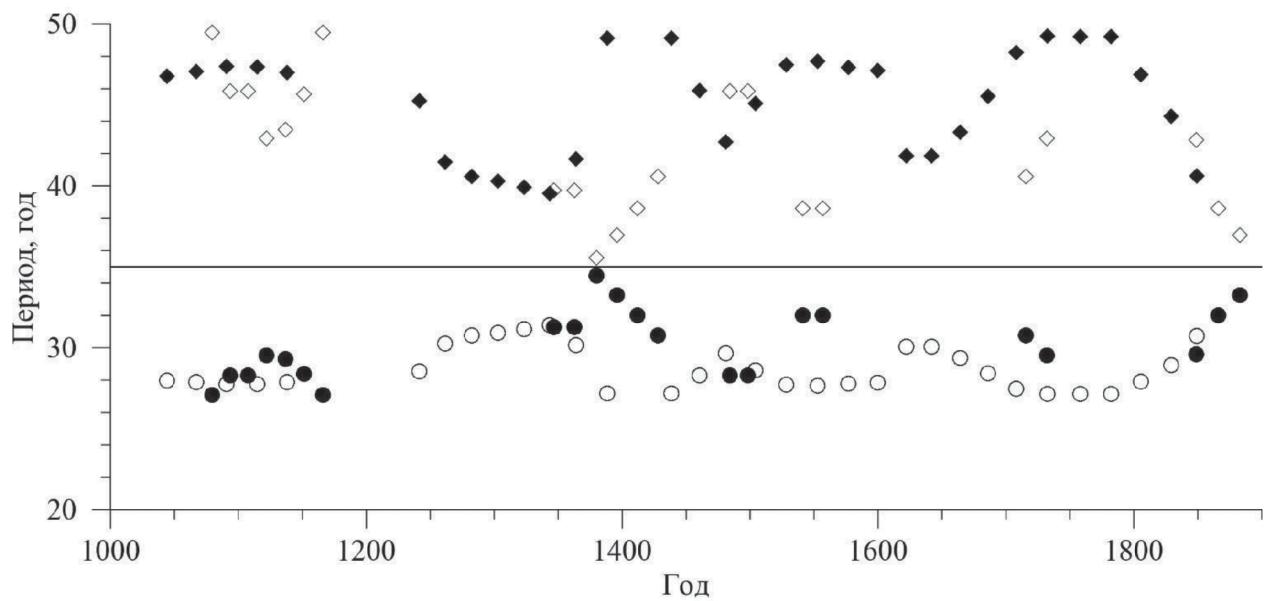


Рис. 6. Изменение периода 30- и 40-летних составляющих, найденных по вейвлет-спектру SN_2 и прогнозируемых в рамках гипотезы о модуляции длинноволновым сигналом. Условные обозначения те же, что на рис. 4.

численные для ряда SN_1 , здесь они обозначены как \diamond для 30-летней ветви и как $*$ для 40-летней.

Плотность точек для рассматриваемых 4 ветвей не достаточна для надежного их сравнения, но можно выделить по одному временному ин-

тервалу для 40-летней и 30-летней ветви, где значения прогнозируемых периодов SN_1 и SN_2 образуют непрерывные участки. Эти временные периоды на рис. 7 выделены прямоугольниками. Для 40-летней составляющей коэффициент кор-

