

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЛАВНАЯ (ПУЛКОВСКАЯ) АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Кулешова Алена Игоревна

**НЕКОТОРЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛАХ: ВСПЫШЕЧНЫЕ СОБЫТИЯ,
11-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ, ГРАНДИОЗНЫЕ МИНИМУМЫ**

01.03.03 - Физика Солнца

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Юрий Анатольевич Наговицын

Санкт-Петербург

2018

Содержание

Введение	5
1 Введение	5
1.1 Актуальность темы диссертации	5
1.2 Основные понятия	6
1.2.1 Солнечная активность	6
1.2.2 Методы исследования и прогнозирования 11-летних циклов активности	12
1.2.3 Долговременные вариации солнечной активности	15
1.2.4 Цели и задачи диссертационной работы	16
2 Закономерности явлений экстремального энерговыделения в 11-летнем цикле	16
2.1 Введение	16
2.1.1 Основные индексы вспышечной активности	16
2.2 Рекуррентность вспышечных событий в активных областях	18
2.2.1 Цели и задачи главы	18
2.2.2 Данные	21
2.2.3 Параметризация времени РВЭ	22
2.2.4 Статистическое распределение параметров РВС	23
2.2.5 Типичные времена РВЭ на разных фазах 11-летнего цикла	25
2.2.6 Связь между временем РВЭ и параметрами АО	29
2.3 Выводы	31
3 Модифицированное правило Вальдмайера и закономерности величин максимумов 11-летних циклов	32
3.1 Введение	32

3.1.1	Закономерности поведения 11-летних солнечных циклов	32
3.1.2	23-й цикл солнечной активности и его особенности	33
3.1.3	Правило Вальдмайера	34
3.1.4	Ряды данных пятенной активности Солнца	35
3.1.5	Прогнозы поведения 24-го цикла солнечной активности	39
3.2	Модифицированное правило Вальдмайера	39
3.2.1	Цели и задачи раздела	39
3.2.2	Изменение скорости развития цикла, общая закономерность (на основе ряда чисел Вольфа)	40
3.2.3	Модифицированное правило Вальдмайера	41
3.2.4	Диагностика 24 солнечного цикла с использованием модифицированного правила Вальдмайера	46
3.3	Выводы	50
4	Радиоуглерод и глобальные минимумы солнечной активности	51
4.1	Введение	51
4.1.1	Глобальные минимумы СА	51
4.1.2	Связь СА и содержания ^{14}C в атмосфере Земли	53
4.1.3	Радиоуглеродный метод	55
4.1.4	Пятирезервуарная модель	57
4.2	Влияние климатических факторов на реконструкцию скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C и солнечная активность в прошлые эпохи	59
4.2.1	Цели и задачи работы	59
4.2.2	Расчет скорости генерации ^{14}C в атмосфере Земли	60
4.2.3	Реконструкция гелиосферного модуляционного потенциала и чисел Вольфа	67
4.3	Выводы	71

5	Заключение	73
5.1	Личный вклад автора	73
5.2	Научная новизна	73
5.3	Апробация	74
5.4	Основные публикации по теме диссертации	75
	Список литературы	78

1 Введение

1.1 Актуальность темы диссертации

Солнечная активность – это комплекс явлений, связанных с изменениями магнитного поля Солнца на различных пространственных и временных масштабах. Пространственно можно выделить две компоненты глобального солнечного магнитного поля: крупномасштабную, связанную с т.н. «открытыми» конфигурациями поля (корональными дырами), и низкоширотную, связанную с магнитным полем солнечных пятен и активных областей. В активных областях происходят, в частности, вспышки – события экстремального выделения энергии (10²⁸-10³² эрг) в виде потоков высокоэнергичных частиц, достижение которых окрестностей Земли может вызвать разнообразные геофизические явления, в том числе опасные для техносферы. Это направление изучения солнечно-земных связей – на сравнительно коротких временных шкалах – получило название «Космическая погода».

Если же говорить о временном аспекте солнечной активности в целом, то следует заметить, что наряду с 11-летним циклом, существуют продолжительные (сотни лет) циклы его амплитудной модуляции, так что на длительных временах мы имеем экстремальные проявления солнечной активности: глобальные («грандиозные») максимумы и минимумы. Имеются данные, что такие грандиозные экстремумы могут вызывать серьезные климатические изменения на Земле [70]. Это направление исследования солнечно-земных связей получило название «Космический климат».

Тема диссертации имеет отношение к обоим обозначенным направлениям: экстремальные проявления солнечной активности будут рассматриваться как в плане закономерностей проявления – экстремальных – вспышечных процессов в активных областях, так и в плане закономерностей характеристик грандиозных

максимумов и минимумов.

1.2 Основные понятия

1.2.1 Солнечная активность

Вещество Солнца всегда находится в движении, его неоднородная атмосфера испытывает различные изменения температуры, давления, плотности и напряженности магнитного поля. Эти явления, происходящие в разных областях атмосферы, тем не менее, неразрывно связаны.

Солнечной активностью обычно называют целый комплекс явлений динамики магнитного поля, протекающих в солнечной атмосфере, которые охватывают области, поперечником десятки тысяч километров. Явления солнечной активности характеризуются значительными изменениями физических характеристик соответствующих слоев солнечной атмосферы со временем. Часть солнечной атмосферы, где на сравнительно низких широтах ($\pm 0 - 40^\circ$) происходят подобные изменения, вызванные магнитным полем, называют активной областью (АО).

Условно на Солнце выделяют два класса солнечных явлений – «спокойные» и «активные». Модель спокойного Солнца – статический сферически-симметричный шар из горячего газа, в котором свойства вещества зависят от радиуса. На каждом слое поток энергии, движущийся наружу, проявляет себя по-разному, обеспечивая своеобразие физических характеристик. Явления «спокойного» Солнца отличаются не только масштабами явлений, но и хаотичностью, в то время как явления «активного» Солнца обладают упорядоченностью; причина тому – магнитное поле Солнца, усиление и изменение которого всегда сопровождается возникновением активных образований.

Проявления солнечной активности очень разнообразны, хотя бы потому, что происходят в разных слоях атмосферы Солнца, обладающих разными

физическими условиями.

Самым очевидным проявлением солнечной активности являются солнечные пятна, как правило, возникающие целыми группами. Они представляют собой относительно холодные места фотосферы Солнца (с напряженностью магнитного поля несколько тысяч гаусс), поэтому визуально определяются как темные области на диске. Отдельные пятна группы появляются на западном и восточном краях области, где сильнее других развиваются два пятна. Их магнитные поля всегда обладают противоположной полярностью, поэтому такую группу пятен называют биполярной. Пятно обычно состоит из тени (центральная темная часть пятна) и полутени (менее темная часть пятна, окружающая тень). Понижение температуры в пятне - результат влияния магнитного поля. Самые ранние записи о наблюдениях солнечных пятен зарегистрированы в Китае более 2000 лет назад [25, 102]. Отдельные регистрации солнечных пятен начались в XVII веке, а с середины XIX столетия эти наблюдения ведутся ежедневно (при наличии хорошей погоды). Большие пятна состоят из центральной темной тени, окруженной более яркой полутенью. Эффективная температура тени пятна в среднем составляет 4600° (для сравнения, эффективная температура фотосферы 5790°). Наиболее важная наблюдаемая характеристика солнечных пятен - сильные магнитные поля, которые наблюдаются по Зеемановскому расщеплению спектральных линий. С момента появления солнечного пятна магнитное поле начинает быстро расти, достигая максимума почти в то же время, когда площадь пятна становится максимальной. Затем площадь постепенно уменьшается, пятно разрушается. Группы пятен классифицируются по полярности их магнитных полей [3]. Если все пятна группы имеют одинаковую полярность, группа называется униполярной, но наиболее распространенной является биполярная конфигурация групп пятен, в случае которой группа состоит из пятен различной полярности. Пятна на

западном краю группы называются головными (или ведущими), а на восточном краю - хвостовыми. Головные пятна биполярных групп почти всегда имеют одинаковую полярность, в то время как пятна на южном полушарии имеют противоположную полярность. Эти полярности сохраняются на протяжении 11 лет, то есть в течение солнечного цикла. В следующем цикле полярности головных и хвостовых пятен меняются на обратные.

Активная область – главный элемент солнечной активности, имеет свой жизненный цикл. Первым признаком появления новой активной области является появление магнитного поля одной полярности (или более сложной конфигурации), вскоре появляются факел и флоккул в виде уярчений. По мере того, как активная область становится ярче, появляются пятна, становится все более очевидной корональная активность, флоккулы и факелы становятся ярче и увеличивают свою площадь, напряженность магнитных полей растет. Спустя несколько дней может начаться вспышечная активность, а также активность протуберанцев. Все виды активности достигают более или менее одновременного максимума. Пятна начинают исчезать, протуберанцы становятся устойчивыми и вспышки встречаются все реже и реже. В течение нескольких недель яркость флоккула и факела снижается, хотя их площадь еще может возрастать. Обычно после исчезновения пятен вспышки больше не наблюдаются. Магнитное поле исчезает последним.

Факелы – яркие фотосферные образования, образующиеся вокруг пятен. Факелы возникают при небольших усилениях магнитных полей. Они могут существовать и без пятен, чаще всего предвещая их появление, а также в качестве остатков активной области. Факелы лучше всего видны на краю солнечного диска, в то время как в центре они практически не заметны. Продолжительность жизни солнечного факела составляет 3-4 месяца. Также как и количество пятен, количество факелов зависит от солнечной активности.

Самое мощное и быстро развивающееся проявление солнечной активности – солнечная вспышка. Они возникают чаще всего в небольшой области между развивающимися пятнами, особенно вблизи границы раздела полярности сильных магнитных полей. В начале вспышки яркость отдельного флоккула возрастает, и, менее, чем за минуту, сильное излучение распространяется вдоль длинного жгута или заливают целую область на солнечном диске. В видимой области спектра усиление свечения вспышки происходит, в основном, в линиях водорода и кальция, также наблюдаются коротковолновые рентгеновские спектральные линии и даже, в некоторых случаях, гамма-излучение. Помимо увеличения яркости во время вспышки наблюдаются мощные движения газов, а также выбросы облаков плазмы в виде отдельных конденсаций и «брызг». Весь процесс солнечной вспышки имеет характер взрыва, сопровождающегося выделением огромного количества энергии $\sim 10^{28} - 10^{32}$ эрг [6], половина из которой тратится на корональные выбросы массы и ударные волны, четверть – на движения хромосферного вещества, остальную энергию делят между собой солнечные космические лучи и излучение в рентгене, ультрафиолете и видимой области. Из всех активных явлений на Солнце вспышки выделяются своей способностью сильно воздействовать на геофизические явления. Это обстоятельство в значительной степени актуализирует изучение вспышек. В частности, мало изучены закономерности частоты появления вспышек в активной области, и это составит одну из задач этой работы – см. главу 2.

Все рассмотренные активные образования связаны между собой. Возникновение факелов предшествует появлению пятен, вспышки возникают во время быстрого роста групп пятен. Совокупность всех проявлений солнечной активности в данной области солнечной атмосферы иногда называют центром солнечной активности. Другие исследователи предпочитают простое название «активная область». Таким образом, солнечная активность включает в себя

широкий спектр явлений, поэтому цикличность солнечной активности может быть описана различными индексами [12, 85].

В первой половине XIX века немецкий астроном-любитель Г. Швабе, а затем — Р. Вольф [103] впервые установили факт изменения числа солнечных пятен со временем. Он расширил ряд данных еще на 100 лет, используя наблюдения Штаудахера с 1749 по 1787 годы, Фложерга с 1788 по 1825 год, и Швабе с 1826 по 1847. Тем не менее, большая часть этих ранних данных является недостоверной. Вольф часто заполнял пробелы в данных о солнечных пятнах данными о геомагнитной активности в качестве прокси. Изменения индексов солнечной активности происходят периодически, но о строгой периодичности говорить не приходится. Эпоха цикла, в которую на Солнце имеется минимальное число пятен, называется эпохой минимума, эпоха с максимальным числом пятен, - эпоха максимума. Возрастание солнечной активности относится к ветви роста, а её убывание - к ветви спада цикла. Условно такой цикл называли 11-летним циклом Швабе-Вольфа, но на самом деле его длина за XVIII—XX века менялась от 7 до 17 лет, а в XX веке в среднем была ближе к 10,5 годам. Этот цикл проявляется не только в изменении числа солнечных пятен, но и во многих других параметрах СА [72]. Кроме прочего, Вольф определил годы максимальных и минимальных чисел солнечных пятен начиная с 1610 года, то есть со времени наблюдений Галилея, тем самым упрочив работу Швабе, располагавшего наблюдениями только за 17 лет. Так появился закон Швабе-Вольфа, согласно которому изменения солнечной активности происходят периодически, длина среднего периода составляет 11,1 года. Необходимо отметить, что продолжительность 11-летнего цикла СА лучше всего определяется по эпохам минимума, но возникают затруднения, связанные с тем, что следующий цикл, как правило, начинается раньше, чем заканчивается предыдущий. Группы пятен нового и старого цикла СА можно различить по полярности их

магнитного поля [5]. Регулярные наблюдения магнитных полей американским астрономом Джорджем Эллери Хейлом, привели к окончательному признанию существования 22-летнего цикла солнечной активности, существование которого предсказывал еще Вольф. В 1913 году Хейл впервые показал, что полярность магнитных полей ведущих (хвостовых) пятен северного (южного) полушария изменяется на противоположную при переходе от одного 11-летнего цикла к другому, то есть они как бы меняются местами в отношении магнитных свойств. Таким образом, магнитные поля групп солнечных пятен получают первоначальную полярность не через 11 лет, а через 22 года. Если исходить из Цюрихской нумерации 11-летних циклов, то оказывается, что в нечетных циклах полярность магнитного поля ведущих пятен (северное полушарие) положительная, а в четных циклах – отрицательная. В южном полушарии картина противоположная. Своё исчисление циклы начинают с 1755 г., так как регулярные данные о среднемесячных числах пятен цюрихского ряда имеются с 1749 г. Но поскольку ряд был расширен, был выведен еще один незавершенный цикл, получивший нулевой номер. Самым высоким циклом является 19 цикл, максимальное среднеквартальное число Вольфа в котором $W_M = 235$.

Целый ряд закономерностей, таких как 11-летние колебания числа солнечных пятен, появление солнечных пятен только в двух широтных полюсах, дрейф к экватору, смена знака полярных полей вблизи максимума солнечных пятен позволяет предположить, что все эти явления определяются каким-то механизмом динамо, действующего в ненаблюдаемых слоях конвективной зоны.

Магнитное поле Солнца состоит из двух составляющих – более сильного тороидального поля, вытянутого вдоль параллелей и расположенного ближе к экватору, а также полоидального поля, вытянутого вдоль меридианов. Теория динамо объясняет магнитную активность Солнца действием двух основных эффектов: генерацией тороидального поля из полоидального дифференциальным

вращением (омега-эффект) [69] и обратным преобразованием тороидального поля в полоидальное либо мелкомасштабными циклоническими движениями, либо меридиональной циркуляцией (альфа-эффект).

1.2.2 Методы исследования и прогнозирования 11-летних циклов активности

Поскольку, как уже отмечалось, солнечная активность воздействует через высокоэнергичные процессы (вспышки, корональные выбросы масс) на земные явления, техносферу, важным является прогноз ее будущего уровня.

Один из простых и часто используемых методов для прогнозирования солнечной активности был впервые описан в работе [62]. По ходу цикла, сглаженные ежемесячные числа солнечных пятен сравниваются со средним индексом того же цикла в тот же месяц с момента предыдущего минимума. Разница между этими двумя величинами используется для прогнозирования будущей разницы между предсказанным и средним значением цикла. Однако этот метод не учитывает систематических изменений формы цикла, а также ее связь с амплитудой цикла (т.е. эффект Вальдмайера, речь о котором пойдет ниже). Еще одной проблемой данного метода является его чувствительность к выбору даты минимума цикла. Также, данный метод работает в процессе хода цикла, когда активность нарастает. Средняя амплитуда последних нескольких циклов дает точку отсчета для другого, более очевидного метода прогнозирования. Коэффициент корреляции для данного метода низкий, однако, если другие методы не могут предсказать значения со значительно большей точностью, они имеют мало пользы. То есть этот простейший метод можно считать неким пороговым значением точности прогнозов. Другой класс методов прогнозирования использует характеристики предыдущего цикла в качестве оценки размера следующего цикла. В своей работе Вилсон и Хэтауэй [101]

обнаружили, что длина (период) предыдущего цикла обратно пропорциональна амплитуде следующего цикла. Другим показателем амплитуды следующего цикла является уровень активности в районе минимума цикла - амплитуда следующего цикла коррелирует со сглаженными значениями числа солнечных пятен в предыдущем минимуме [23]. Практическое применение этих методов является довольно ограниченным: предсказание будет доступно только за 2 - 3 года до максимума, и даже коэффициент корреляции будет довольно низким.

В отличие от прекурсионных методов, экстраполяция использует только временные ряды чисел солнечных пятен или любого другого индекса активности, но они обычно строятся на множестве точек для определения поведения цикла в будущем. Эти методы также известны как анализ временных рядов или регрессионные методы. Краеугольным камнем анализа временных рядов является предположение о том, что временной ряд является однородным, то есть математические закономерности одинаковы в любой момент времени [94, 7].

Это означает, что прогноз, скажем, на три года вперед имеет равные шансы на успех как в растущей, так и в затухающей фазах цикла солнечной активности, в зависимости от того, будут они строиться по максимуму по минимуму. То есть существует некая концепция, что вариации солнечной активности в виде непрерывного процесса показывают более точные прогнозы (по коэффициентам корреляции), нежели устаревшее представление, согласно которому солнечные циклы рассматриваются как отдельные единицы, длящиеся от минимума до минимума. Ряд солнечных пятен является уникальным однородным и длинным набором данных, собранных на протяжении веков. Линейные методы регрессии широко используются для прогнозирования солнечной активности в течение продолжающегося цикла.

Спектральный анализ ряда чисел солнечных пятен используется для

прогнозирования солнечной активности в предположении, что основной причиной изменения поведения солнечного цикла является наложение нескольких периодов (циклов) солнечной активности друг на друга. С технической точки зрения, спектральные методы являются сложной формой линейной регрессии. Анализ может быть проведен с помощью любого из широко используемых средств гармонического анализа:

- метод наименьших квадратов (частотный анализ) заключается в нахождении синусоиды, наиболее подходящей к данным временного ряда с использованием метода наименьших квадратов, повторяя процедуру подгонки несколько раз, пока остатки не станут неотличимы от белого шума. Например, [58].
- Фурье преобразование. Это наиболее часто используемый метод спектрального разложения. Он применялся для рядов чисел солнечных пятен с начала 20-го века.
- Метод максимальной энтропии, который опирается на теорему Винера-Хинчина о том, что спектр мощности является Фурье преобразованием для автокорреляционной функции. Расчет автокорреляции временных рядов и экстраполяция его дальше во времени таким образом, чтобы обеспечить максимальную энтропию, может дать спектр, который простирается до сколь угодно низких частот. Впервые данный метод был использован для прогнозирования [29]. Используя метод максимальной энтропии в сочетании с множественной регрессией для оценки амплитуды и фазы, [45] пришли прогнозу максимальной амплитуды 24 цикла активности примерно от 80 до 101.

В 2012 году на основе предложенного модифицированного правила Вальдмайера мы также составили прогноз 24 цикла [11] – об этом пойдет речь в главе

3.