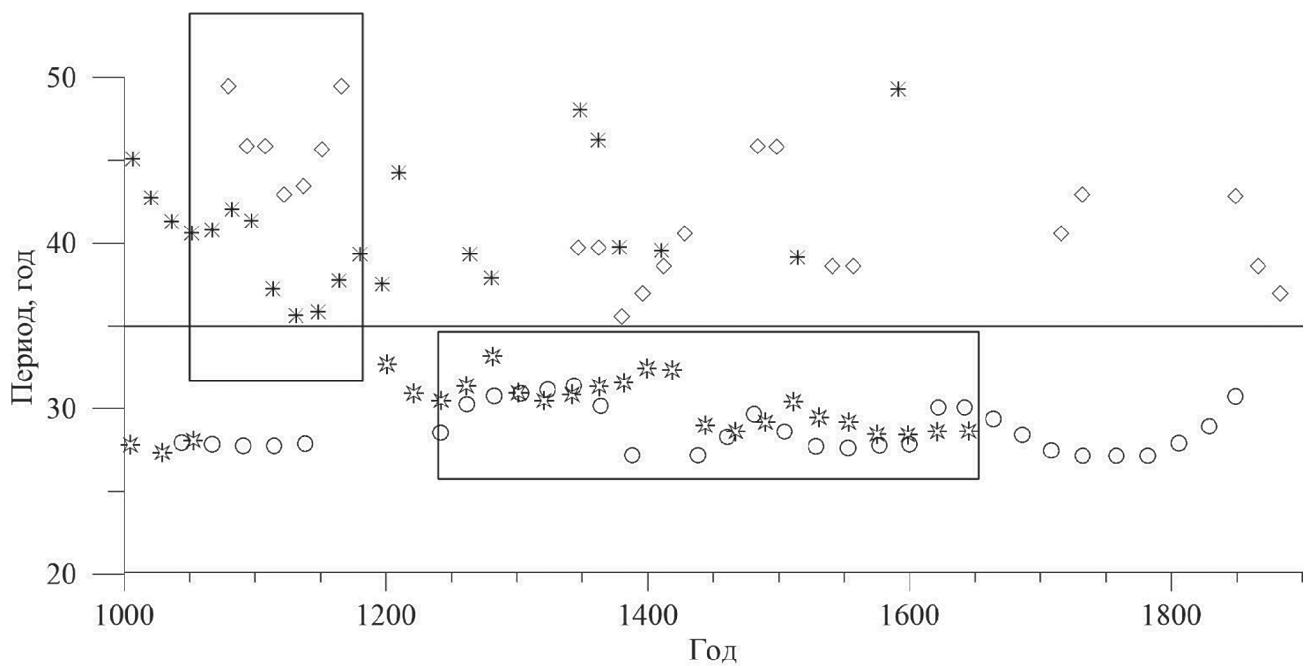


Рис. 7. Сравнение прогнозируемых ветвей 35-летнего основного колебания по вейвлет-спектрам SN_1 и SN_2 . Символами \circ обозначены прогнозируемые периоды 30-летней ветви SN_2 , символами \diamond — то же 40-летней ветви, $\diamond\diamond$ — то же 30-летней и $*$ — 40-летней ветви SN_1 .

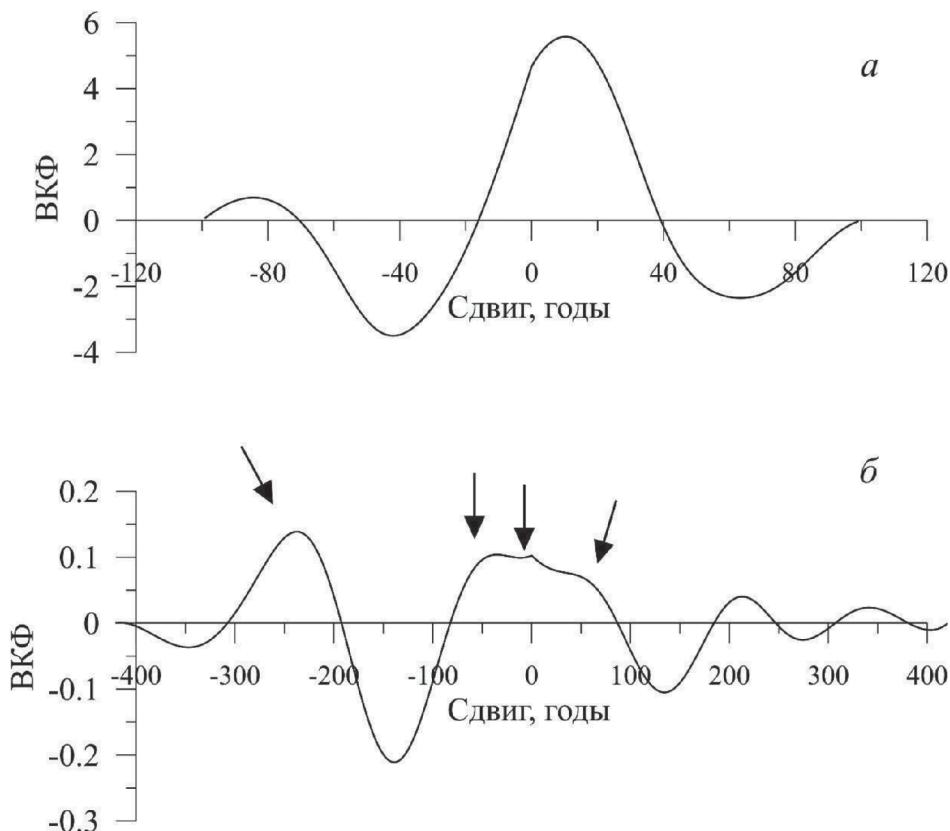


Рис. 8. Взаимные корреляционные функции 40-летней (а) и 30-летней (б) спектральных составляющих в SN_1 и SN_2 . Стрелками отмечены обсуждаемые в тексте максимумы.

реляции k между прогнозируемыми периодами SN_1 и SN_2 составил 0.7. Для оценки возможного сдвига была рассчитана взаимная корреляционная функция (ВКФ). Результат показан на рис. 8а. Ее максимум оказался смещен на 10 лет, что фактически лежит в пределах изменения периода 40-летней составляющей. Для 30-летней ветви из-за пробелов и отдельных резких отклонений интерполяция проводилась сглаживающими кубическими сплайнами. В анализируемых изменениях прогнозируемых 30-летних периодов присутствовал линейный тренд, который был удален для вычисления корреляционных характеристик. В результате вычисленный коэффициент корреляции составил $k=0.4$, а в ВКФ получен широкий максимум в нуле с двумя дополнительными максимумами, практически равноценными: 0 и -36 лет (рис. 8б). Максимум, симметричный последнему, плохо выражен и может быть только оценен как 40 лет. Эти дополнительные максимумы по значению близки к периоду предполагаемого основного колебания, что говорит о присутствии такой периодичности в обоих временных рядах. Кроме широкого максимума в нуле в ВКФ 30-летних

ветвей присутствуют еще два симметричных максимума, причем на один из них приходится максимальная корреляция. Эти максимумы соответствуют сдвигу ± 235 лет, что свидетельствует о присутствии в обеих временных зависимостях такой длинноволновой периодичности. Этот факт можно рассматривать как еще одно свидетельство в пользу гипотезы о 30- и 40-летних ветвях, как о проявлении результата частотной модуляции околодвухсотлетним длинноволновым сигналом основного 35-летнего колебания.

Приведенные результаты дают основание для гипотезы о наличии иерархической структуры периодических составляющих в СА, причем более длинноволновые оказывают влияние на генерацию более коротковолновых, что проявляется в спектре как результат частотной модуляции.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наш анализ показал, что на протяжении второго тысячелетия в спектрах SN_1 и SN_2 стабильно присутствуют 30- и 40-летняя вариации, причем даже во время средневекового гранд-максимума и гранд-минимумов Оорта, Вольфа, Шперера

и Маундера. В целом, эволюцию со временем периодов 30- и 40-летней вариации можно соотнести с частотной модуляцией более длиннопериодным процессом, а именно циклом Зюсса ($T \approx 200$ лет) основного колебания с $T \approx 35$ лет. В результате формируется трехчастотная структура этой вариации с периодами боковых ветвей, изменяющихся в диапазонах $T_1 \approx 28 \div 35$ и $T_2 \approx 35 \div 45$ лет и основным периодом $T_0 \approx 35$ лет. Однако основная 35-летняя ветвь на фоне боковых видна очень слабо для обоих рядов. Такая картина без основной частоты может наблюдаться при некоторых соотношениях параметров модулируемого и модулирующего сигналов, чем часто пользуются в радиотехнической практике, чтобы снизить долю энергии, приходящуюся на несущую частоту сигналов [Гоноровский, 1977; Connor, 1982; Баскаков, 2016].