1.2.3 Долговременные вариации солнечной активности

Если сгладить график солнечных пятен больше обычного (например, за пять циклов), как и сделал Гляйсберг в своей работе [39], можно увидеть, что существует некоторая вековая вариация, названная вековым циклом солнечной активности (цикл Гляйсберга), которая имеет длину около 80-90 лет. Последний максимум цикла Гляйсберга наблюдался в середине XX века (вблизи 19-го 11-летнего цикла), последующий должен прийти примерно на середину XXI века. Одна долгосрочная тенденция на увеличение солнечной активности в последние шесть или семь циклов известна как «Современный максимум». Циклы 5, 6, и 7 необычайно слабые, образуют так называемый минимум Дальтона [42]. Довольно длинный ряд умеренно слабых циклов с 12 по 16 иногда называют минимумом Гляйсберга (иногда – Гневышева) - но тут нужно учесть, что большинство из этих циклов меньше 1σ ниже долгосрочного среднего значения. Отсутствие солнечных пятен в период с 1645 по 1715 называют минимумом Маундера, на фоне остальных минимумов он выглядит более глубоким.

Наблюдается также двухсотлетний цикл (цикл Зюсса или цикл де Врие), в качестве минимумов которого можно рассматривать происходящие примерно раз в 200 лет устойчивые снижения солнечной активности, длящиеся многие десятки лет (так называемые глобальные или грандиозные минимумы солнечной активности) [78]:

- минимум Маундера (1645—1715);
- минимум Шперера (1450—1540);
- минимум Вольфа (1280—1340) и другие.

Рассмотрению закономерностей грандиозных минимумов (в частности, их

относительной глубины) посвящена глава 4 нашей работы.

1.2.4 Цели и задачи диссертационной работы

В целом, диссертационная работа посвящена изучению закономерностей некоторых экстремальных явлений солнечной активности как в аспекте проблемы «Космическая погода», так и в аспекте проблемы «Космический климат». А именно, будут рассмотрены следующие задачи:

- Выявление закономерностей рекуррентности (повторяемости) экстремального в смысле энергетики и в смысле геоэффективности явления солнечной активности – солнечных вспышек.
- Рассмотрение диагностических свойств правила Вальдмайера, его модификация, прогноз цикла активности, оценка верхнего предела амплитуды 11-летних циклов во время грандиозных максимумов солнечной активности.
- Рассмотрение относительной глубины исторических грандиозных минимумов солнечной активности.

2 Закономерности явлений экстремального энерговыделения в 11-летнем цикле

2.1 Введение

2.1.1 Основные индексы вспышечной активности

Одним из первых индексов солнечной активности было полное число солнечных вспышек. Для определения этого индекса требуются круглосуточные наблюдения, которые стали возможны только в 1957 г. Вспышечный индекс I_A определяется следующим образом [13]:

$$I_A = n_1 + 2.5n_2 + 5n_3 + 10n_{3+}^* \quad (2.1)$$

где n_i – число вспышек балла i . Этот индекс является ежедневным, из его значений могут быть получены среднемесячные и среднегодовые величины. Данный индекс имеет смысл использовать только при максимальном охвате суток наблюдениями вспышек. Индекс I_A является комплексной характеристикой не только частоты, но и мощности (балла) вспышек. Этот индекс не особенно чувствителен к положению вспышки на солнечном диске.

Индекс солнечных вспышек, характеризующий их суммарную интенсивность, высчитывается как:

$$Q = \sum it \quad (2.2)$$

где i – яркость вспышки (в баллах), t – время ее существования (в минутах); суммирование производится либо для активной области, либо для всего солнечного диска.

Сумма интегральных интенсивностей вспышек определяется как:

$$I(i) = \frac{BA_h D(1+p)}{2000} \quad (2.3)$$

где B – яркость в H_α по отношению к яркости близлежащей области солнечного диска, A_h – видимая площадь, D – продолжительность существования вспышки (в минутах), p – доля площади вспышки, оцененная в максимуме ее яркости.

Если же говорить о классификации, самой часто используемой классификацией на сегодняшний день является классификация вспышек GOES, согласно которой солнечной вспышке присваивается балл – обозначение из латинской буквы (A, B, C, M или X) и индекса за ней в зависимости от величины достигнутого вспышкой пика интенсивности рентгеновского излучения: A – меньше 10^{-7} Вт/м², B – от $1,0 \times 10^{-7}$ до 10^{-6} Вт/м², C – от $1,0 \times 10^{-6}$ до 10^{-5} Вт/м², M – от $1,0 \times 10^{-5}$ до 10^{-4} Вт/м², X – больше 10^{-4} Вт/м².

2.2 Рекуррентность вспышечных событий в активных областях

2.2.1 Цели и задачи главы

На связь колебательных процессов в солнечной атмосфере со вспышками указывают многие наблюдательные факты: [15, 17, 71]. Существует большое количество работ, в которых исследовалась статистика времен повторяемости (времен ожидания) солнечных вспышек и были произведены попытки описания этой статистики тем или иным законом. Подробнее о статистике времен рекуррентности экстремальных событий см.[10]. В частности, в работе Ашвандена [19] рассчитывалось распределение времен ожидания рентгеновских вспышек. В работе использовалось (нестационарное) распределение Пуассона. Однако, автор использовал не время рекуррентности (повторяемости) в избранной АО, а время рекуррентности между данной и ближайшей по времени вспышкой вне зависимости от принадлежности к избранной АО. Этот параметр назовем TRT. Также в работе [20] рассмотрена статистика времен покоя между последовательными всплесками активности солнечных вспышек, выполненная с использованием данных за 20 лет. Параметр повторяемости показывает степенной закон распределения с показателем $\alpha \approx 2.4$. Это свидетельствует о лежащей в основе сложной динамике с длинными временами корреляции. Наблюдаемое поведение скейлинга находится в противоречии с моделями самоорганизованной критичности солнечных вспышек, которые предсказывают статистику, подобную Пуассону.

Модель поверхностной МГД-турбулентности достаточно успешно воспроизводит наблюдаемые распределения. Для расчетов применялись два параметра - и TRT, и TRI.

В работе [100] также изучалась статистика времен рекуррентности TRT между вспышками вне зависимости от принадлежности к избранной АО. Рассматривались вспышки из каталога GOES класса $>C1$. В данной работе

рассмотрен промежуток времени с 1975 по 2001, где рассматривается параметр, названный «временем ожидания вспышки», а также выносятся предположение о том, что вспышечный процесс следует сравнить с Пуассоновским процессом, зависящим от времени. При этом индекс степенного распределения времен ожидания изменяется с циклом. Степенные индексы распределения времен ожидания в максимуме и минимуме цикла различаются, что соответствует наблюдениям. Эти результаты указывают на то, что скорость вспышки в течение цикла изменяется по-разному.

Следует также отметить работу 2017 года [21], где рассматривалось распределение времен ожидания вспышек. Функции скейлинга хорошо описываются двухпараметрическими функциями, параметры которых зависят от фазы солнечного цикла. Использовалась формула

$$P(t_d) \sim (1 + t_d/t_d^*)^{-\gamma_{aur}} \quad (\text{Парето})$$

а также

$$F_I^{min}(\lambda) \sim \lambda^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\lambda x^*}{R(I)}\right)$$

Исследовался параметр TRI (см. формулу 2.5).

В работе [40] были рассмотрены временные интервалы между вспышечными событиями за 1979-1981 гг, по материалам бюллетеня Solar Geophysical Data. Было показано, что появление вспышек в АО имеет рекуррентный (повторяющийся) характер, был вычислен спектр типичных периодов: 60m, 120m, 180m, 600m, 1200m, 2d, 5d. В этой работе исследовалась частота появления вспышек в избранных активных областях Солнца при помощи корреляционного периодограммного анализа, функции автоподобия и вейвлет-анализа. К сожалению, временной охват наблюдательного материала [40] был невелик, и требуются дальнейшие исследования. Бюллетень Solar Geophysical Data выпускался ежемесячно с 1955 по 2009 год, включал в себя основные данные о солнечных

событиях, данные о солнечных вспышках были зарегистрированы с наземных обсерваторий. В ряде работ [81, 76] было показано, что средние магнитные поля крупных пятен изменяются от минимума к максимуму на $\sim 20\%$ в сторону увеличения (рис. 2.1). Таким образом, характеристики магнитного поля АО изменяются с циклом, а вспышечные процессы связаны со структурой магнитного поля.

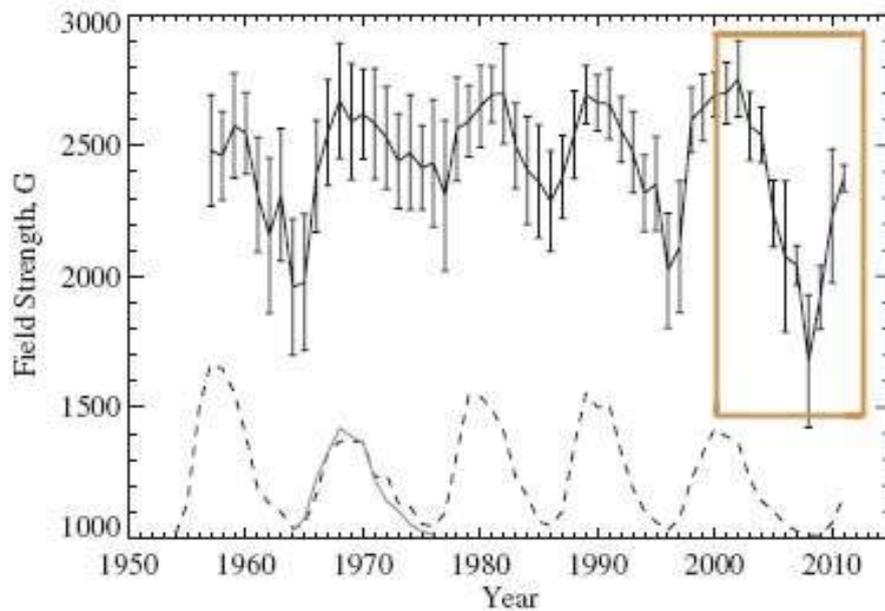


Рис. 2.1: Среднегодовые значения напряженности поля (сверху), ход циклов солнечной активности (снизу). Прямоугольником подчеркнута изменение средних магнитных полей крупных пятен. Рисунок взят из работы [81].

В связи с этим нами было решено рассчитать времена рекуррентности вспышечного энерговыделения (РВЭ) на отрезке времени в несколько солнечных циклов, и посмотреть, как этот параметр ведет себя на протяжении целого цикла. Для уменьшения влияния эффектов, связанных с вращением Земли, было решено использовать данные, полученные со спутников GOES, а также, накопив достаточное количество материала, найти статистическое распределение РВЭ, изучить зависимость этого параметра от других характеристик АО и сравнить типичные времена РВЭ с периодами так называемых

долгопериодических колебаний пятен [37, 76], так как эти параметры могут быть схожи.

2.2.2 Данные

Для выбранных целей использовалась база данных GOES (геостационарные спутники для изучения окружающей среды). GOES - серия спутников, находящихся в ведении американской национальной информационной службы спутниковых данных об окружающей среде (NESDIS), обеспечивающих прогнозирование погоды, отслеживание штормов и метеорологические исследования. Программа GOES состоит из серии геостационарных спутников (на орбите Земли на высоте 35,790 км), которые перекрывают друг друга во времени, что гарантирует непрерывный временной ряд регистрации потоков мягкого рентгена, помимо непрерывных метеорологических наблюдений Земли. GOES-1 спутник был запущен 16 октября 1974 года, GOES-2 и GOES-3 - в 1977 и 1978, соответственно. Серия запусков продолжалась до GOES-15, который был запущен 4 марта 2010 года. Эксплуатационные и технические детали спутников GOES описаны в ряде работ [41, 34, 44, 98].

Были использованы данные за период с 1996 по 2017 гг, из каталога SWPC NOAA <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-event-reports>.

В качестве основного параметра для расчета времен рекуррентности использовался промежуток между временами максимума вспышек. Был рассмотрен временной интервал, соответствующий 23 и 24 циклам (с августа 1996 по февраль 2017 гг.). Всего в рассмотрении присутствовало около 10000 вспышек из 330 АО. В работе рассматриваются только рентгеновские вспышки. На рис. 2.2 показано количество вспышек различных за рассматриваемый период с разбиением на фазы цикла.

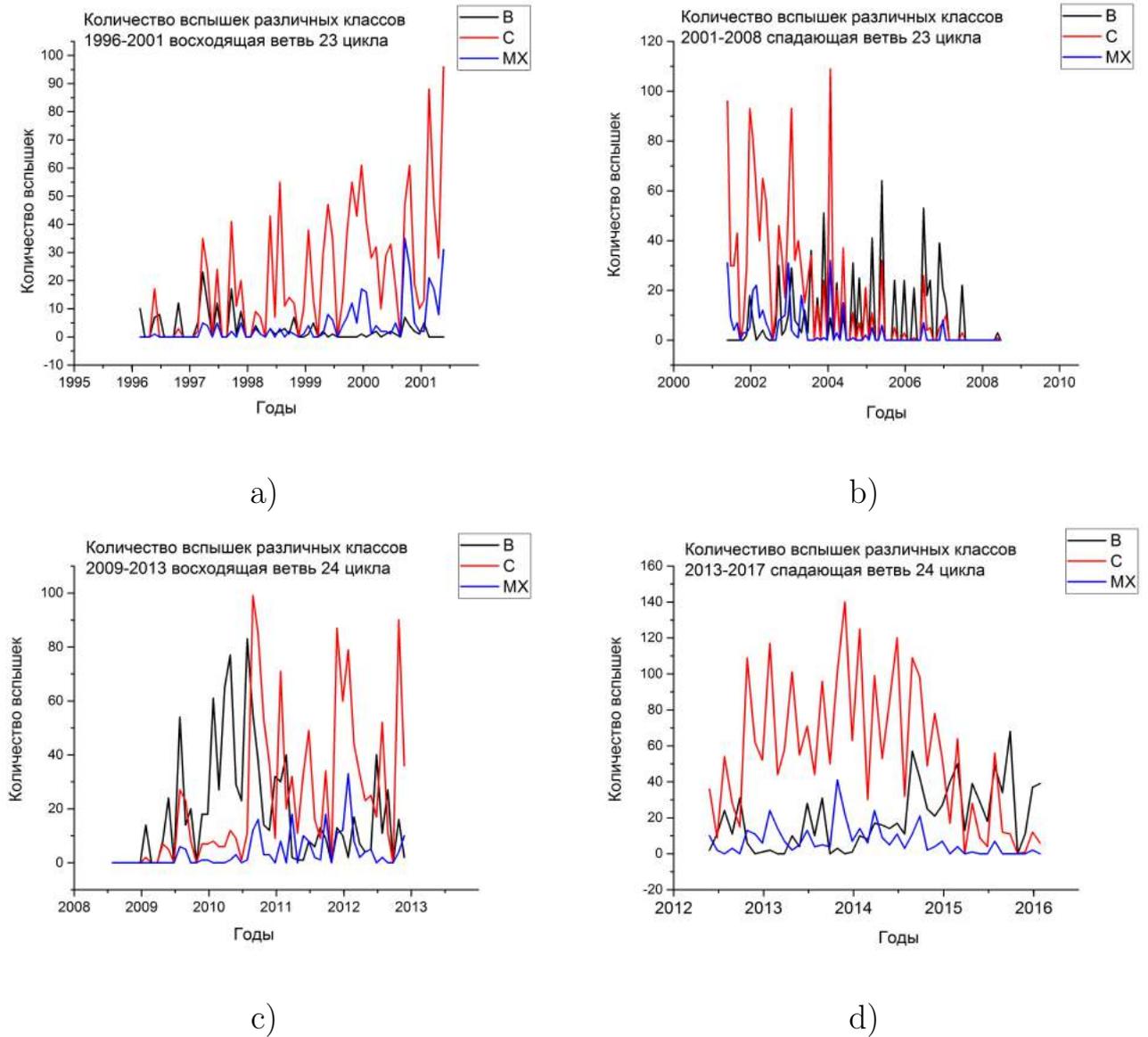


Рис. 2.2: Количество вспышек, разделенных по классам GOES в рассматриваемый промежуток времени с 1996 по 2017 гг., с разбиением на фазы цикла: а – ветвь роста 23 цикла (1996-2001), б- ветвь спада 23 цикла (2001 – 2008), с – ветвь роста 24 цикла (2009 – 2013), д – ветвь спада 24 цикла (2013 – 2017).

2.2.3 Параметризация времени РВЭ

В качестве величины времени РВЭ, которая характеризует средний параметр РВЭ для каждой отдельной АО использовалась величина

$$TRS = \frac{t_n - t_1}{n - 1} \quad (2.4)$$

где $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$ – моменты максимумов вспышек в избранной АО, n –

количество событий в данной АО.

Другая величина характеризует время РВЭ для отдельных вспышек:

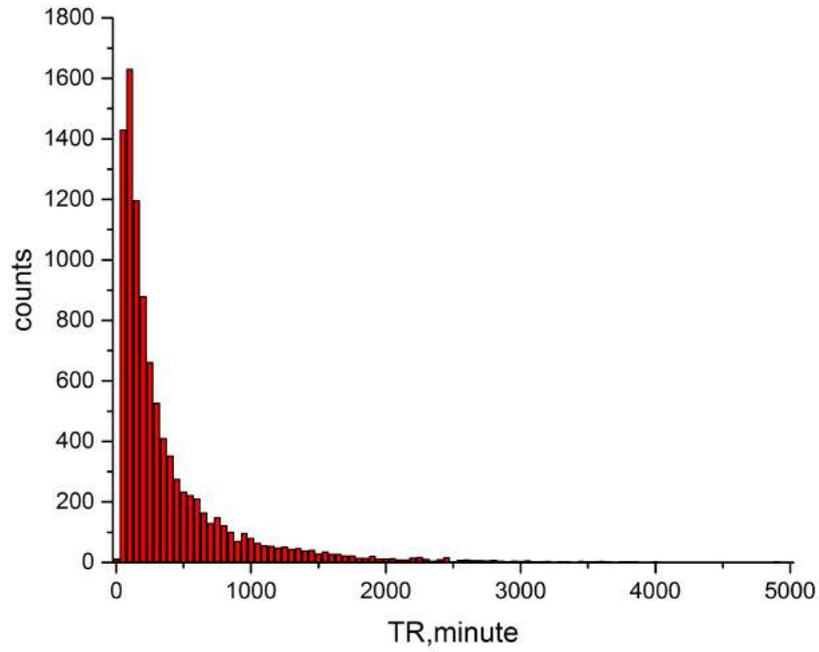
$$TRI = t_{i+1} - t_i \quad (2.5)$$

В этом случае каждую АО характеризует некоторое статистическое распределение. Полное число вспышек в АО (назовем это вспышечной продуктивностью) обозначим NR.