В этом контексте обратимся к результатам работы [Птицына и Демина, 2022], в которой найдено, что цикл Глейсберга состоит из трех выделенных ветвей с периодами 60, 88 и 140 лет, при этом формирование ветвей происходит в результате действия модулятора с периодом $T \approx 200$ лет, т.е. циклом Зюсса. Из модельных расчетов, проведенных авторами работы [Птицына и Демина, 2022], следует, что для частотно-модулированного сигнала при достаточно больших значениях коэффициента модуляции основной 88-летний период по амплитуде может быть значительно меньше боковых составляющих, а в отдельные моменты времени он может быть практически незамечен в спектре на их фоне. Именно этим авторы исследования [Птицына и Демина, 2022] объясняют отмеченный во многих работах факт [Clilverd et al., 2006; McCracken et al., 2013; Svalgaard, 2018], что 88-летний цикл Глейсберга плохо прослеживается в современную эпоху. По аналогии с результатами работ [Птицына и Демина, 2022; 2023], можно предположить, что именно из-за свойств частотной модуляции основной период ~ 35 лет проявляется в спектре в четком виде лишь в некоторые моменты времени на протяжении интервала 1000–1900 гг.

В работе [Птицына и Демина, 2023] показано, что вариации длины солнечного цикла за последние 320 лет могут быть описаны в рамках модели, представляющей собой 11-летнее колебание, которое подвергается частотной модуляции ветвями цикла Глейсберга (60 и 115 лет) с изменяющимся во времени влиянием модулятора. То есть в данном случае модулятором выступает цикл Глейсберга. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в системе вариаций СА, по-видимому, существует иерархия циклов, связанных между

собой модуляционными эффектами. В теории колебаний и нелинейной динамике известно, что иерархическая система осцилляторов и модуляторов в определенные моменты может синхронизироваться и создавать устойчивую ритмическую картину, а иногда преобразовываться в хаос [Ланда, 1997]. Авторы работы [Feynman and Gabriel, 1990] придерживаются той точки зрения, что солнечное динамо, которое генерирует вариации СА, функционирует в режиме хаоса. В исследовании [Usoskin et al., 2007] предполагается, что солнечное динамо функционирует в режиме квазипериодичности на всей протяженности реконструкций СА, кроме периодов гранд-минимумов/максимумов, где квазипериодический режим переходит в состояние хаоса. В противоположность этим выводам, наши результаты о том, что на тысячелетней шкале в рядах SN даже в периоды гранд-минимумов/максимумов наблюдаются стабильные 30- и 40-летние вариации, периоды которых претерпевают изменения по законам частотной модуляции, свидетельствуют о гораздо большей регулярности в вариациях СА и, тем самым, в функционировании солнечного динамо. Результаты данной статьи с учетом вышеупомянутых выводов работ [Птицына и Демина, 2022; 2023] позволяют говорить о том, что солнечное динамо в основном функционирует в режиме квазипериодичности. Этот вывод согласуется с мнением авторов работы [Peristykh and Damon, 2003], которые полагают, что найденное ими наличие стабильного 88-летнего цикла на временном интервале ~ 11000 лет, не поддерживает идею квазихаотического поведения солнечных процессов на шкалах длиннее, чем 11 лет.

Несмотря на то, что в обоих рядах SN_1 и SN_2 наблюдается похожая стабильная вариация с видимым преобладанием двух ветвей с периодами $T_1 = \sim 30$ и $T_2 = \sim 40$ лет, сами ветви, построенные для рядов SN_1 и SN_2 , и прогнозируемые как результат частотной модуляции различаются между собой. Коэффициенты корреляции между прогнозируемыми изменениями периодов SN_1 и SN_2 для 40-летней ветви составил $k=0.7$, а для 30-летней $k=0.4$. Мы полагаем, что эта разница в спектрах обусловлена различием в способах восстановления данных SN_1 и SN_2 . Эти реконструкции SN основаны на полученных наземных данных (число полярных сияний для SN_1 и концентрация ^{14}C в кольцах деревьев для SN_2), отражающих изменения геомагнитной и гелиосферной активности, которые, в свою очередь, связаны с изменениями СА и, соответственно, с солнечными магнитными полями.