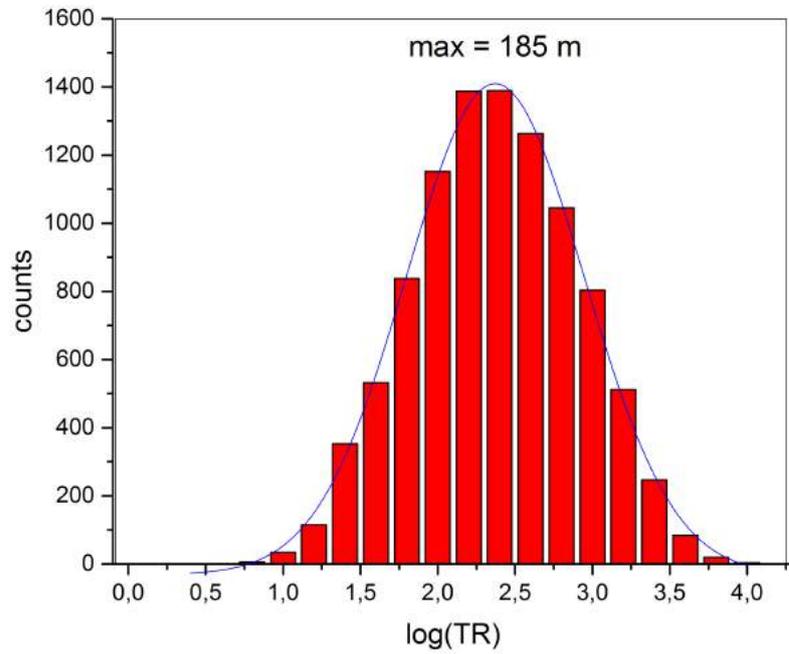
2.2.4 Статистическое распределение параметров РВС

На рис. 2.3 представлено статистическое распределение времен рекуррентности (TRI), найденное по всем временам рекуррентности вспышек за выбранный период.

Можно заметить, что оно существенно отличается от нормального. В то же время, если рассмотреть статистическое распределение (рис 2.3b), где по оси x отложено $\log(TRI)$, получим распределение, весьма близкое к гауссиане с максимумом $\sim 185m$ (среднее квадратическое отклонение в логарифмах 0.559, что соответствует диапазону 50-675m, коэффициент корреляции между эмпирическим и теоретическим распределениями 0.998). Таким образом, TRI – в активных областях можно представить логнормальным законом – по крайней мере, для времен от 25 до 2500 минут, а это 94% всех вспышек. Некоторый недостаток вспышек с $TRI < 20$ мин может быть объяснен следующим образом. Десятки минут – типичное время длительности вспышек. Поэтому повторные вспышки с малыми временами рекуррентности, попадающие на крыло спада вспышечной кривой, могут быть потеряны из статистики. Недостаток же вспышек с $TRI > 2500$ минут легко объясняется вращением Солнца: эти времена уже соответствуют нескольким дням, и вспышки с такими временами рекуррентности «обрезаются» восточным и западным краями диска Солнца. Из того



a)



b)

Рис. 2.3: а - статистическое распределение TRI для ~ 10000 вспыхечных событий по времени РВЭ; б - то же для десятичного логарифма TRI.

обстоятельства, что у нас получилось логнормальное распределение, можно предположить, что повторяемость вспышек в АО определяется неаддитивным (нелинейным) взаимодействием многих факторов.

Как было отмечено выше, ряд авторов предлагали для времен рекуррентности вспышек экспоненциальный (типа Пуассона) или степенной (типа скейлинга или Парето) закон распределения. Мы полагаем, что в будущем выбор между тремя видами распределений TRI поможет выработать правильный взгляд на природу происхождения вспышек.

Величина TRI характеризует типичные времена РВЭ, которые могут быть различными в разных АО. Рассмотрим статистическое распределение другой величины – TRS, которая характеризует средний темп появления вспышек в отдельных АО, причем в связи с результатами для TRI возьмем в рассмотрение $\log(\text{TRS})$ – рис. 2.4.

Логарифмы средних для каждой АО (TRI) образуют более детальное статистическое распределение, чем TRI. АО имеют некоторый типичный набор значений, чаще встречающихся, чем другие: 190, 290, 370, 470, 590 и 950 минут. Сравним эти времена с набором типичных периодов долгопериодических колебаний пятен. По [37] это 40-45, 60-80, 135-170, 220-250, 480-520 минут, а по [76] это 50–60, 80–100, 200–250, 400–500 минут. Видно, что типичные времена РВЭ близки к типичным периодам долгопериодических пятенных колебаний, так что эти явления, происходящие в АО Солнца, могут быть связаны.

Если рассматривать средние времена рекуррентности для 23 и 24 цикла по отдельности, они показывают похожие результаты (рис. 2.5).

2.2.5 Типичные времена РВЭ на разных фазах 11-летнего цикла

Рис. 2.6 иллюстрирует динамическую плотность вероятности встречаемости тех или иных значений TRI в зависимости от фазы 11-летнего цикла (т.е.

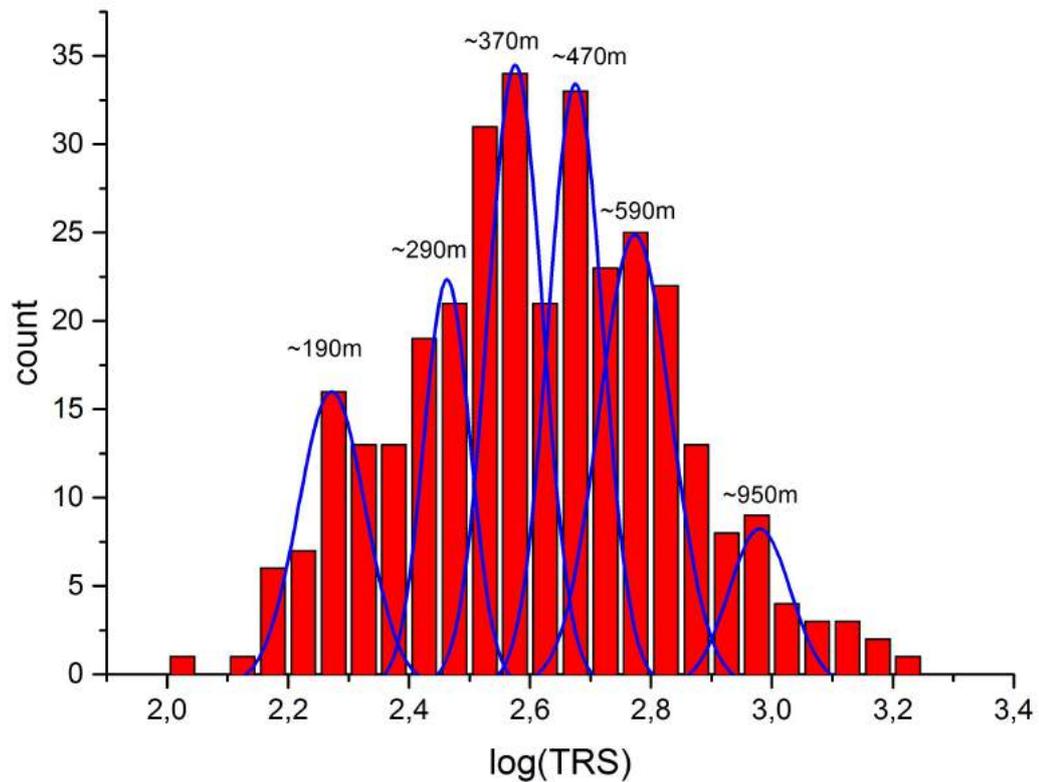
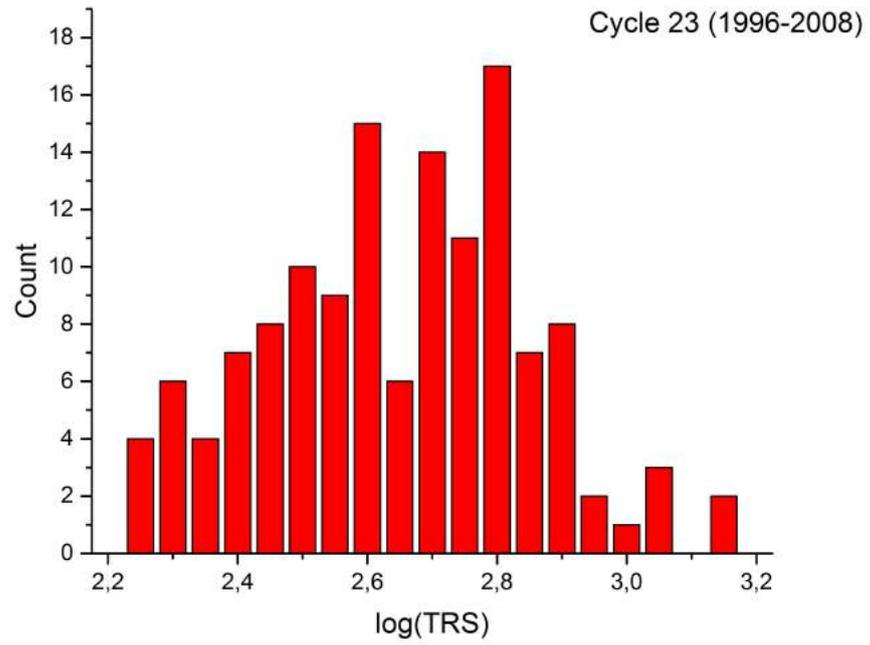


Рис. 2.4: Статистическое распределение $\log(\text{TRS})$ для 330 активных областей. число событий нормировано на общее число событий в году).

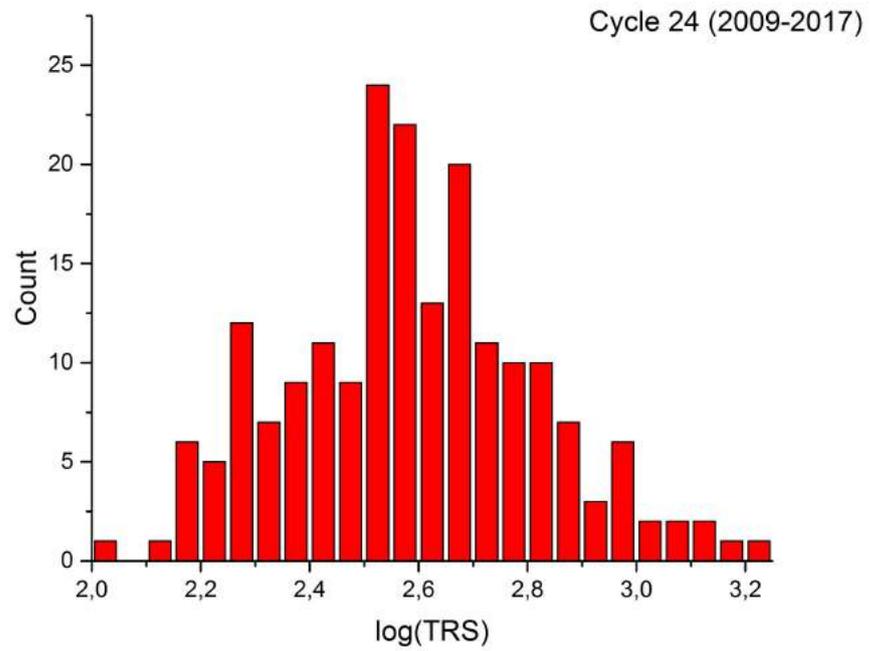
Имеется примечательная особенность, - типичные времена РВЭ для минимума и максимума цикла различаются. В максимуме цикла распределение TRI с максимумом в 23-м цикле ~ 300 минут, в 24-м цикле ~ 200 минут, в то время как в минимуме существует два характерных значения TRI – около 50 минут и более длительные – около 300 минут.

Это обстоятельство может иметь отношение к динамо-механизму 11-летнего цикла.

Если рассмотреть аналогичную частоту встречаемости различных значений TRI для вспышек разного класса по классификации GOES (рис. 2.7), то четкие закономерности не видны. Однако в случае 24 цикла для вспышек класса В и С виден провал Гневышева (Gnevyshev Gap), при этом вспышки класса В

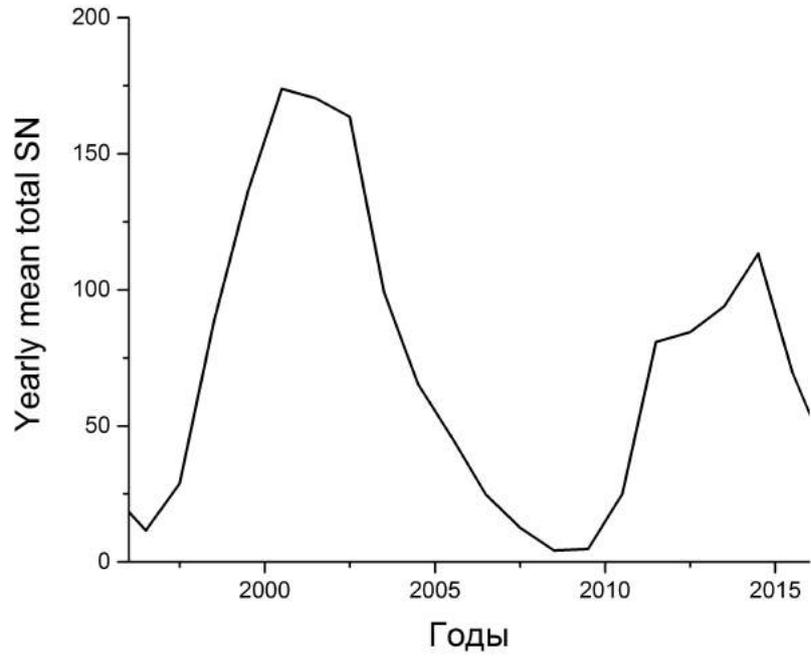


a)

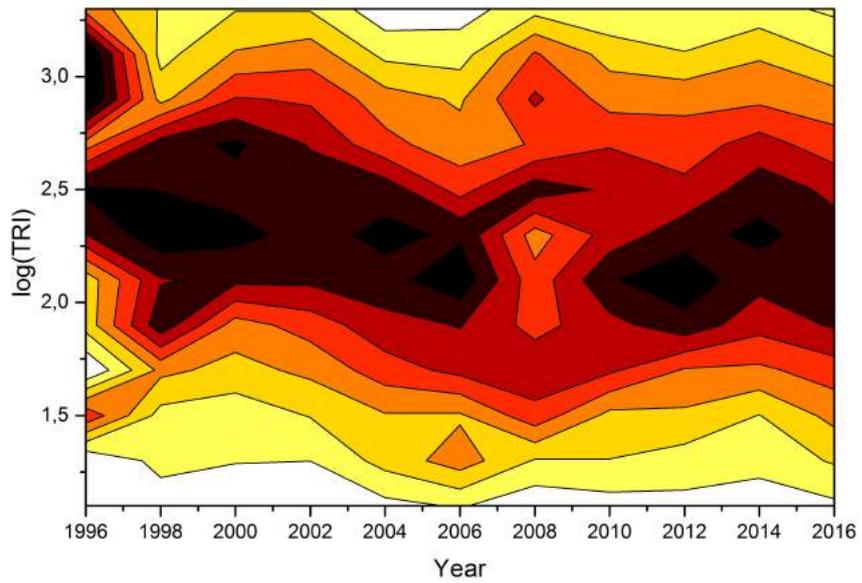


b)

Рис. 2.5: Статистическое распределение $\log(\text{TR})$ для цикла 23 (а) и для цикла 24(б).



a)



b)

Рис. 2.6: Частота встречаемости различных значений TRI в зависимости от фазы цикла (a). Динамическая плотность вероятности частоты вспыхивающих событий (b).

характерны для первого пика (2010-2013), а вспышки класса C – для второго (2013-2016).

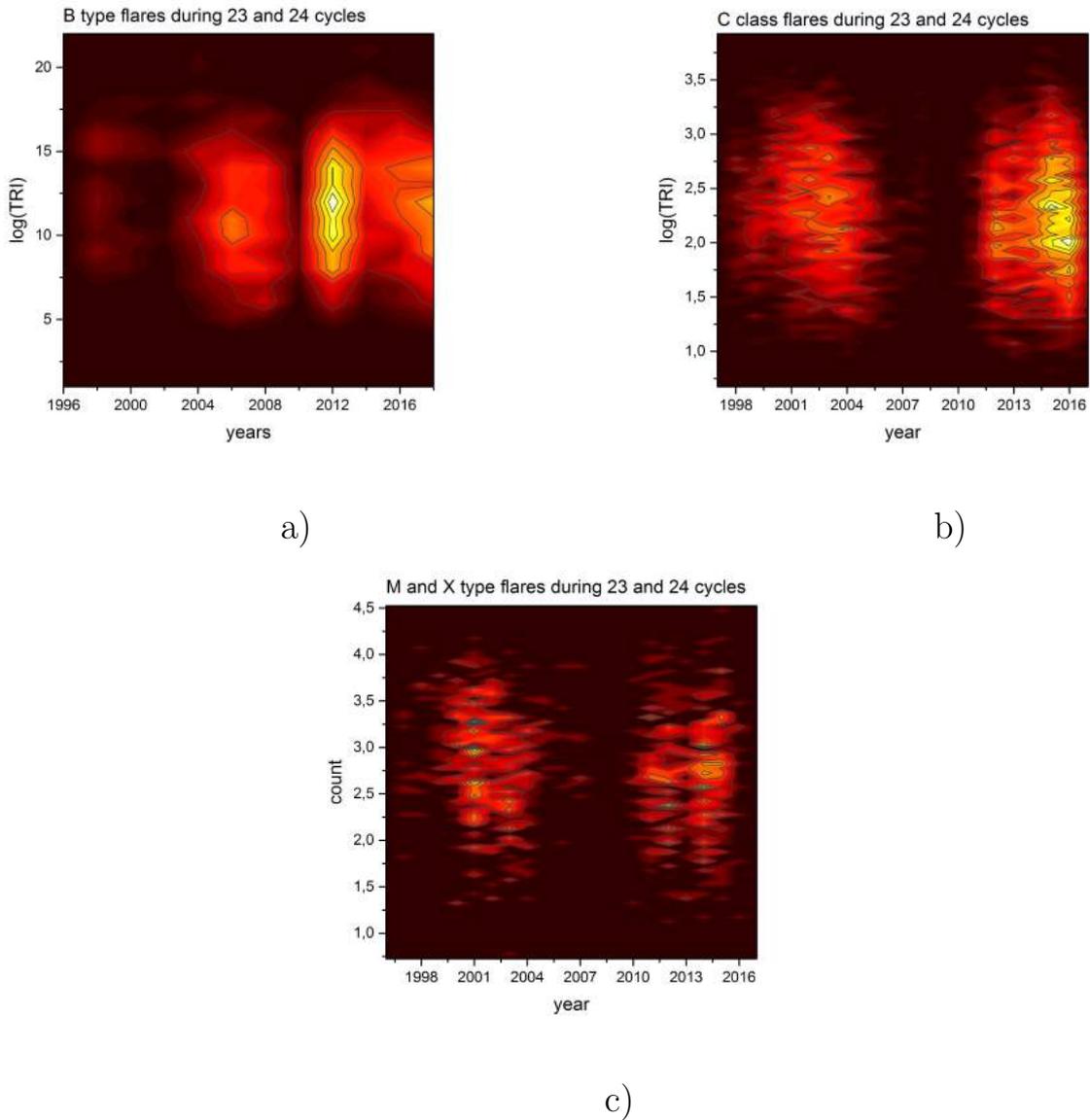


Рис. 2.7: Частота встречаемости различных значений TRI для вспышек разного класса GOES (а – вспышки класса В, б- вспышки класса С, с – вспышки класса М и Х).

2.2.6 Связь между временем РВЭ и параметрами АО

Некоторые исследователи связывали вероятность вспышек в АО с площадью локализованной в ней группы пятен S (вероятность появления вспышки полагалась пропорциональной корню из площади). Чтобы проверить этот

однофакторный прогноз, TRS было сопоставлено с площадью пятен S – см. рис. 2.8.

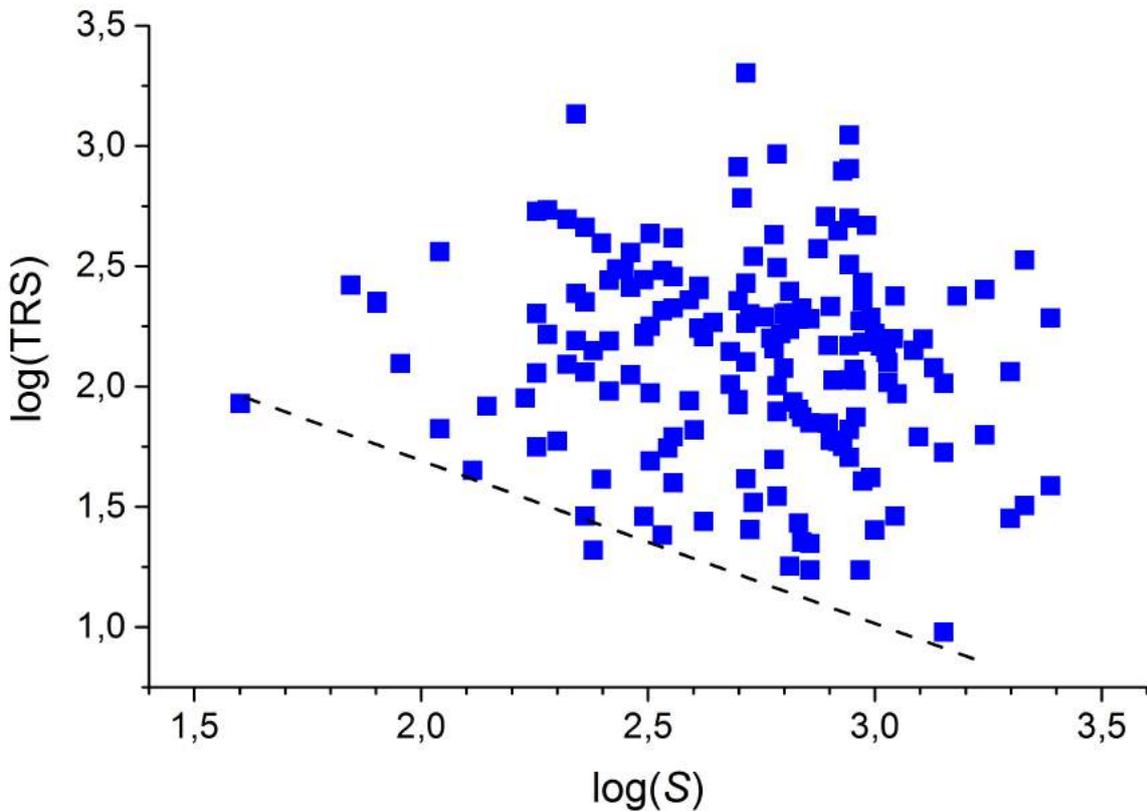


Рис. 2.8: Зависимость логарифма среднего темпа появления вспышек в активной области TRS от логарифма площади группы пятен данной АО.

Единственный вывод, который, можно сделать из этого рисунка, – минимальное значение среднего времени РВЭ (пунктир) для АО зависит от площади группы: чем больше площадь, тем в среднем для АО вспышки могут происходить чаще, но ясной зависимости нет. Коэффициент корреляции между S и TRS порядка 0.5. Аналогичный по величине коэффициент наблюдается между S и еще одной характеристикой появления вспышек в АО – общим числом вспышек (NR). Такая корреляция не имеет практической значимости для прогнозирования. В то же время, если учесть выводы о мультипликативных связях между параметрами вспышек, т.е. имея в виду множественность параметров,

определяющих явление вспышки и его рекуррентность, можно построить множественную регрессию между параметрами TRS, S и NR. Оказывается, эти величины с коэффициентом корреляции 0.8 связаны соотношением

$$NR = (252 \pm 23) + (1.20 \pm 0.20)\sqrt{S} - (93.9 \pm 8.8)\log TRS \quad (2.6)$$

При этом значимость трех коэффициентов в уравнении регрессии 2.6 обеспечена на уровне 11σ , 6σ и 11σ соответственно.

2.3 Выводы

Показано, что распределение рекуррентности времен вспышек в активных областях можно представить логнормальным законом.

Типичные времена рекуррентности вспышек в минимуме и максимуме (23 цикла) различаются. В максимуме цикла распределение TRI одномодальное с максимумом в 23-м цикле ~ 300 минут, в 24-м цикле ~ 200 минут, в то время как в минимуме существует два характерных значения TRI – около 50 минут и более длительные – около 300 минут.

Имеется тенденция к уменьшению минимального TRS активной области с возрастанием площади группы пятен.

Средние времена рекуррентности вспышек в АО имеют типичные периоды 190, 290, 370, 470, 590 и 950 минут, что близко к типичным периодам долгопериодических колебаний пятен.

Полное число вспышек в АО зависит от площади пятен и темпа появления вспышек.

3 Модифицированное правило Вальдмайера и закономерности величин максимумов 11-летних циклов

3.1 Введение

3.1.1 Закономерности поведения 11-летних солнечных циклов

Каждый цикл солнечной активности имеет свои особенности. Многие из этих характеристик являются общими для других циклов, и они дают важную информацию для моделей циклов [80]. 11-летние циклы отличаются не только различной длиной, но и различной интенсивностью, то есть разными значениями максимальных чисел Вольфа. Интенсивность 11-летнего цикла солнечной активности тесно связана с его длительностью. Чем мощнее этот цикл (чем больше его максимальное относительное число пятен), тем меньше его продолжительность, и наоборот.

Также существует зависимость максимального числа Вольфа от длины ветви роста 11-летнего цикла: чем больше максимальное число солнечных пятен в этом цикле, тем короче ветвь его роста. Это – так называемое правило Вальдмайера. Форма циклической кривой 11-летнего цикла в значительной степени определяется его высотой. Высокие циклы более асимметричны, их ветвь роста намного меньше ветви спада, в то время как относительно небольшие циклы имеют практически равные ветви роста и спада, а у совсем маленьких циклов ветвь роста превышает ветвь спада. Явления слабой или средней интенсивности дают ту же кривую 11-летнего цикла, что и числа Вольфа (число пятен, число факельных площадок, число солнечных вспышек, и т.д.), в то время как крупные явления (большие группы пятен, яркие кальциевые флоккулы, протонные вспышки и т.д.), мощные активные образования на Солнце, то они чаще всего встречаются не в самую эпоху максимума 11-летнего цикла, а через

1-2 года после нее (второй максимум Гневывшева). Таким образом, для этих явлений циклическая кривая либо становится двухвершинной, либо сдвигает максимум на более поздние по отношению к числам Вольфа годы.

3.1.2 23-й цикл солнечной активности и его особенности

Точка минимума 22 цикла активности на Солнце зафиксирована в мае 1996 года. Первые события после окончания эпохи минимума как будто бы свидетельствовали о том, что цикл будет большим (150-160 единиц чисел Вольфа по прогнозам). В сентябре 1997 года на диске Солнца появились две значительные по площади группы пятен, определившие первоначальную крутизну ветви роста 23-го цикла. К концу 1997 года можно было предполагать, что текущий цикл будет высоким (правило Вальдмайера). Тем не менее в конце 1998 года солнечная активность вдруг резко упала и оставалась на сравнительно низком уровне почти полгода, так что возникло впечатление, что эта флуктуация уже предшествует завершению ветви роста, и цикл может быть нестандартным, с короткой ветвью роста, но невысоким. Последующий рост активности в 1999 году скомпенсировал отрицательную флуктуацию, и только затем мы непосредственно приблизились к эпохе максимума 23-го цикла. Основной максимум 23-го 11-летнего цикла солнечной активности наступил в апреле 2000 года, вторичный максимум – в ноябре 2001 года. Понятие вторичного максимума (максимум Гневывшева) ввел Мстислав Николаевич Гневывшев. Как правило, профиль солнечной активности имеет один или несколько вторичных максимумов, вторичный максимум наблюдается только в приэкваториальном районе.

Перестройка генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца, наиболее вероятно начавшаяся на ветви спада 22 солнечного цикла, привела к значительному и очень длительному ослаблению магнитных полей в тенях

солнечных пятен [79] и общего магнитного поля Солнца, что и обеспечило необычные свойства фазы минимума между 23 – 24 солнечными циклами. Фаза минимума, начавшаяся в мае 2005 г., продлилась до декабря 2010 г., захватив первые 24 месяца развития текущего 24 цикла солнечной активности [24].

3.1.3 Правило Вальдмайера

В статистике пятнообразовательной деятельности существует правило, выведенное Вальдмайером в 1935 г [99].

Согласно Вальдмайеру, кривая относительных чисел Вольфа в пределах 11-летнего цикла обладает следующими особенностями:

- Длина ветви спада тем больше, чем выше 11-летний цикл, но связь настолько слабая, что в грубом приближении величину ветви спада можно считать неизменной;
- Эпохе максимума 11-летнего цикла предшествует критическая точка, после которой подъем циклической кривой становится более пологим. Однако, эта особенность по-разному выражается в разных циклах, поэтому ее нельзя использовать в прогностической практике;
- Длина ветви роста тем больше, чем ниже амплитуда 11-летнего цикла.

Таким образом, высокие циклы обладают крутыми и короткими ветвями роста, а низкие – пологими и длинными. Следует заметить, что первоначально сам Вальдмайер связывал данный эффект со взрывным характером цикла (так называемая «эрупционная гипотеза»), доказывая, что отдельные циклы независимы, т.е. каждый цикл представляет собой практически независимый взрыв, и все его свойства определяются только данным взрывом и никак не связаны с особенностями предыдущего цикла. В настоящее время мы знаем, что это не так: 11-летние циклы органично входят в иерархию более длительных

[5], связаны между собой, в частности, через изменения крупномасштабного магнитного поля [59, 68], и уже в минимуме цикла имеются предвестники будущего развития цикла (например, полярное поле формируется из источников и прошлого, и настоящего циклов активности во время фазы спада и в минимуме активности [93]).

3.1.4 Ряды данных пятенной активности Солнца

В середине 19 столетия начали считать относительные числа солнечных пятен, так называемые числа Вольфа. Рудольф Вольф в Цюрихе организовал патрульную службу наблюдений Солнца, которая в модифицированном виде существует до сих пор. В настоящее время патрульные наблюдения Солнца и вычисления числа солнечных пятен осуществляются Бельгийской Королевской обсерваторией. Благодаря этому мы располагаем в значительной степени однородным рядом, отражающим изменения солнечной активности за последние четыре столетия (с 1700 г.). Этот ряд состоит фактически из двух частей: прямые ежедневные наблюдения Солнца, проводимые регулярно с 1850 г. вначале в Швейцарии (так называемый цюрихский ряд), потом – в Бельгии (международный ряд) и компиляция данных из разрозненных источников до 1850 г.

Числа Вольфа - это характеристика, которая одновременно отражает число групп пятен и «строение» каждой из них.

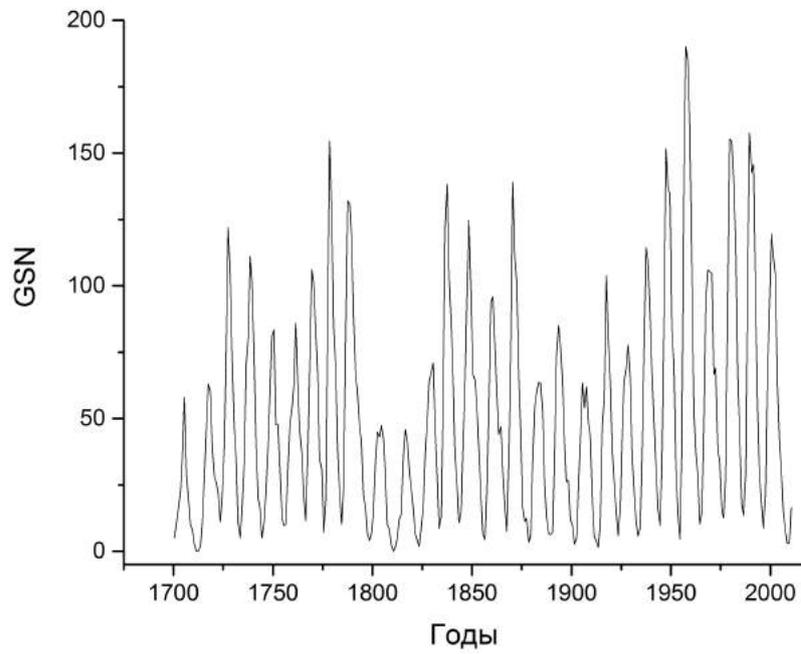
$$W = k(f + 10g) \quad (3.1)$$

где f - количество наблюдаемых на диске Солнца пятен, g - количество образованных ими групп, k - нормировочный коэффициент для перехода к Цюрихской системе, выводимый для каждого наблюдателя и телескопа. Сам Вольф был главным наблюдателем с 1849 по 1893 год и имел персональный

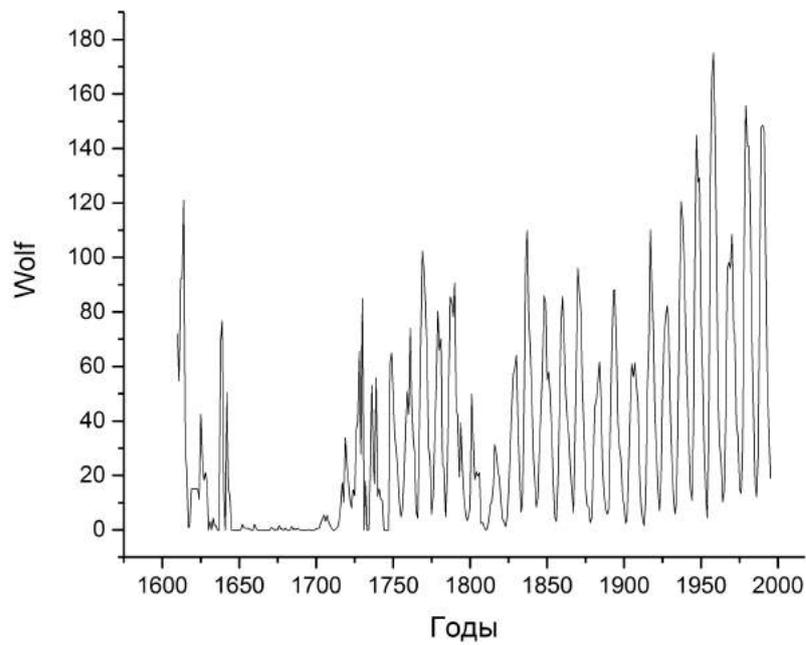
поправочный коэффициент $k = 1.0$. За ним следовал Альфред Вольфер с 1894 по 1926 год, Уильям Отто Бруннер с 1926 по 1944 год, и Макс Вальдмайер с 1945 по 1979 г. Числа Вольфа считались за каждый день, при наличии наблюдательных данных. При наличии нескольких наблюдений в день число Вольфа считалось, используя данные только одного наблюдателя, согласно иерархии, которую разработал Рудольф Вольф. Все остальные наблюдения за этот день отбрасывались. При отсутствии наблюдений ряд Вольфа заполнялся интерполяцией. С 1849 по 1981 год числа Вольфа считались только по данным наблюдений в Цюрихской обсерватории и ее филиалов. Этот ряд считается одним из самых длинных непрерывных рядов прямых научных наблюдений. Числа Вольфа являются ключевым индикатором солнечной активности, но вовсе не потому, что это самый лучший показатель, а скорее из-за длины ряда.

Дополнили этот ряд солнечных пятен в 1998 г. гелиофизики Дуглас Хойт и Кен Шаттен, которые опубликовали ряд другого индекса – групп солнечных пятен с 1610 г. Новый ряд нормирован на ряд Вольфа, но имеет несколько отличий. Во-первых, он основан на гораздо более обширной архивной базе, Хойт и Шаттен проанализировали 445242 записи наблюдений 463 наблюдателей, что почти в два раза больше, чем было в распоряжении Вольфа. Это позволяет отодвинуть границу начала данных о солнечной активности с 1700 на 1610 год. Такое расширение интервала особенно важно, так как включает в себя минимум Маундера (1645–1700). Во-вторых, новый ряд учитывает только число групп пятен, видимых на Солнце, и не включает отдельные пятна, что уменьшает рассогласование между отдельными наблюдателями и зависимость результатов от используемых инструментов. Кроме того, в отличие от числа Вольфа, число групп пятен представляет собой взвешенное среднее по всем существующим данным за день, т.е. использует всю доступную информацию. Такой подход позволяет оценить систематические погрешности полученных чисел пятен,

которые составляют несколько процентов до 1849 г. и менее процента — после 1850-го. (рис. 3.1).



а)



б)

Рис. 3.1: а – ряд групп солнечных пятен Хойта-Шаттена, б – ряд чисел Вольфа.

Суммарная площадь – характеристика, подсчитываемая путем сложения площадей всех групп пятен на видимом солнечном диске. Между площадью пятен и напряженностью их магнитного поля существует связь, поэтому такой индекс как суммарная площадь пятен дает представление о суммарном потоке магнитных полей на Солнце. Данный индекс солнечной активности регулярно фиксировался в Гринвичской обсерватории с 1874 по 1976 гг. с использованием фотопластинок, полученных от обсерваторий в Кейптауне, Южной Африке, Кодайканале (Индия).

$$S = \sum_i S_i \sec \theta_i \quad (3.2)$$

где R – радиус видимого солнечного диска, r – расстояние от его центра до рассматриваемого пятна. Между суммарной площадью пятен и числами Вольфа существует определенная статистическая связь, но коэффициент корреляции невысокий $k=0.85$. $S = \alpha W$, где коэффициент α изменяется с ходом 11-летнего цикла, что свидетельствует об относительной независимости суммарных площадей и относительных чисел солнечных пятен.

Здесь следует сделать одно важное замечание. В 2014-2015 годах международная группа исследователей, применив новый метод сшивки наблюдений разных авторов, получила новые версии – “versions 2.0” – рядов числа Вольфа <http://www.sidc.be/silso/datafiles> и числа групп пятен <http://www.sidc.be/silso/groupnumber>. Апробация новых версий в исследованиях еще предстоит, и большая часть нашей работы выполнялась до 2015 года. Поэтому ниже мы будем использовать традиционные версии рядов W и GSN – “versions 1.0”.

3.1.5 Прогнозы поведения 24-го цикла солнечной активности

24 цикл солнечной активности начался в декабре 2008 года и продолжается до сих пор. Надо отметить, что в минимуме 23/24 цикл вел себя необычно [77]. Предшествующий 23 цикл активности был довольно низким, длинным и сложным по структуре. Его необычное поведение повлияло на 24 цикл активности.

Численные прогнозы максимумов, как правило, давали средний результат, ряду авторов наступающий 24 цикл казался небольшим. В работе [16] были представлены две оценки максимума 24 цикла - (65 ± 16) и (87 ± 13) чисел Вольфа. В работе [47] 24 цикл также был представлен как слабый, с максимумом в районе $W=80$. В работе [46] было спрогнозировано, что цикл 24 достигнет своего максимума в декабре 2012 года и достигнет примерно 87 единиц. В работах [58, 22], максимум имел место в 2012 году, с амплитудой 90 ± 27 , а минимум 24 цикла произойдет 2017.

В целом, разброс прогнозируемых величин максимума был довольно большим (от 60 до 170 единиц), но наиболее вероятным исследователи считали значение 80-100.