Традиционно считается, что геомагнитные возмущения имеют два разных источника в межпланетном пространстве и на Солнце [Simon and Legrand, 1989; Gonzalez et al., 1994; Tsurutani et al., 2006; Vasquez et al., 2014]: а) транзиентные корональные выбросы массы *CME* в основном из областей с закрытыми силовыми линиями, такими как активные области и пятна; *CME* инициируют магнитные бури с внезапным началом и б) рекуррентные высокоскоростные потоки *CIR* из корональных дыр, которые характеризуются открытыми магнитными полями; *CIR* инициируют магнитные бури с постепенным началом [Borovsky and Denton, 2006; Обридко и др., 2013; Gopalswamy, 2022]. На самом деле топология магнитных полей в *CME* может быть более сложной. Обнаруживались *CME* с открытыми силовыми линиями, и даже такие *CME*, где присутствовали как закрытые, так и открытые поля [Bothmer et al., 1996; Davies et al., 2023].

Корональные выбросы массы, *CME*, как правило, связаны со вспышечной активностью, поэтому максимальное число таких транзиентных событий приходится на максимумы солнечного цикла [Webb et al., 2001]. Коротирующие потоки солнечного ветра *CIR* из корональных дыр доминируют на нисходящей ветви и в минимумах солнечной активности [Вальчук и др., 1978; Simon and Legrand, 1989].

В том случае, если косвенными данными о СА выступают исторические полярные сияния, это должны быть события, которые имеют значительную видимую яркость и распространяются на средние и низкие широты. Это является необходимым условием того, что такие события в отдаленные эпохи могли быть замечены достаточно большим количеством людей и зафиксированы в исторических хрониках. Именно такие, очень интенсивные полярные сияния, видимые на средних и низких широтах, вызываются очень интенсивными магнитными бурями с внезапным началом, супербурями, источником которых являются *CME* [Borovsky and Denton, 2006]. В работах [Meng et al., 2019; Cliver et al., 2022] найдено, что солнечные источники очень интенсивных бурь (буревой индекс $Dst < 200$ нТл) – это исключительно *CME* из больших активных областей, расположенных близко к экватору Солнца. Таким образом, SN_1 отражает число именно таких активных областей и связано с локальными закрытыми магнитными полями.

Данные SN_2 основаны на реконструкции вариаций КЛ, полученных из архивов ^{14}C в кольцах деревьев. Приходящие от Солнца облака плазмы заполняют гелиосферу и служат магнитным экра-

ном для галактических КЛ, тем самым затрудняя их приход к Земле. Поэтому наблюдается их обратная корреляция с W/SN . Для КЛ также виден 11-летний цикл, но его максимумы несколько сдвинуты по сравнению с максимумами чисел Вольфа. Это обусловлено существенным влиянием на гелиосферу глобальных крупномасштабных полей, вариация которых смешена по фазе по отношению к циклу чисел Вольфа [Обридко и Наговицын, 2017]. В том случае, когда косвенные данные о СА основаны на учете связи потока КЛ с концентрацией ^{14}C в кольцах деревьев, то учитывается интегральное влияние на гелиосферу и магнитосферу изменений СА, которые определяются изменениями как локальных, так и глобальных солнечных магнитных полей. Магнитное поле Солнца демонстрирует единую организацию. Локальные закрытые и крупномасштабные открытые магнитные поля связаны между собой, и есть основания полагать, что на разных фазах цикла они могут переходить друг в друга [Обридко и Наговицын, 2017]. Поэтому в спектрах SN_1 и SN_2 выявляются как общие тенденции, так и некоторая разница, которая может быть вызвана большим или меньшим вкладом разных типов магнитных полей в ряды SN_1 и SN_2 в определенный момент времени.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен спектральный анализ рядов числа солнечных пятен в диапазоне периодов больше магнитного цикла Хейла (~ 22 года) и меньше цикла Глейсберга (50–120 лет) на масштабе последнего тысячелетия (1000–1900 гг.). Для исследования взяты реконструкции, полученные на основе числа низкоширотных полярных сияний SN_1 и концентрации ^{14}C в кольцах деревьев SN_2 . Найдено, что в спектрах SN_1 и SN_2 наблюдается две стабильные вариации с периодами ~ 30 и ~ 40 лет, причем такая цикличность присутствует даже во время гранд-минимумов Оорта, Вольфа, Шперера и Маундера, а также длительных максимумов. Источником этой вариации является частотная модуляция более длинноволновым процессом, а именно околодвухсотлетним циклом Зюсса ($T = 188 \pm 9$ лет для ряда SN_1 и 205 ± 53 года для ряда SN_2) основного колебания с периодом $T_0 = 35 \pm 1$ год. В результате формируется трехчастотная структура с основным периодом ~ 35 лет и боковыми ветвями с периодами ~ 30 и ~ 40 лет. При этом основная частота плохо выделяется на фоне боковых ветвей. Однако наш анализ показал, что, тем не менее, несущая частота существенным образом проявляется в спектре. Это дает возможность считать, что колебание

с периодом 35 лет может являться солнечным источником климатического цикла Брюкнера.