3.2 Модифицированное правило Вальдмайера

3.2.1 Цели и задачи раздела

Правило Вальдмайера устанавливает связь амплитуды 11-летнего цикла (в числах Вольфа или других индексов пятенной активности Солнца), W_M , с длиной ветви роста $\tau = t_M - t_m$, где t_m и t_M – моменты минимума и максимума цикла по сглаженным за год среднемесячным значениям чисел Вольфа. Высокие циклы обладают малой длиной ветви роста (τ), а низкие – большой. Для прогностического применения правило Вальдмайера не очень

удобно для использования, так как соответствующие коэффициенты корреляции недостаточно высоки, что приводит к значительным величинам доверительных интервалов оценок. Затрудняет прогноз и то, что продолжительность ветви роста можно узнать только тогда, когда соответствующий максимум уже наступил.

С другой стороны, правило Вальдмайера действительно отражает какие-то фундаментальные свойства цикличности. Можно попытаться найти параметры, в большей степени отражающие связь амплитуды цикла с его предыдущим поведением на ветви роста до максимума. Таким параметром может быть максимальная скорость нарастания магнитного потока на ветви роста развивающегося цикла. Кроме того, основываясь на найденных закономерностях, можно попытаться создать правила для прогнозирования амплитуды цикла и даже, как показал опыт, оценить максимальную амплитуду 11-летних циклов на продолжительной временной шкале.

3.2.2 Изменение скорости развития цикла, общая закономерность (на основе ряда чисел Вольфа)

Если построить соотношение параметров длины ветви роста и амплитуды максимума циклов, а затем попробовать описать его не линейной функцией, как у Вальдмайера, а более «развитыми» зависимостями (см. рис. 3.2), видно, что учёт нелинейности связи незначительно улучшает коэффициент корреляции. Не стоит также забывать о том, что правило Вальдмайера является именно «правилом», а не строгим соотношением для солнечной активности.

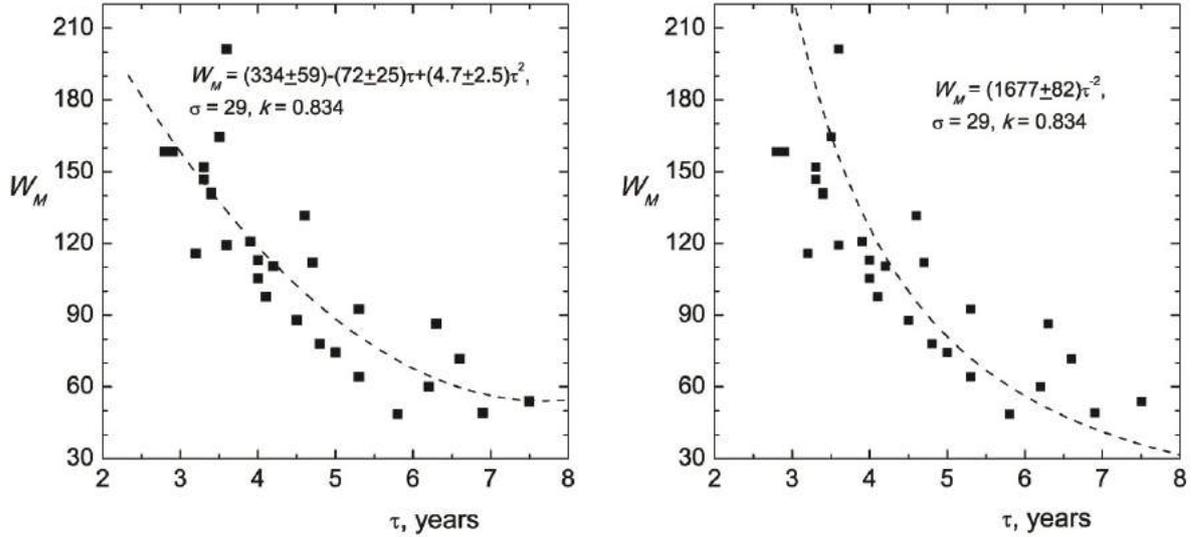


Рис. 3.2: Эмпирическая зависимость длины ветви роста τ и амплитуды цикла W_M и два соотношения для его описания.

Для среднегодовых значений W_i введем параметр цикла $\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$, характеризующий среднегодовую скорость прироста суммарного пятенного магнитного потока (скорость развития цикла). Рассмотрим изменение этого параметра по отношению к изменению цикла W (см. рис. 3.3).

Оказывается, модуляция максимумов ΔW_i происходит параллельно модуляции числа Вольфа в максимуме данного цикла, предворяя максимум на несколько лет (среднее опережение $\Delta W(n)$ по отношению к $W_M(n)$ составляет $T = 1.5 \pm 1.0$ года, но может также достигать 3-4 лет). Если эта зависимость окажется достаточно сильной, мы сможем применять ее для ранней диагностики величины максимума цикла.

3.2.3 Модифицированное правило Вальдмайера

Обозначив $DW(n) = \max \Delta W_i$ для n -го цикла, сопоставляем эту величину с величиной максимума данного цикла $W_M(n)$ для интервала с 1700 по 2010 год (данные берем из базы данных Королевской обсерватории Бельгии <http://www.sidc.be/silso/versionarchive>). Зависимость оказывается достаточно

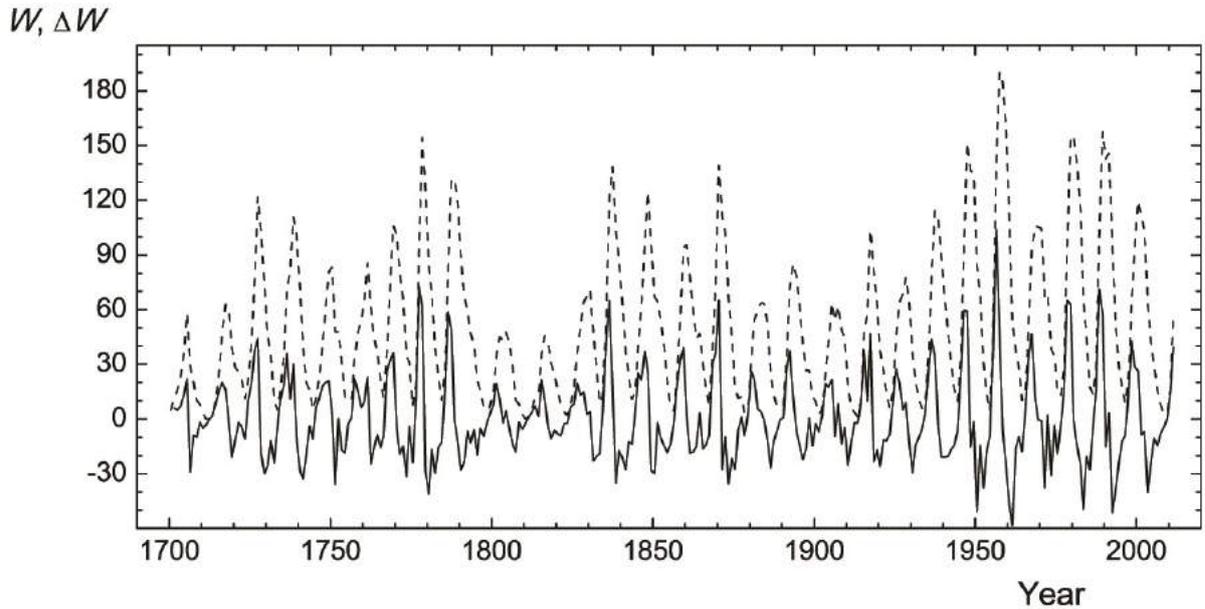


Рис. 3.3: Ряд числа Вольфа (пунктир) и величины $\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$ (сплошная линия).

выраженной, но нелинейной (см.рис. 3.4).

Аппроксимируя ее по методу наименьших квадратов параболой, получаем:

$$W_M(n) = (12 \pm 11) + (2.75 \pm 0.45)DW(n) - (1.01 \pm 0.41)10^{-2}DW^2(n) \quad (3.3)$$

среднеквадратическое отклонение $\sigma = 12$, коэффициент корреляции $k = 0.95$.

Свободный член в аппроксимированном выражении не отличается от нуля значимо, а в пределе при стремлении амплитуды циклов к нулю их максимальная производная тоже должна стремиться к нулю. Поэтому квадратичная зависимость $W_M(n)$ от $DW(n)$ при аппроксимации не должна содержать свободный член.

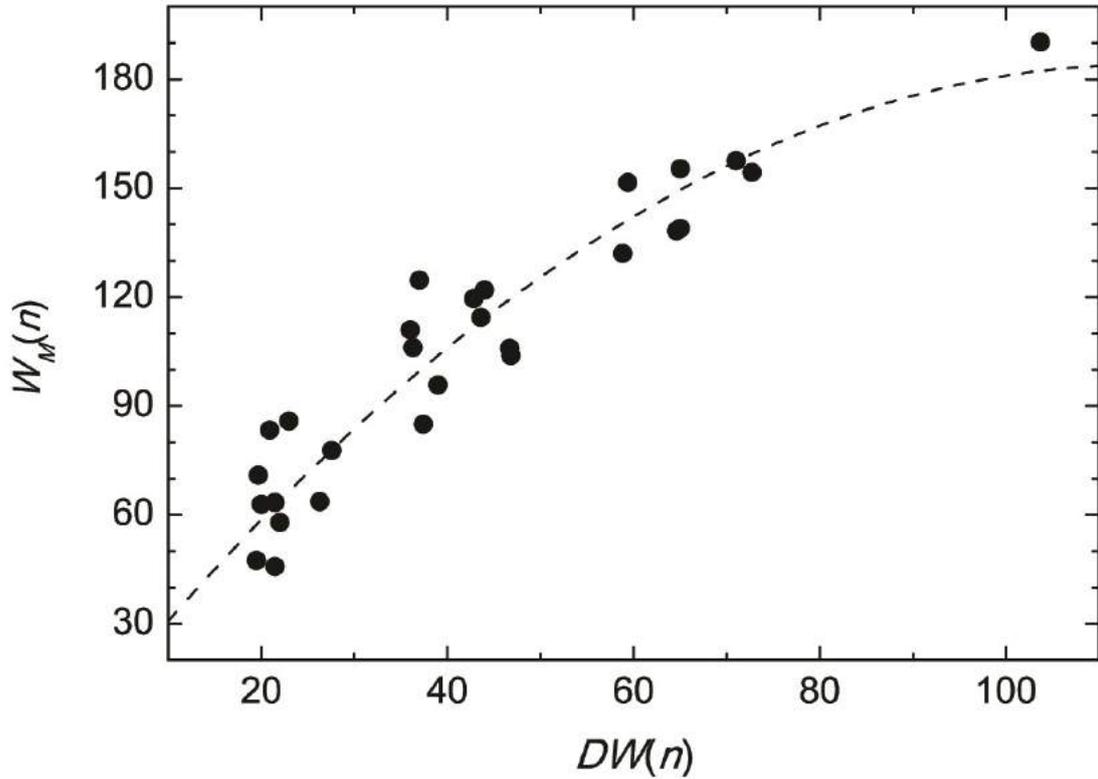


Рис. 3.4: Зависимость числа Вольфа в максимуме $W_M(n)$ для n -го цикла от максимальной среднегодовой скорости его изменения на ветви роста $DW(n)$.

Это важное замечание не было учтено в предыдущих работах [55, 33], в которых впервые сопоставлялась амплитуда цикла с максимальной скоростью изменения активности на его ветви роста. Поэтому полученные в этих работах линейные соотношения дают ненулевую $W_M(n)$ при $DW(n)=0$, что физически невозможно.

Применив метод наименьших квадратов с учетом этого, имеем:

$$W_M(n) = (3.21 \pm 0.14)DW(n) - (1.40 \pm 0.21)10^{-2}DW^2(n), \sigma = 12, k = 0.95 \quad (3.4)$$

Точность таким образом модифицированного правила Вальдмайера вдвое превышает точность оригинального правила. Поэтому с помощью параметра максимальной скорости изменения числа Вольфа мы можем заблаговременно

диагностировать величину максимума цикла.

Проверим связь величины максимума с максимальной скоростью развития цикла для рядов других индексов: относительного числа групп пятен [43] $GM(n)$ vs $DG(n)$ для интервала 1611-1995 гг. и средней полной площади пятен [67, 69] $SM(n)$ vs $DS(n)$ для интервала 1600-2010 гг. (см. рис. 3.5).

Для ряда Хойта-Шаттена получаем:

$$G_M(n) = (2.85 \pm 0.32)DG(n) - (1.39 \pm 0.54)10^{-2}DG^2(n), \sigma = 24, k = 0.861 \quad (3.5)$$

Для ряда средней полной площади:

$$S_M(n) = (2.84 \pm 0.17)DS(n) - (6.9 \pm 1.5)10^{-2}DS^2(n), \sigma = 290, k = 0.931 \quad (3.6)$$

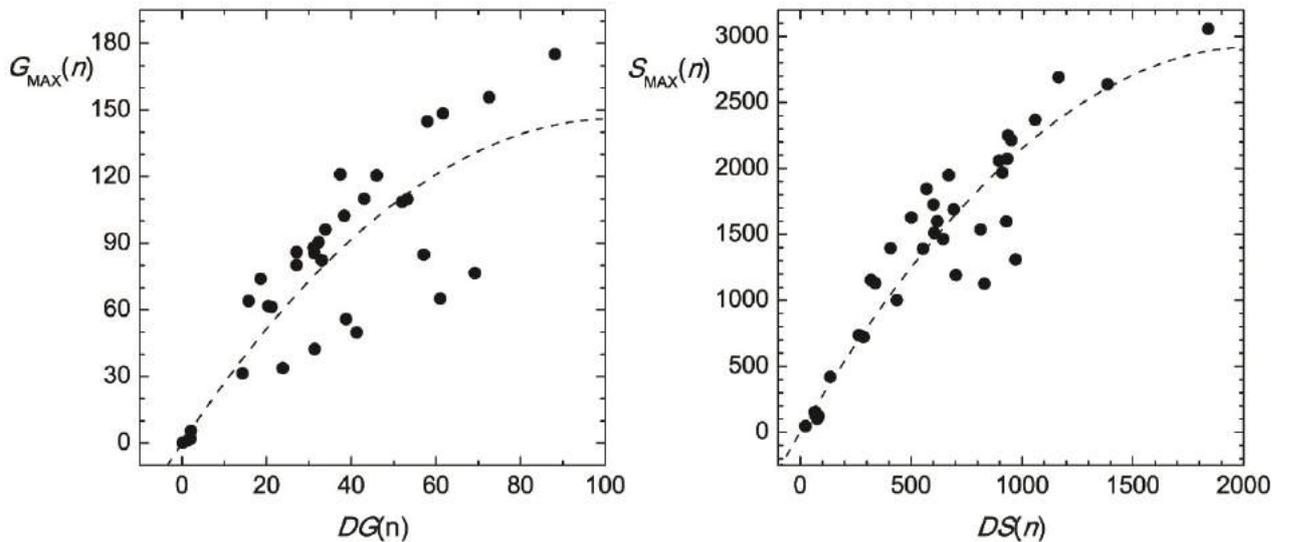


Рис. 3.5: Зависимость от максимальной среднегодовой скорости для рядов из [43] – слева и [67, 69] – справа.

Эмпирическое соотношение для индекса относительного числа групп пятен значительно более неопределенное, чем для числа Вольфа. Это может объясняться большей флуктуируемостью индекса, приводящей, в частности, к большим случайным ошибкам в определении разности $\Delta G_i = G_i - G_{i-1}$ и

ее максимального значения. Зависимость для индекса площади – удовлетворительная.

Как мы уже отмечали, с 1 июля 2015 года изменилась методика подсчета чисел солнечных пятен цюрихского ряда [26]. Если использовать модифицированное правило Вальдмайера для нового ряда, получаем:

$$W_M(n) = (3.3 \pm 0.16)DW(n) - (1.03 \pm 0.16)10^{-2}DW^2(n), \sigma = 20, k = 0.93 \quad (3.7)$$

Отметим, что коэффициент корреляции несколько меньше, чем для «старого» ряда чисел Вольфа.

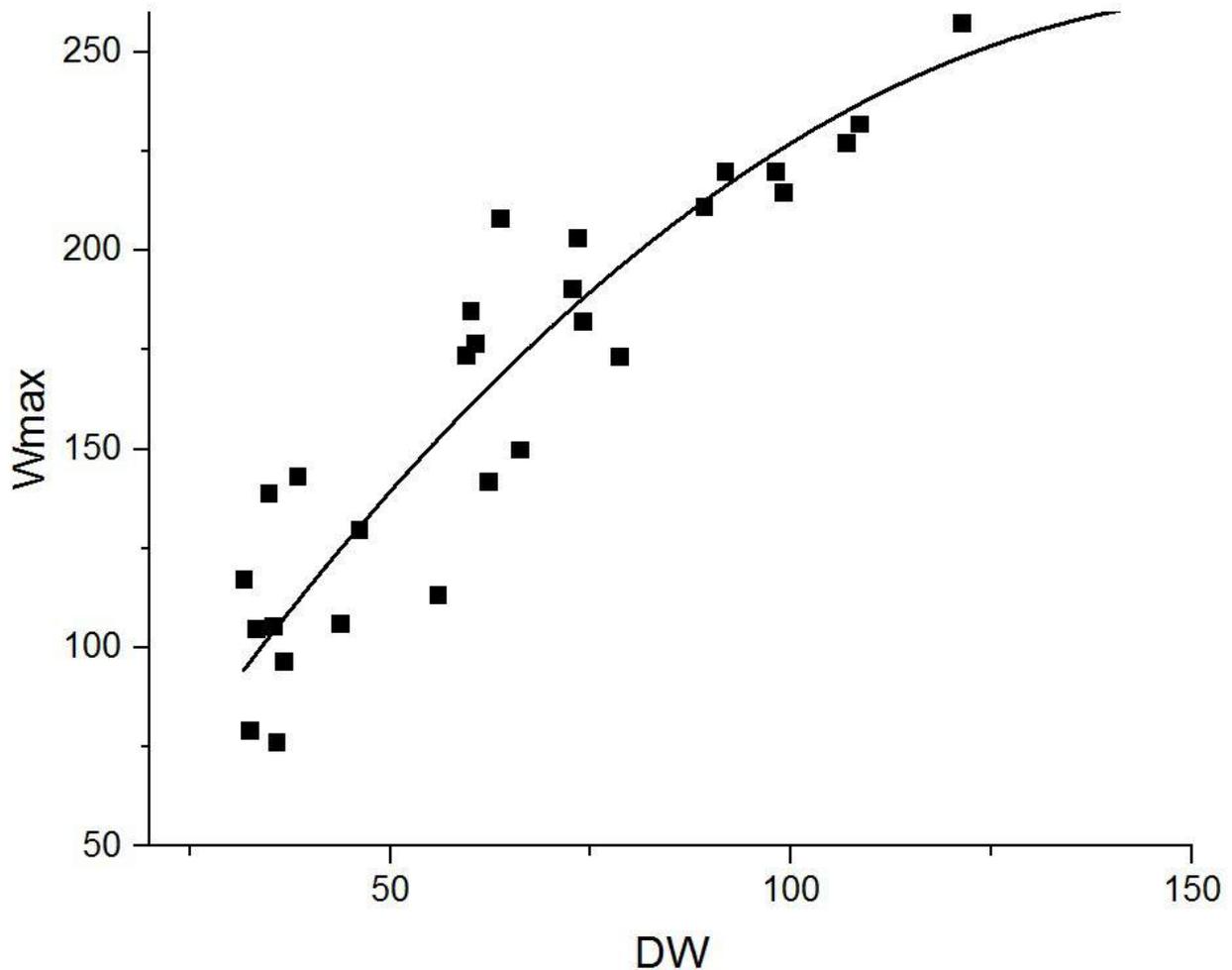


Рис. 3.6: Зависимость числа Вольфа в максимуме от максимальной среднегодовой скорости его изменения на ветви роста (для новой версии чисел Вольфа).