Наши результаты позволяют предположить, что в СА существует иерархия циклов, связанных модуляционными эффектами: более длинноволновые циклы влияют на генерацию коротковолновых. Такая иерархическая система осцилляторов и модуляторов может быть ответственна за создание устойчивой ритмической структуры в СА с основным периодом ~35 лет.

Выходы нашего исследования сделаны из рассмотрения спектров двух рядов совершенно независимых данных SN_1 и SN_2 , что увеличивает доверие к полученным результатам. Некоторая разница, которая наблюдается в изменениях 30- и 40-летних составляющих в спектрах рядов SN_1 и SN_2 в 1000–1900 гг. может быть обусловлена различием в способах восстановления данных этих рядов. Реконструкция SN_1 отражает вариации закрытых солнечных магнитных полей, а SN_2 – как закрытых, так и открытых. Магнитное поле Солнца функционирует как единая система, включающая все типы полей, поэтому результаты нашего анализа SN_1 и SN_2 демонстрируют одинаковые общие тенденции, а разница в полученных спектрах может быть связана с большим или меньшим вкладом разных типов магнитных полей в ряды SN_1 и SN_2 .

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Ленард, 528 с. 2016.
- *Вальчук Т.Е., Лившиц М.А., Фельдштейн Я.И.* Зондирование геомагнитным полем высокосиротного магнитного поля Солнца // Письма в Астрон. журн. Т. 4. № 11. С. 515–519. 1978.
- *Витинский Ю.А., Конецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 296 с. 1986.
- *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 608 с. 1977.
- *Ланда П.С.* Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, 495 с. 1997.
- *Наговицын Ю.А.* Солнечная активность двух последних тысячелетий: “Служба Солнца” в древнем и средневековом Китае // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 5. С. 711–720. 2001.
- *Наговицын Ю.А.* Изменения циклических характеристик магнитной активности Солнца на длительных временных шкалах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 6. С. 723–729. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014060133>
- *Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д.* Солнечная активность и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 2. С. 157–166. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013010148>
- *Обридко В.Н., Наговицын Ю.А.* Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. СПб.: ВВМ, 466 с. 2017.
- *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>
- *Птицына Н.Г., Демина И.М.* Реконструкция солнечной активности в 1000–1700 гг. по данным о полярных сияниях с учетом вклада главного магнитного поля земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 515–527. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020030153>
- *Птицына Н.Г., Демина И.М.* Частотная модуляция как причина возникновения дополнительных ветвей векового цикла Глейсберга в солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 1. С. 52–66. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022010163>
- *Птицына Н.Г., Демина И.М.* Влияние цикла Глейсберга на вариации периода 11-летнего цикла солнечной активности в 1700–2021 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 3. С. 284–297. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600508>
- *Птицына Н.Г., Демина И.М.* Солнечный цикл Швабе в 1000–1700 гг.: вариации длины и амплитуды // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 2. С. 217–229. 2024. <https://doi.org/10.31857/S0016794024020059>
- *Bertello L., Pevtsov A.A., Ulrich P.K.* 70 years of chromospheric solar activity and dynamics // *Astrophys. J.* V. 897. № 2. P. 181–195. 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9746>
- *Brehm N., Bayliss A., Christl M. et al.* Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings // *Nat. Geosci.* V. 14. P. 10–15. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00674-0>
- *Borovsky J.E., Denton M.H.* Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // *J. Geophys. Res.* V. 111. № 7. ID A07S08. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005ja011447>
- *Bothmer V., Desai M.I., Marsden R.G., Sanderson T.R., Trattner K.J., Wenzel K.-P., Gosling J.T., Balogh A., Forsyth R.J., Goldstein B.E.* ULYSSES observations of open and closed magnetic field lines within a coronal mass ejection // *Astron. Astrophys.* V. 316. № 2. P. 493–498. 1996.
- *Brückner E.* Klimaschwankungen seit 1700. Wien, Olmütz: Ed. Hölzel, 325 p. 1890.
- *Cliver E.W., Pötzl W., Veronig A.M.* Large sunspot groups and great magnetic storms: Magnetic suppression of