3.2.4 Диагностика 24 солнечного цикла с использованием модифицированного правила Вальдмайера

В работе 2012 года [73] мы произвели диагностику дальнейшего хода 24 цикла. Значения числа Вольфа в 2010 и 2011 годах были $W_{2010} = 16.5$, $W_{2011} = 55.7$. Таким образом, $\Delta W = 39.2$. Предположим, что данное значение ΔW не является максимальным для развивающегося цикла, тогда $W_{2012} > 55.7 + 39.2 \approx 95$. Если же оно – максимальное, то $W_M = 104 \pm 12$. Эта величина и является нижней оценкой величины максимума текущего цикла. В случае, если развитие цикла осуществится по данному сценарию, максимум будет достигнут не ранее 2013 года, поскольку, если $W_{2012} = 104$, это бы означало, что $\Delta W = 104 - 55.7 = 48.3$, а это значение по 3.4 привело бы к еще большей величине максимума $W_{2013} = 122 \pm 12$, что противоречит предположению $W_M = 104$.

Если же значение будет еще больше, например, 115, то максимум также наступит не ранее 2013 года и составит порядка 140 единиц числа Вольфа.

Таким образом, в начале 2012 г. максимум цикла № 24 составит не меньше $W_M = 104 \pm 12$, сам максимум состоится не ранее 2013 г. (Если аналогичным образом определить максимум по новому цюрихскому ряду, получим $W_M = 152 \pm 17$).

Для определения не только максимального числа Вольфа, но и формы цикла, воспользуемся регрессионными методами [5, 66], позволяющими связать максимальное W_M с числами Вольфа в ближайшие с ним i -е годы W_M до и после максимума. Нулевые условия - $\dot{W}_M = 0$ при $W_M = 0$.

Для цюрихского ряда получаем:

$$\begin{aligned}
 W_{M-1} &= (0.897 \pm 0.086)W(n) - (1.44 \pm 0.64)10^{-3}W^3(n), \sigma = 13, k = 0.857 \\
 W_{M+1} &= (0.726 \pm 0.074)W(n) + (1.15 \pm 0.55)10^{-3}W^3(n), \sigma = 11, k = 0.958 \\
 W_{M+2} &= (0.488 \pm 0.109)W(n) + (1.95 \pm 0.82)10^{-3}W^3(n), \sigma = 17, k = 0.906 \\
 W_{M+3} &= (0.280 \pm 0.086)W(n) + (1.84 \pm 0.64)10^{-3}W^3(n), \sigma = 13, k = 0.899 \\
 W_{M+4} &= (0.323 \pm 0.090)W(n) + (1.16 \pm 0.67)10^{-3}W^3(n), \sigma = 14, k = 0.736
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Если объединить эти данные с диагностируемым $W_M = 104 \pm 12$, получаем вероятный ход числа Вольфа в 24-м цикле (см. рис. 3.7).

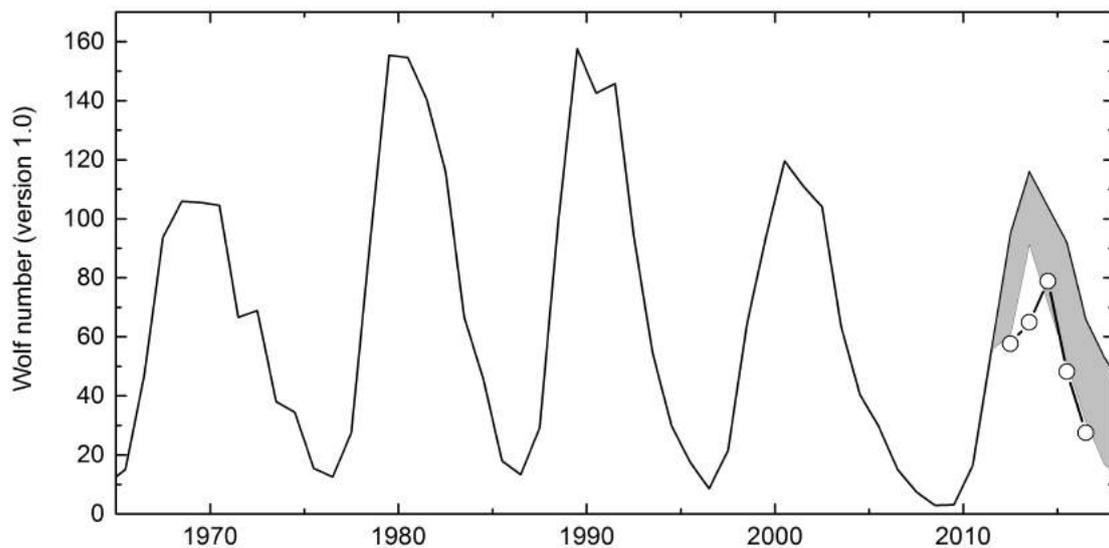


Рис. 3.7: Прогноз среднегодового хода 24-го цикла числа Вольфа, произведенная в 2012 году (серая область – пределы вероятных значений), его сравнение с предыдущими 11-летними циклами (сплошная линия) и реальные наблюдаемые значения после 2012 года (кружки). Версия чисел Вольфа 1.0.

Реальный ход цикла оказался несколько ниже прогнозируемого. Отметим, что при прогнозировании мы использовали классический подход к оценке

конечных доверительных интервалов [1] – на основе доверительных интервалов коэффициентов регрессии. На самом деле, «интервал прогноза» должен включать также среднеквадратическое отклонение экспериментальных точек от средней кривой. Это мы учли в следующей работе, выполненной после [73].

В следующей нашей работе [11], выполненной спустя полгода после [73], было замечено, что среднегодовые величины не обязательно рассчитывать стандартным календарным образом. Ничто не мешает использовать значения с июля некоторого года по июнь следующего. На рис. 3.8 показана зависимость, отражающая модифицированное правило Вальдмайера $W_M = f(\Delta W_M)$, как при обычном подсчете среднемесячных (черные кружки), так и при сдвиге на полгода (светлые).

При сдвиге корреляция несколько уменьшается, но по-прежнему высока ($k = 0.93$). Зависимость, определенная с использованием метода наименьших квадратов по всем точкам рисунка, записывается как:

$$W_M(n) = (3.23 \pm 0.12)\Delta W - (1.54 \pm 0.18)10^{-2}\Delta W^2, \sigma = 14, k = 0.93 \quad (3.9)$$

Подставляя в эту зависимость максимальное значение ΔW на ветви роста 24-го цикла, равное 39.2, получаем прогноз его максимума как $W_M = 103 \pm 14$, подтверждающий опубликованный в [73]. Заметим, что знак «минус» перед квадратичным членом в формуле 3.9 означает, что функция ограничена сверху и не может быть сколь угодно большой. Таким образом, значения чисел Вольфа в максимумах циклов имеют верхний предел.

Доверительный интервал для спрогнозированного значения $W_M = 103 \pm 14$ получен с использованием классического подхода [1], как в большинстве современных исследований. Однако, заметим здесь, что поскольку мы имеем дело с задачей экстраполяции, оценки надежности получаемых значений следует проводить с использованием т.н. «интервала прогноза», равного квадратному

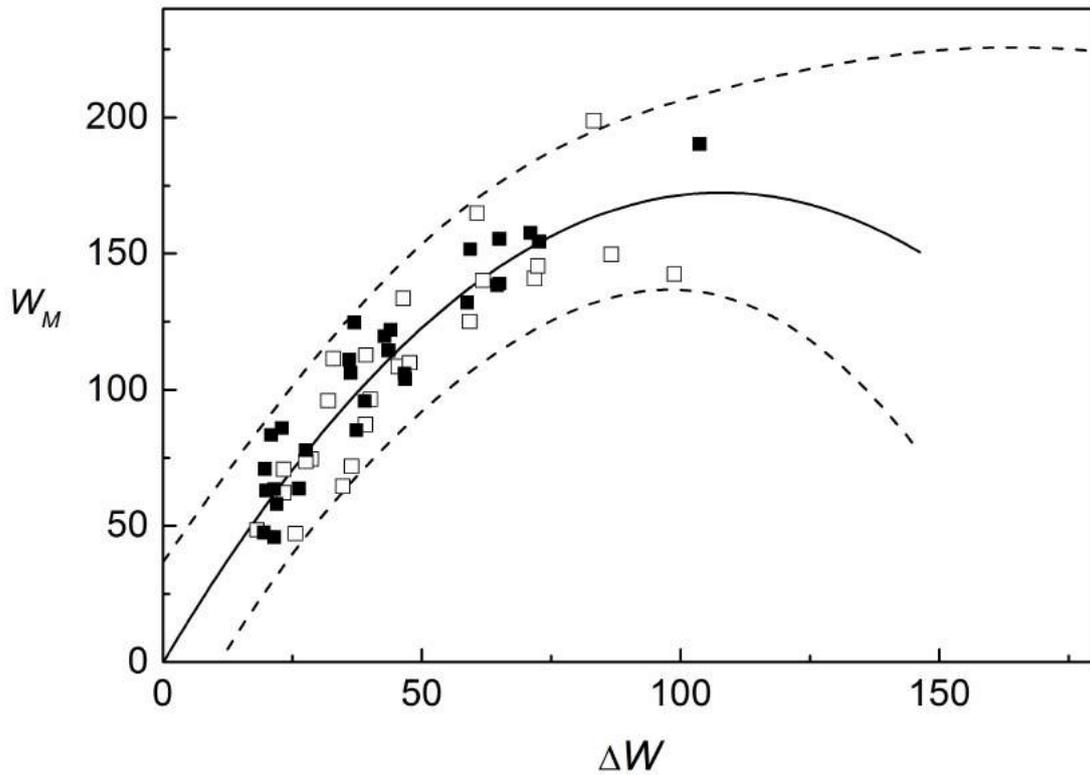


Рис. 3.8: Зависимость $W_M = f(\Delta W_M)$ при обычном подсчете среднемесячных – с января по декабрь (черные квадраты) и при сдвиге на полгода – с июля по июнь следующего года (светлые квадраты). Пунктир – доверительные интервалы на 95%-м уровне достоверности.

корню из суммы квадратов доверительного интервала и среднеквадратического отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой. Полученное значение, умноженное на два, дает оценку на уровне достоверности 95%. Прогнозируемая таким образом высота 24 цикла составляет $P(72 < W_M < 132) = 0.95$. Наблюдаемое в дальнейшем значение максимума $W_M = 78.9$ не противоречит этой оценке. Таким образом, прогнозирование с помощью модифицированного правила Вальдмайера было достаточно успешным, несмотря на то, что 24-й цикл активности вел себя необычно [77].

Максимальным значением на 95% уровне достоверности является $W_M =$

225. Это и есть оценка предельной величины 11-летнего цикла. Верхние черный и белый квадраты на рисунке 3.8 – 19-й цикл, самый большой за историю 400-летних наблюдений СА. Поэтому, заключение авторов [89] о его рекордной величине на временах порядка Голоцена как будто бы подтверждается, хотя по [97] в истории на временах порядка тысячелетий было несколько эпизодов столь же высокого уровня СА.

В работе [75] оценка максимального значения чисел Вольфа с использованием Модифицированного правила Вальдмайера $W_M = 225$ была в целом подтверждена и с использованием других подходов. Было получено $W_M = 230 - 240$.

3.3 Выводы

Сформулировано модифицированное правило Вальдмайера.

С физической точки зрения, полученные соотношения 3.4-3.6 означают, что существует предиктор – скорость нарастания пятенного магнитного потока в цикле, который определяет величину максимума цикла. Чем больших величин достигнет эта скорость на ветви роста, тем выше будет максимум. Эту (нелинейную) закономерность мы и назвали модифицированным правилом Вальдмайера (с использованием очевидного условия прохождения аппроксимирующей кривой через начало координат). По вероятной величине максимума можно получить и вероятное изменение этой величины после максимума.

С помощью классических статистических методов [1] получен прогноз максимума среднегодового числа Вольфа в 24-м цикле по скорости нарастания активности на ветви роста $W_M = 103 \pm 14$. В дальнейшем прогноз уточнен: $P(72 < W_M < 132) = 0.95$.

Предложенный метод на основе модифицированного правила Вальдмайера является методом диагностики цикла, а не прогноза в точном значении этого

слова. Он позволяет производить оценки, когда цикл уже развивается. Однако это не умаляет его значимости как в практическом, так и в фундаментальном аспектах.

С 1 июля 2015 года изменилась методика подсчета чисел солнечных пятен, ежегодный индекс W_{2015} не был посчитан. Однако, согласно базе данных Королевской обсерватории Бельгии $W_{2014} = 78.9$, что вполне укладывается в наш прогноз.

С помощью модифицированного правила Вальдмайера оценено предельное максимальное значение индекса чисел Вольфа на длительной временной шкале на 95%-м уровне достоверности (рис. 3.7) $W_{EXTR} = 225$. Оценка максимальной высоты цикла на временах порядка Голоцена (10^4 лет), произведенная с помощью других различных подходов в [75], качественно подтвердила полученный результат: $W_{EXTR} = 230 - 240$ единиц числа Вольфа (в «старой» системе).

4 Радиоуглерод и глобальные минимумы солнечной активности

4.1 Введение

4.1.1 Глобальные минимумы СА

Прямые солнечные наблюдения с 1610 года показывают большую изменчивость среднего уровня активности Солнца - от чрезвычайно спокойного минимума Маундера до эпизода усиленной активности с середины 20-го века, называемого Современным Максимумом. Американский астроном Эдди по восстановленному ряду данных солнечной активности выделил десять глобальных минимумов и восемь максимумов солнечной активности за последние 7000 лет [36]. Ближайшие к современной эпохе пять глобальных минимумов солнечной активности: минимум Оорта (1010 – 1050), минимум Вольфа (1280

– 1340), минимум Шперера (1415 – 1535), минимум Маундера (1645-1715) и минимум Дальтона (1790 – 1830). Минимумы Оорта, Шперера и Вольфа были обнаружены по радиоуглеродным данным в только в 20-м веке. Пожалуй, самым известным из всех минимумов солнечной активности является минимум Маундера, для исследования которого доступны не только косвенные солнечные данные, но и первые телескопические наблюдения. Минимум Маундера представляет собой типичный пример так называемых грандиозных минимумов солнечной активности [87, 63], когда на длительных промежутках времени солнечные пятна почти полностью отсутствуют или они крайне редки. Своё название минимум активности получил по имени английского исследователя Солнца Эдварда Уолтера Маундера, который описал его. Установлено, что 11-летние циклы в течение Маундеровского минимума не прекращались, а лишь сильно уменьшились по амплитуде. Следует отметить, что солнечные пятна в те времена не наблюдались на регулярной основе, поэтому данные по числам Вольфа пришлось восстанавливать из разрозненных источников. Необычный уровень активности затронул и другие явления – количество полярных сияний за этот период очень мало, т.е. имела место очень низкая геомагнитная активность [14]. Дополнительные сведения дают наблюдения солнечных пятен, видимых невооруженным глазом, а также описание полных солнечных затмений, зафиксированных в китайских летописях [74, 69]. Еще одно косвенное свидетельство – зафиксированный минимум в концентрации радиоуглерода ¹⁴ в датированных образцах древесины. Следующим грандиозным минимумом активности после минимума Маундера был минимум Дальтона, на протяжении которого наблюдалась пониженная активность, но 11-летняя периодичность сохранялась [50] (рис. 4.1).

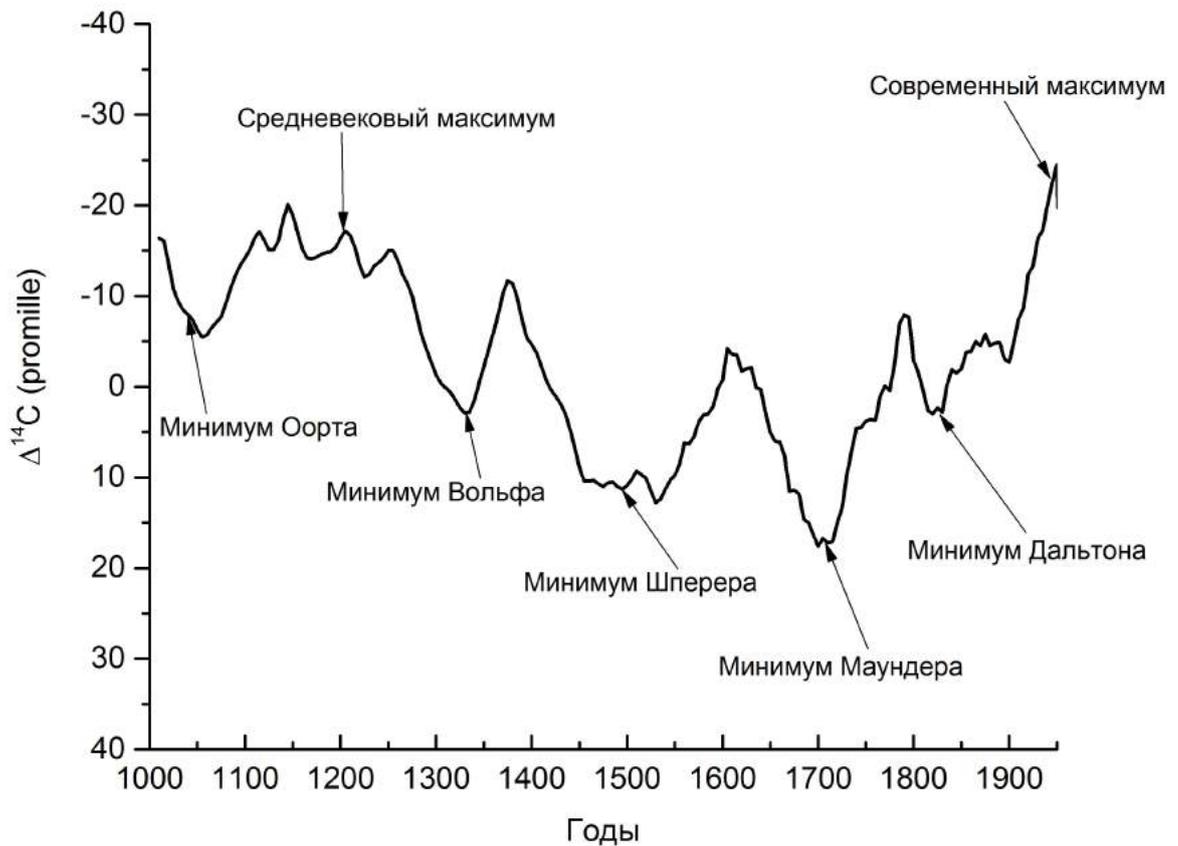


Рис. 4.1: Изменения в относительной концентрации ^{14}C в атмосфере Земли в качестве косвенных данных о солнечной активности.

4.1.2 Связь СА и содержания ^{14}C в атмосфере Земли

Данные по вариациям содержания космогенного изотопа ^{14}C в кольцах деревьев и в атмосфере Земли ($\Delta^{14}\text{C}$) дают нам возможность изучать поведение солнечной активности (СА) в прошлые века и тысячелетия. Изменения СА во времени приводят к изменению параметров межпланетного магнитного поля и, как следствие, к вариациям потока галактических космических лучей (ГКЛ), под действием которых в атмосфере Земли образуется изотоп ^{14}C .

Магнитное поле Солнца изменяется во время солнечного цикла – в максимуме цикла поле сильное, в минимуме слабое. Земля находится внутри

магнитосферы Солнца, и поле Солнца влияет на отклонение галактических космических лучей (ГКЛ), и соответственно на их проникновение внутрь магнитосферы Солнца, в том числе и на Землю. В периоды максимальной СА интенсивность космических лучей уменьшается, соответственно, должно образовываться меньше ^{14}C .

Радиоуглерод ^{14}C образуется при взаимодействии вторичных нейтронов космического излучения (возникающих при расщеплении атомных ядер в верхних слоях атмосферы быстрыми первичными протонами) с ядрами азота в верхних слоях атмосферы по реакции $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$. Основная химическая форма нахождения ^{14}C в атмосфере — радиоактивный углекислый газ $^{14}\text{CO}_2$, так как образующийся атом ^{14}C довольно быстро окисляется (сначала до ^{14}CO , а затем до $^{14}\text{CO}_2$). ^{14}C , окисленный в стратосфере до $^{14}\text{CO}_2$, проникает в тропосферу и в результате перемешивания воздушных масс распространяется по всему земному шару, включаясь в природный круговорот углерода [8, 32, 2]. Примерно в течение 10 – 15 лет радиоактивный углекислый газ перемешивается с основной массой углекислого газа в атмосфере. В химических реакциях с участием углерода в биосфере не происходит разделения стабильного ^{12}C и радиоактивного ^{14}C изотопов углерода. Из атмосферы ^{14}C переходит в биосферу, захватываясь в виде CO_2 растениями в ходе фотосинтеза (связываясь в органических веществах, он попадает в клетки растений, в том числе и в кольца деревьев), при этом изотопное фракционирование происходит в течение формирования древесины. Растительный мир поглощает CO_2 из атмосферы, а животный мир питается растительностью. В биосфере углеродный атом удерживается в среднем около сорока лет [18]. Оттуда он может вернуться опять в атмосферу или уйти в глубинные слои океана за счет поверхностного (речного) и подземного стока, где проводит тысячи лет. Какая-то (совсем малая) часть выводится из оборота практически безвозвратно — в осадочные породы.

Путешествуя по всем этим резервуарам, углерод распадается, поэтому в разных резервуарах его относительное содержание будет различным.

Есть еще одна причина вариации радиоуглерода в атмосфере – антропогенное воздействие. В результате антропогенных воздействий произошло стремительное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, с примерно 250 ppm до 360 ppm за 40 лет, так называемый Зюсс эффект, который происходит за счет примеси больших количеств CO_2 , выделяемого из ископаемого топлива, которое не содержит $^{14}\text{CO}_2$. Это приводит к смещению изотопного отношения CO_2 в атмосфере в сторону легких изотопов (например, [91, 30, 57, 27]). Антропогенные эффекты значительно усложняют радиоуглеродные данные за последние десятилетия.

Скорость производства космогенных радионуклидов, в том числе ^{14}C , изменяется и в зависимости от интенсивности геомагнитного поля, то есть скорость генерации ^{14}C зависит от изменений геомагнитного дипольного момента M [31].

4.1.3 Радиоуглеродный метод

Обменная система углерода охватывает атмосферу, биосферу, гумус, поверхностный и глубинный слои океана. В процессе фотосинтеза ^{14}C усваивается растениями и, таким образом, в годичных кольцах деревьев содержится информация о концентрации изотопа ^{14}C . По количеству ^{14}C , присутствующему в настоящее время в останках организмов, растений или иных объектах органического происхождения, можно определить момент прекращения углеродного обмена с атмосферой. Концентрацию ^{14}C в прошлые столетия устанавливают на основе измерений активности образцов известного возраста. Наилучшим материалом для определения изменения атмосферной концентрации ^{14}C в прошлом является целлюлоза колец деревьев. Каждое кольцо дерева содержит данные

о концентрации атмосферного ^{14}C в год его формирования. Количество ^{14}C определяется параметрами обмена земного углеродного цикла, включающего атмосферу, гидросферу, биосферу и осадочные породы.

Данные, содержащиеся в кольцах деревьев, позволяют получать информацию о многих физических процессах на длительной временной шкале: сотни, тысячи, миллионы лет. Радиоуглерод обычно измеряется в кольцах деревьев, что делает возможным абсолютное датирование образцов с помощью дендрохронологии. ^{14}C измеряется независимо от образца, затем образец корректируется по возрасту. После поправки на изотопное фракционирование образца, значение $\Delta^{14}\text{C}$ рассчитывается по методике, описанной подробно в [90].

Основной принцип радиоуглеродного метода датировки образцов состоит в том, что обмен ^{14}C между живыми организмами, растительностью и атмосферой прекращается после их смерти, и концентрация ^{14}C уменьшается путем радиоактивного распада с периодом полураспада ~ 5730 лет. Полагая, что концентрация ^{14}C в атмосфере постоянная, образцы спилов дерева можно датировать по уровню активности радиоуглерода на момент их измерения [18, 56].

Атмосферная концентрация ($\Delta^{14}\text{C}$) характеризует отклонение отношения концентрации изотопа ^{14}C к концентрации изотопа ^{12}C в атмосфере относительно стандарта на год образования кольца древесины. Значение $\Delta^{14}\text{C}$ определяется на основе измеренного содержания изотопов в древесном кольце известного возраста с поправкой на изотопное фракционирование по хорошо известной методике [8].

Данные по относительному содержанию космогенного изотопа ^{14}C в земной атмосфере в прошлые столетия, полученные на основании измерения содержания этого изотопа в кольцах деревьев известного возраста, являются наиболее информативными для реконструкции интенсивности галактических

космических лучей (ГКЛ) и солнечной активности (СА) в прошлом.

4.1.4 Пятирезервуарная модель

Концентрация ^{14}C в атмосфере зависит не только от $^{14}\text{CO}_2$, образуемого в атмосфере Земли, но и от его обмена между различными геохимическими резервуарами углеродного цикла. Основное количество ^{14}C находится в виде двуокиси углерода, и в результате круговорота углекислого газа перераспределяется в биосферу, гумус, поверхностный и глубокий слои океана (рис. 4.2).

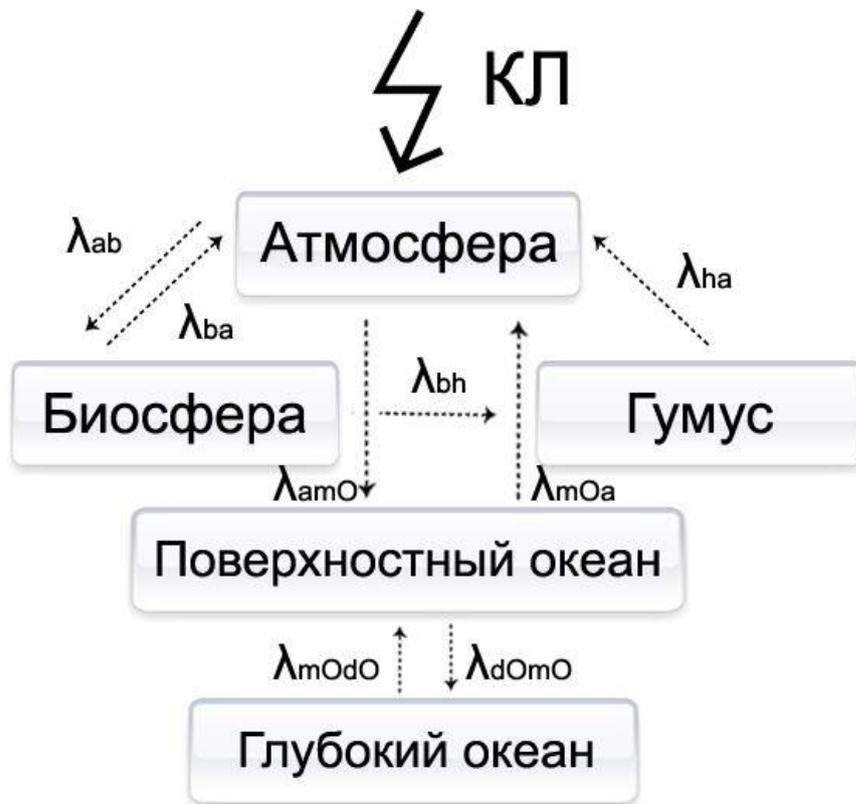


Рис. 4.2: Схема пятирезервуарной модели.

Пятирезервуарная модель для расчета содержания изотопа ^{14}C в различных земных резервуарах представляет собой систему дифференциальных уравнений (например, [35]):

$$\frac{dN_a}{dt} = Q(t) - (\lambda + \lambda_{ab} + \lambda_{amO})N_a + \lambda_{ba}N_b + \lambda_{ha}N_h + \lambda_{mOa}N_{mO} \quad (4.1)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_{ab}N_a - (\lambda + \lambda_{ba} + \lambda_{bh})N_b \quad (4.2)$$

$$\frac{dN_h}{dt} = \lambda_{bh}N_b - (\lambda + \lambda_{ha})N_h \quad (4.3)$$

$$\frac{dN_{mO}}{dt} = \lambda_{amO}N_a - (\lambda + \lambda_{mOa} + \lambda_{mOdO})N_{mO} + \lambda_{dOmO}N_{dO} \quad (4.4)$$

$$\frac{dN_{dO}}{dt} = \lambda_{mOdO}N_{mO} - (\lambda + \lambda_{dOmO})N_{dO} \quad (4.5)$$

где $N_a, N_b, N_h, N_{mO}, N_{dO}$ – содержание изотопа ^{14}C в атмосфере, биосфере, гумусе, поверхностном и глубинном слоях океана, соответственно; t – время; $\lambda = 1.21 \cdot 10^{-4} \text{год}^{-1}$ – скорость распада ^{14}C ; $\lambda_{ab}, \lambda_{amO}, \lambda_{ba}, \lambda_{ha}, \lambda_{mOa}, \lambda_{bh}, \lambda_{mOdO}, \lambda_{dOmO}$ – скорости переходов изотопа ^{14}C из атмосферы в биосферу, из атмосферы в верхний слой океана, из биосферы в атмосферу, из гумуса в атмосферу, из верхнего слоя океана в атмосферу, из биосферы в гумус, из верхнего слоя океана в глубинный и из глубинного слоя океана в верхний, соответственно; $Q(t)$ – скорость генерации ^{14}C в земной атмосфере. Следует отметить, если функции $Q, N_a, N_b, N_h, N_{mO}, N_{dO}$ удовлетворяют системе уравнений (1-5), то функции $xQ, xN_a, xN_b, xN_h, xN_{mO}, xN_{dO}$ (где x – постоянный множитель) также будут удовлетворять этой системе уравнений. Поэтому мы будем рассматривать относительные изменения $Q(t)$.

4.2 Влияние климатических факторов на реконструкцию скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C и солнечная активность в прошлые эпохи

4.2.1 Цели и задачи работы

Наибольший для исследования интерес представляет промежуток времени с конца 14 и по начало 19 века, так как на этот временной промежуток пришлось три глобальных минимума СА – минимум Шпёрера, минимум Маундера и минимум Дальтона, а также Малый Ледниковый период, в течение которого происходили заметные изменения глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере Земли.

В работе [48] приведены результаты реконструкции интенсивности ГКЛ за последние 8 тысяч лет по данным изменения концентрации радиоуглерода в кольцах деревьев и, в частности, показано, что интенсивность космических лучей во время минимума солнечной активности Дальтона была существенно меньше, чем во время минимумов Шперера и Маундера. В более поздних работах производится учет влияния геомагнитного поля на проникновение частиц ГКЛ в земную атмосферу (см., например, [95]), где авторы также получают аномально высокие значения скорости генерации ^{14}C во время минимумов Шпёрера и Маундера. Кроме этого, в работе [95] получены чрезвычайно низкие реконструируемые значения чисел солнечных пятен в эти периоды (вплоть до отрицательных). С другой стороны, авторы работы [104] на основе изучения архивных данных (суммы годовых значений чисел Вольфа) пришли к выводу, что активность Солнца во время минимума Маундера была сравнима по глубине с активностью во время минимума Дальтона. Возможными причинами завышения реконструируемых значений интенсивности ГКЛ около орбиты Земли (и занижения оцениваемой активности Солнца) являются:

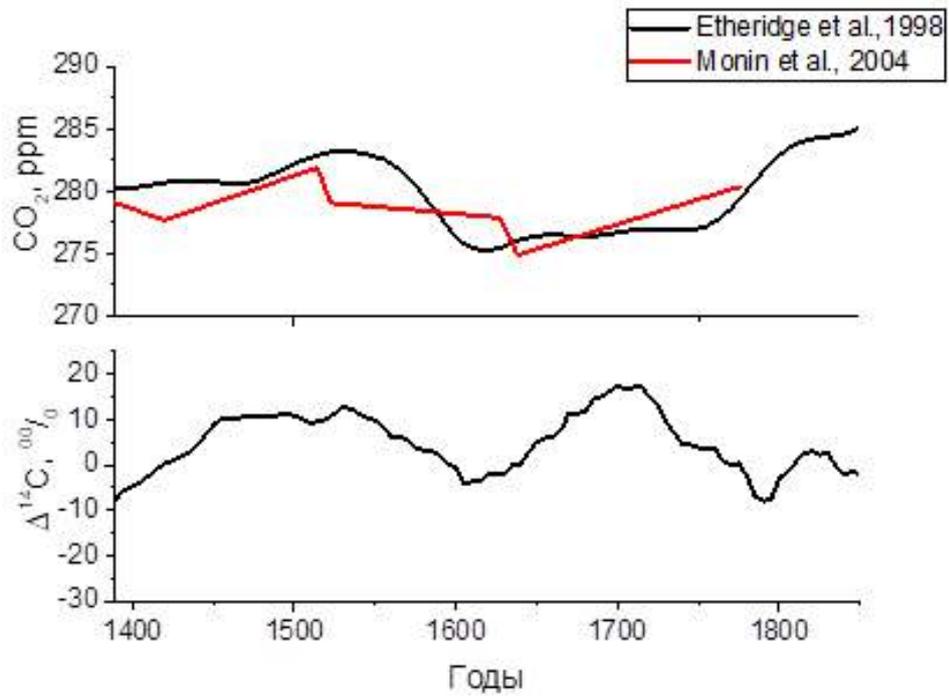
1. Пренебрежение влиянием климатических изменений на результаты реконструкции. Необходимость учета этого влияния была отмечена достаточно давно [9]. Причина состоит в том, что скорости перехода ^{14}C между природными резервуарами зависят от температуры и, следовательно, от изменения климата, и могут приводить к перераспределению углекислого газа (CO_2) между рассматриваемыми резервуарами. Так, например, при потеплении в водном резервуаре происходит уменьшение концентрации растворенного в ней CO_2 , а при охлаждении воды растворимость CO_2 увеличивается.
2. В ряде работ (например, [84]) в качестве данных о содержании CO_2 использовались данные из работы [65], которые являются чрезмерно сглаженными на рассматриваемом промежутке времени, в связи с чем содержание изотопа ^{14}C в атмосфере получается заниженным (рис 4.3).

Таким образом, климатические изменения могут приводить к перераспределению углерода между обменными природными резервуарами, что находит отражение в радиоуглеродных данных и приводят к искажению информации об активности Солнца, поэтому климатические изменения необходимо учитывать на соответствующих промежутках времени.

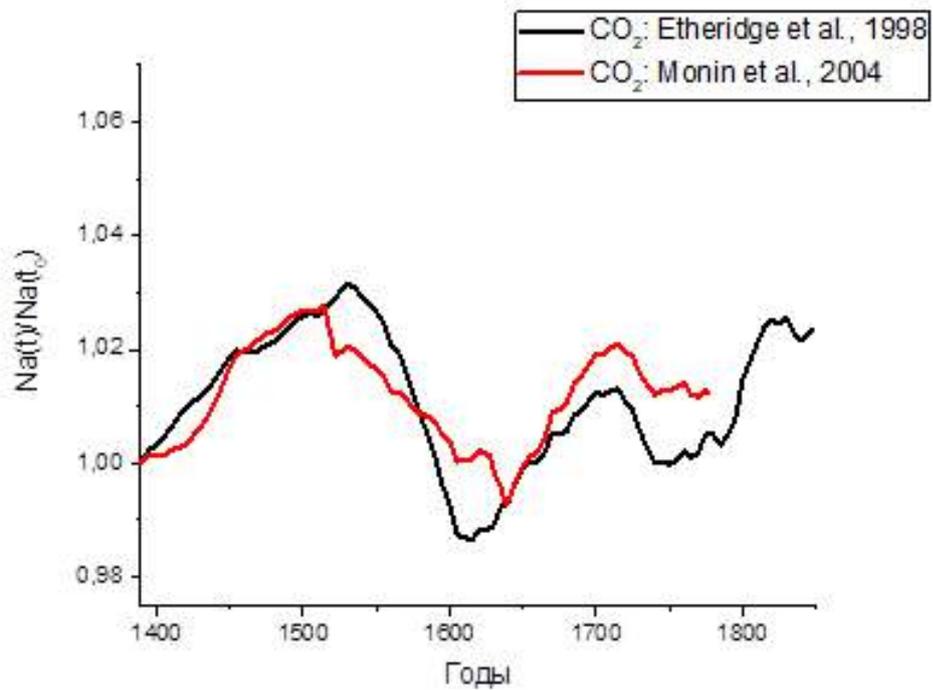
4.2.2 Расчет скорости генерации ^{14}C в атмосфере Земли

Скорость генерации ^{14}C рассчитывалась при использовании пятирезервуарной модели, описанной выше. В работе [54] в качестве источника данных о $\Delta^{14}\text{C}$ была использована реконструкция Intcal09, созданная в результате сотрудничества 21 лаборатории, которые провели систематические измерения датированных образцов со всего мира [82].

Рассмотрим реконструкцию скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C на основе решения системы дифференциальных уравнений 4.1-4.5.



a)



b)

Рис. 4.3: а – сравнение данных о содержании CO₂ [38] и [65], б – кривые содержания изотопа ¹⁴C в атмосфере, рассчитанные с помощью данных о содержании CO₂ из работ [38] и [65].

Как известно, во времена Малого Ледникового Периода изменение температуры происходило не только в атмосфере, но и в океане. В работе [86] показано, что в середине второго тысячелетия нашей эры наблюдалось резкое уменьшение температуры поверхностного слоя воды вблизи Антарктиды, совпадающего по времени с Малым Ледниковым Периодом. Изменения температуры как в атмосфере, так и в океане должны приводить к перераспределению ^{14}C между этими резервуарами. В работе [52] показано, что изменения температуры могут приводить к вариациям содержания ^{14}C в атмосфере, сравнимым с результатами влияния вариаций интенсивности ГКЛ на относительное содержание ^{14}C ($\Delta^{14}\text{C}$).