- CMEs // *Astrophys. J.* V. 938. № 2. ID 136. 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac847d>
- *Clilverd M.A., Clarke E., Ulich T., Rishbeth H., Martin J.* Predicting solar cycle 24 and beyond // *Space Weather.* V. 4. № 9. ID S09005. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005SW000207>
- *Connor F.R.* Modulation. London: Edward Arnold Ltd., 133 p. 1982.
- *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. Philadelphia, PA: Society for industrial and applied mathematics, 369 p. 1992. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970104>
- *Davies E.E., Scolini C., Winslow R.M., Jordan A.P., Möstl C.* The effect of magnetic field line topology on ICME-related GCR Modulation // *Astrophys. J.* V. 959. № 2. ID 133. 2023. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad046a>
- *Echer E., Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Vieira L.E.A.* Prediction of solar activity on the basis of spectral characteristics of sunspot number // *Ann. Geophys.* V. 22. № 6. P. 2239–2243. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-2239-2004>
- *Eddy J.A.* The historical record of solar activity / 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, Oxford: Pergamon Press. P. 119–134. 1980.
- *Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M.* What is a geomagnetic storms? // *J. Geophys. Res.* V. 99. № 4. P. 5771–5792. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- *Grossmann A., Morlet J.* Decomposition of Hardy functions of constant shape // *SIAM J. Math. Anal.* V. 15. № 4. P. 723–736. 1984. <https://doi.org/10.1137/0515056>
- *Gopalswamy N.* The sun and space weather // *Atmosphere.* V. 13. № 11. ID 1781. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13111781>
- *Feynman J., Gabriel S.B.* Period and phase of the 88-year solar cycle and the Maunder minimum: Evidence for a chaotic sun // *Sol. Phys.* V. 127. № 2. P. 393–403. 1990. <https://doi.org/10.1007/BF00152176>
- *Feynman J., Ruzmaikin A.* The Centennial Gleissberg Cycle and its association with extended minima // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 119. № 8. P. 6027–6041. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019478>
- *Kane R.P.* Prediction of the sunspot maximum of solar cycle 23 by extrapolation of spectral components // *Sol. Phys.* V. 189. № 1. P. 217–224. 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005298313886>
- *Keimatsu M., Fukushima N., Nagata T.* Archaeo-aurora and geomagnetic secular variation in historic time // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 20. № 1. P. 45–50. 1968. <https://doi.org/10.5636/jgg.20.45>
- *Kudsk S.G., Knudsen M.F., Karoff C., Baittinger C., Misios S., Olsen J.* Solar variability between 650 CE and 1900 – Novel insights from a global compilation of new and existing high-resolution ¹⁴C records // *Quaternary Sci.* Rev. V. 292. ID 107617. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107617>
- *Liritzis Y., Petropoulos B.* Latitude dependence of auroral frequency in relation to solar-terrestrial and interplanetary parameters // *Earth Moon Planets.* V. 39. № 1. P. 75–91. 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00054435>
- *McCracken K.G., Beer J., Steinhilber F., Abreu J.* A phenomenological study of the cosmic ray variations over the past 9400 years, and their implications regarding solar activity and the solar dynamo // *Sol. Phys.* V. 286. № 2. P. 609–627. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0265-0>
- *Meng X., Tsurutani B.T., Mannucci A.J.* The solar and interplanetary causes of superstorms (minimum $Dst \leq -250$ nT) during the space age // *J. Geophys. Res.* V. 124. № 6. P. 3926–3948. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026425>
- *Muscheler R., Joos F., Beer J., Müller S.A., Vonmoos M., Snowball I.* Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records // *Quaternary Sci. Rev.* 2006. V. 26. № 1–2. P. 82–97. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.07.012>
- *Peristykh A.N., Damon P.E.* Persistence of the Gleissberg 88 year cycle over the last ~12,000 years: Evidence from cosmogenic isotope // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 108. № 1. ID 1003. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009390>
- *Petrovay K.* Solar cycle prediction // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 17. ID 2. 2020. <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>
- *Raspopov O.M., Shumilov O.I., Kasatkina EA, Turunen E., Lindholm M.* 35-year climatic Bruckner cycle – solar control of climate variability? / Proc. 1st Solar and Space weather Euroconference “The solar cycle and terrestrial climate”. Santa Cruz de Tenerife, Spain. September 25–29, 2000. Ed. A. Wilson. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division. P. 517. 2000.
- *Schove D.J.* Aurora numbers since 500 B.C. // *Journal of the British Astronomical Association.* V.72. № 1. P. 31–35. 1962.
- *Silverman S.M.* Secular variation of the aurora for the past 500 years // *Rev. Geophys.* V. 30. № 4. P. 333–351. 1992. <https://doi.org/10.1029/92RG01571>
- *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. Geophys.* V. 7. № 6. P. 579–593. 1989.
- *Siscoe G.L.* Evidence in the auroral record for secular solar variability // *Rev. Geophys.* V. 18. № 3. P. 647–658. 1980. <https://doi.org/10.1029/RG018i003p00647>
- *Singh Y.P., Badruddin B.* Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis // *Planet. Space Sci.* V. 96. P. 120–124. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.03.019>
- *Svalgaard L.* Up to nine *millennia* of multimessenger solar activity // arXiv Preprint: 1810.11952. 2018. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1810/1810.11952.pdf>

- *Travers R., Usoskin I.G., Solanki S.K., Becagli S., Frezzetti M., Severi M., Stenni B., Udisti R.* Nitrate in polar ice: a new tracer of solar variability // *Sol. Phys.* V. 280. № 1. P. 237–254. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0060-3>
- *Tsurutani B., Gonzalez W., Gonzalez A.L.C. et al.* Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: a review // *J. Geophys. Res.* V. 111. № 7. ID A07S01. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- *Usoskin I.G.* A history of solar activity over millennia // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 14. ID 3. 2017. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- *Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A.* Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints // *Astron. Astrophys.* V. 471. № 1. P. 301–309. 2007. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704>
- *Usoskin I.G., Solanki S.K., Krivova N., Hofer B., Kovaltsov G.A., Wacker L., Brehm N., Kromer B.* Solar cycle activity over the last millennium reconstructed from annual ^{14}C data // *Astron. Astrophys.* V. 649. ID A141. 2021. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140711>
- *Vazquez M., Vaquero J.M., Gallego M.C.* Long-term spatial and temporal variations of aurora borealis events in the period 1700–1905 // *Sol. Phys.* V. 289. № 5. P. 1843–1861. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0413-6>
- *Veretenenko S., Ogurtsov M., Obridko V.* Long-term variability in occurrence frequencies of magnetic storms with sudden and gradual commencements // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phy.* V. 205. ID 105295. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105295>
- *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*. Eds. P. Song, H.J. Singer, G. Siscoe / *Geophysical Monograph Series*. V. 125. Washington, DC: AGU. P. 123–141. 2001. <https://doi.org/10.1029/GM125p0123>

35-Year Cycle in Solar Activity in 1000–1900

N. G. Ptitsyna^{1,*}, I. M. Demina¹

¹*St. Petersburg Branch, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (SPbF IZMIRAN), St. Petersburg, Russia*

*e-mail: nataliaptitsyna@yahoo.com

We performed a Fourier and wavelet analysis of solar activity in the range between the period of the Hoyle magnetic cycle (~22 years) and the Gleisberg cycle (50–120 years) in 1000–1900. Two reconstructions of the number of sunspots from indirect data were used based on: a) the number of low-latitude auroras and b) the concentration of ^{14}C in tree rings. Our analysis showed that in the spectra of both reconstructions, there is a pronounced stable variation with a period of ~30–40 years, which is present even during grand minima/maxima. The source of this variation is the frequency modulation by the Suess cycle with a period of ~200 years, resulting in a three-frequency structure with carrier oscillation with a period of ~35 years and sideband periods of ~30 and ~40 years. Some difference in the obtained spectra of the two reconstructions may be due to the different contribution of closed and open magnetic fields in the restoration of solar activity from different indirect data.

Keywords: solar activity reconstruction, variations with a period of 30–40 years, wavelet analysis, frequency modulation