Можно представить скорость перехода из поверхностного слоя океана в атмосферу в виде температурной зависимости, предполагая, что на этом временном интервале изменение температуры происходило в верхнем слое океана, а в глубинном температура оставалась постоянной [53]:

$$\lambda_{mOa} = (1 + k\Delta T)\lambda_{mOa}^0 \quad (4.6)$$

В качестве температурных рядов были выбраны три реконструкции глобальной температуры приземного слоя атмосферы – [61, 28, 64] (рис. 4.4), описывающих три варианта поведения температурной кривой на рассматриваемом интервале. В работе [52] были приведены обоснования выбора величины температурного коэффициента k , было показано, что он должен быть $\sim 0.1\text{K}^{-1}$. При выборе значений k надо учитывалось, что:

1. Реконструкции вариаций глобальной температуры воздуха во втором тысячелетии н.э. дают её изменение меньше, чем на 1 градус, в то время как вариация температуры поверхностного слоя океана может достигать нескольких (2–3) градусов [86].
2. Полный поток углекислого газа через поверхность океана пропорционален

разности парциальных давлений в поверхностном слое воды и в атмосфере, и увеличение температуры поверхностного слоя воды на один градус приводит к увеличению парциального давления растворенного в воде углекислого газа приблизительно на 4% [4, 92, 60]. Поэтому при изменении температуры воды на 2–3 градуса поток углекислого газа через поверхность океана может изменяться на $\approx 10\%$. Так как в наших расчетах коэффициент k связывает скорость λ_{mOa} не с температурой воды, а с температурой атмосферы (вариации которой меньше 1 градуса), то значение k может достигать величины $\approx 0.1K^{-1}$. При этом, учитывая [86], мы рассматриваем синхронное изменение этих температур.

Наблюдаемое уменьшение концентрации CO_2 в атмосфере Земли во время Малого Ледникового Периода может быть объяснено перераспределением углерода между океаном и атмосферой при $k \sim 0.1K^{-1}$.

Зависимость $N_a(t)$ мы будем определять из условия:

$$\frac{{}^{14}C_a(t)/{}^{12}C_a(t) - ({}^{14}C/{}^{12}C)_{st}}{({}^{14}C/{}^{12}C)_{st}} = \Delta^{14}C(t)/100 \quad (4.7)$$

где $\Delta^{14}C(t)$ - отклонение относительного содержания изотопа ${}^{14}C$ в атмосфере от стандартного значения $({}^{14}C/{}^{12}C)_{st}$ в процентах, данные реконструкции IntCal09 [83] $(({}^{14}C/{}^{12}C)_{st}) = 1.176 \times 10^{-12}$ [84])(рис 4.4), ${}^{14}C_a$ и ${}^{12}C_a$ – концентрации изотопов ${}^{14}C$ и ${}^{12}C$ в атмосфере (в составе газа CO_2).

Для изучения содержания радиоуглерода в атмосфере $N_a(t)$, учитывая, что концентрация изотопа ${}^{12}C$, содержащегося в углекислом газе, пропорциональна концентрации этого газа, концентрация изотопа ${}^{14}C$ в атмосфере пропорциональна его полному содержанию в атмосфере, из 4.7 получаем выражение:

$$\frac{N_a(t)}{N_a(t_0)} = \frac{CO_2(t)}{CO_2(t_0)} (1 + \Delta^{14}C(t)/100) / (1 + \Delta^{14}C(t_0)/100) \quad (4.8)$$

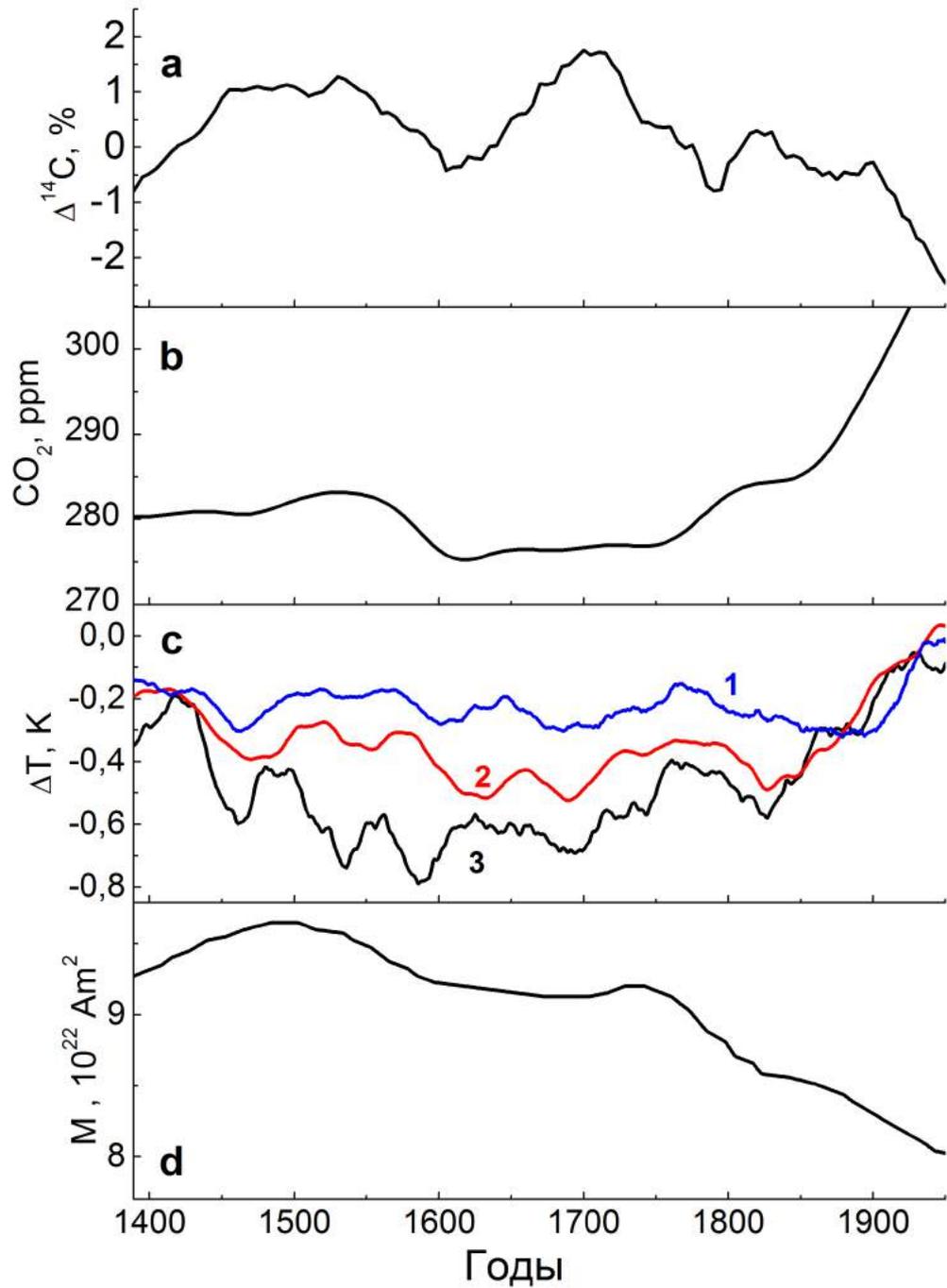


Рис. 4.4: а – $\Delta^{14}\text{C}$, IntCal09 [83], б – концентрация углекислого газа в атмосфере [38], в – температурные реконструкции: 1– Mann et al., 1999 [61], 2 – Crowley et al., 2000 [28], 3 – Moberg et al., 2005 [64], д – дипольный магнитный момент [95].

где t_0 – время, с которого производится интегрирование системы уравнений пятирезервуарной модели, $\text{CO}_2(t)$ – концентрация углекислого газа в атмосфере,

взяты из работы [38] (рис 4.4).

Используя результаты работы [95], будем полагать что во время минимума Дальтона числа Вольфа уменьшались до значения $\sim 1.96 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, и будем выбирать пропорциональные начальным условиям (Таблица 1) из работы [35], в которой эти значения рассматривались как равновесные, с коэффициентами пропорциональности (Таблица 2), подобранными таким образом, чтобы значение скорости генерации ^{14}C в минимуме Дальтона совпадало с соответствующим значением в работе [95] ($Q_{Dalton} \sim 1.959 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$):

Таблица 1: Начальные условия.

$N_a^0(t_0) = 7.52 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$	$\lambda_{ab} = 1/30 \text{ год}^{-1}$	$\lambda_{amO} = 1/6.84 \text{ год}^{-1}$
$N_b(t_0) = 3.38 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$	$\lambda_{ba} = 1/30.6 \text{ год}^{-1}$	$\lambda_{bh} = 1/30.6 \text{ год}^{-1}$
$N_h(t_0) = 1.25 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$	$\lambda_{ha} = 1/101.2 \text{ год}^{-1}$	
$N_{mO}(t_0) = 8.77 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$	$\lambda_{mOa}^0 = 1/8.5 \text{ год}^{-1}$	$\lambda_{mOdO} = 1/3 \text{ год}^{-1}$
$N_{dO}(t_0) = 5.51 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$	$\lambda_{dOmO} = 1/193 \text{ год}^{-1}$	

Таблица 2: Коэффициенты пропорциональности x начальных условий (для разных температурных реконструкций и для разных температурных коэффициентов k), см. [53].

Mann et al., 1999 [61]	$k=0.1$	$x=0.582$
Crowley et al., 2000 [28]	$k=0.1$	$x=0.543$
Moberg et al., 2005 [64]	$k=0.1$	$x=0.531$

В результате расчетов были получены скорости генерации ^{14}C в атмосфере для разных температурных коэффициентов, с использованием различных температурных реконструкций (рис 4.5). Соотношение максимумов реконструированной скорости генерации изотопа ^{14}C зависит от выбранной

температурной реконструкции. Значения $Q(t)$ при $k=0.1$ в случае использования реконструкции Mann et al., 1999 в минимуме Шперера и в минимуме Дальтона сравнимы, в минимуме Маундера – несколько меньше; в случае использования температурной реконструкции Crowley et al., 2000 – значения $Q(t)$ во всех трех глобальных минимумах активности сравнимы; при использовании температурной реконструкции Moberg et al., 2005 – значения $Q(t)$ в минимуме Маундера сравнимы со значениями в минимуме Дальтона, а в минимуме Шперера значения выше. Результаты расчетов в пренебрежении вариациями температуры и концентрации CO_2 представлены на рисунке 4.6, который демонстрирует, что пренебрежение климатическим фактором завышает восстановленные значения $Q(t)$ для минимума Маундера по сравнению со значениями во время минимума Дальтона. Для минимума Шперера картина более противоречива – видна более сильная зависимость от выбранной температурной реконструкции. Таким образом, учет климатических факторов приводит к тому, что соотношение максимумов скорости генерации изотопа ^{14}C (соответствующих минимумам солнечной активности) будет изменяться, и это должно отразиться в реконструированных значениях параметров солнечной активности. Полученные в [95] экстремально большие значения скорости генерации изотопа ^{14}C во время минимумов Маундера и Шперера могут быть связаны с пренебрежением влияния вариаций климата на углеродную обменную систему, что должно приводить к занижению показателей активности Солнца в данные эпохи.

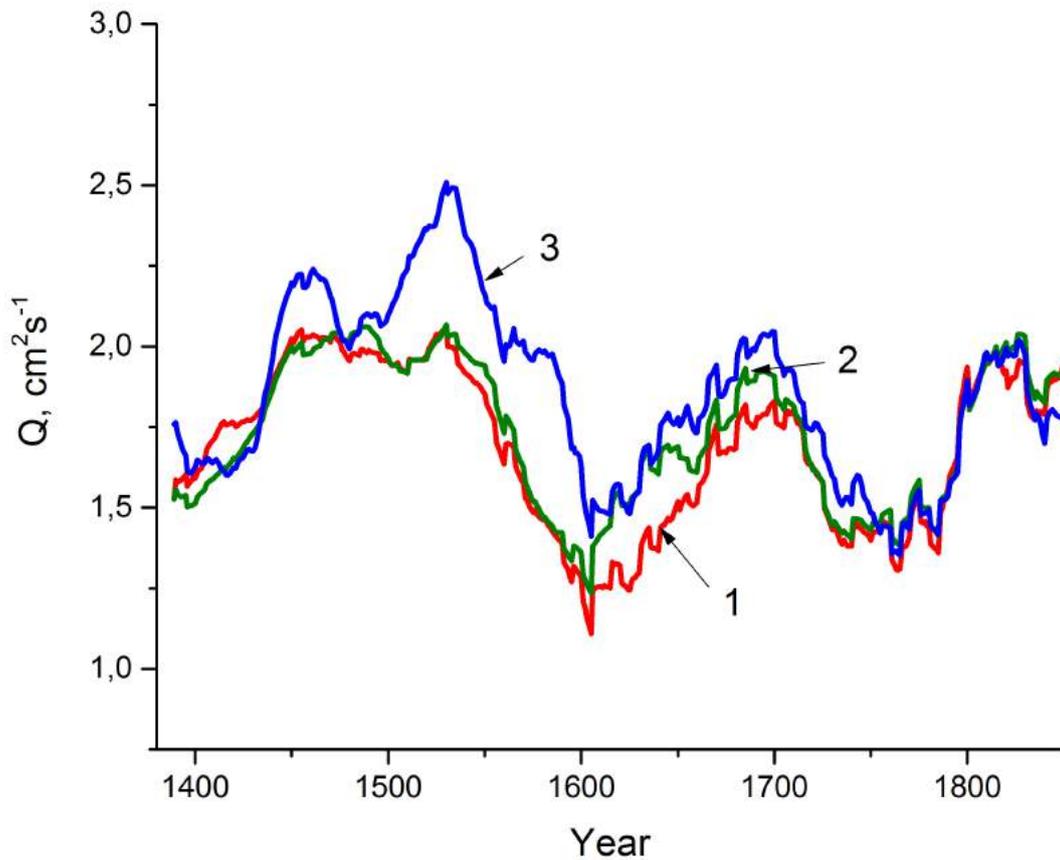


Рис. 4.5: Значения скорости генерации ^{14}C в атмосфере, рассчитанные при использовании: 1 – реконструкции Mann et al., 1999 [61], 2 - реконструкции Crowley et al., 2000 [28], 3 - реконструкции Moberg et al., 2005 [64].

4.2.3 Реконструкция гелиосферного модуляционного потенциала и чисел Вольфа

Так называемый модуляционный потенциал ($\phi(t)$) – параметр, характеризующий изменение интенсивности потока различных видов частиц космических лучей в процессе проникновения их вглубь гелиосферы, который изменяется во времени в результате изменения межпланетного магнитного поля.

Для его реконструкции мы будем использовать полученные результаты скоростей генерации $Q(t)$.

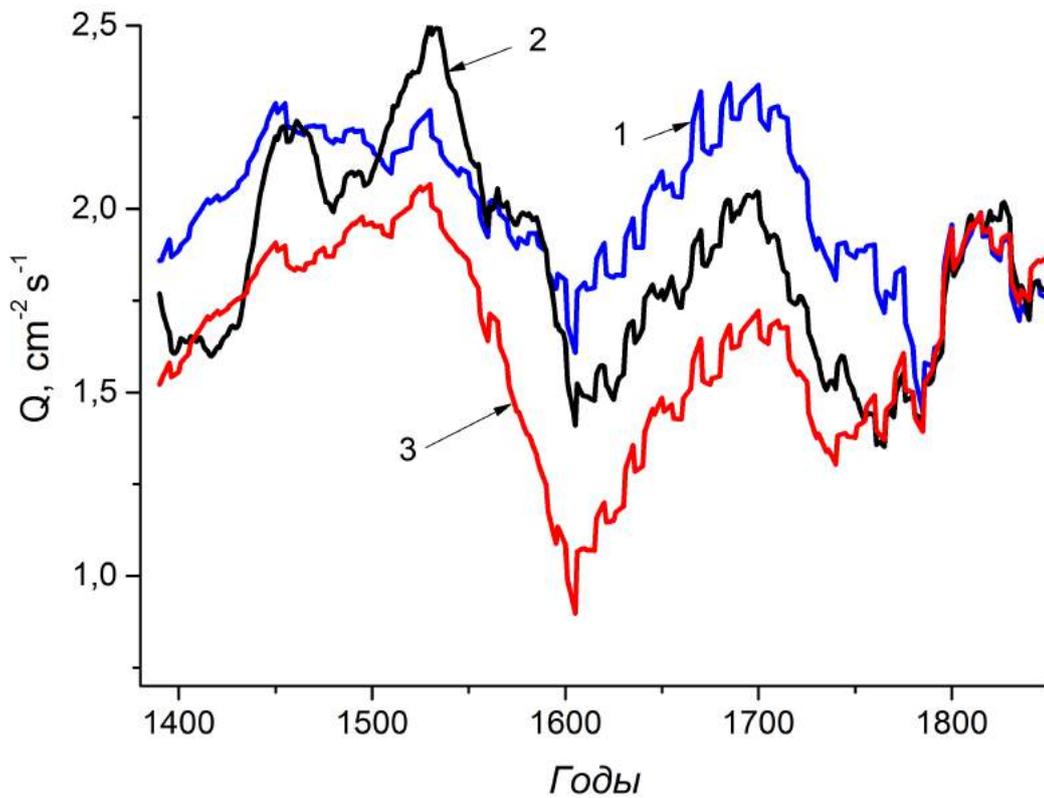


Рис. 4.6: Варианты расчетов $Q(t)$: 1 - без учета климатических эффектов (синяя кривая); 2 - с учетом климатических эффектов на основе данных из температурной реконструкции Moberg et al., 2005, при $k=0.1K^{-1}$ (черная кривая); 3 - в пренебрежении вариациями температуры, но с учетом изменения концентрации CO_2 (красная кривая).

Учет влияния геомагнитного поля, изменяющегося во времени, мы провели согласно работам [49, 95] и перешли от реконструированных значений $Q(t)$ к модуляционному потенциалу $\phi(t)$, который определяет модуляцию интенсивности ГКЛ при их распространении в гелиосфере к орбите Земли.

Расчеты проводились согласно формулам, писанным в работе [49]. Глобальная скорость генерации радиоуглерода Q определяется как

$$Q(t) = \sum_i \int_0^{\infty} Y_i(E) J_i(E, t) (1 - f(E)) dE \quad (4.9)$$

где $f(E)$ – функция, учитывающая пространственное среднее и эффект геомагнитного обрезания.

$$f = \begin{cases} \sqrt{1 - \sqrt{P(E)/(1.9 \times M)}} & \text{если } P \leq 1.9 \times M \\ 0 & \text{если } P > 1.9 \times M \end{cases} \quad (4.10)$$

где M – дипольный момент в единицах [10^{22} Am^2].

Энергетический спектр частиц типа i определяется как локальный межзвездный спектр (LIS)

$$J_{LIS}(E) = \frac{1.9 \times 10^4 P(E)^{-2.78}}{1 + 0.4866 \times P(E)^{-2.51}} \quad (4.11)$$

$$\Phi_i = (eZ_i/A_i)\phi \quad (4.12)$$

где индекс i отвечает типу частицы, ϕ – значение модуляционного потенциала.

Жесткость геомагнитного обрезания рассчитывалась по формуле:

$$P(E) = \sqrt{E(E + 2E_r)} \quad (4.13)$$

где $E_r = 0,938 \text{ GeV/nucleon}$.

Более подробно расчеты, а также функции выхода протонов и альфа-частиц приведены в [49].

На рисунке 4.7 приведены результаты вычислений с учетом изменения концентрации углекислого газа при использовании трёх различных температурных реконструкций.

На приведенных рисунках видно, что минимальные значения модуляционного потенциала во время минимума Маундера (300-450 MV) могут быть сравнимы с минимальными значениями во время минимума Дальтона (350-380 MV). Подобные результаты получаются и для других температурных реконструкций. Поэтому нет оснований считать, что солнечная активность во

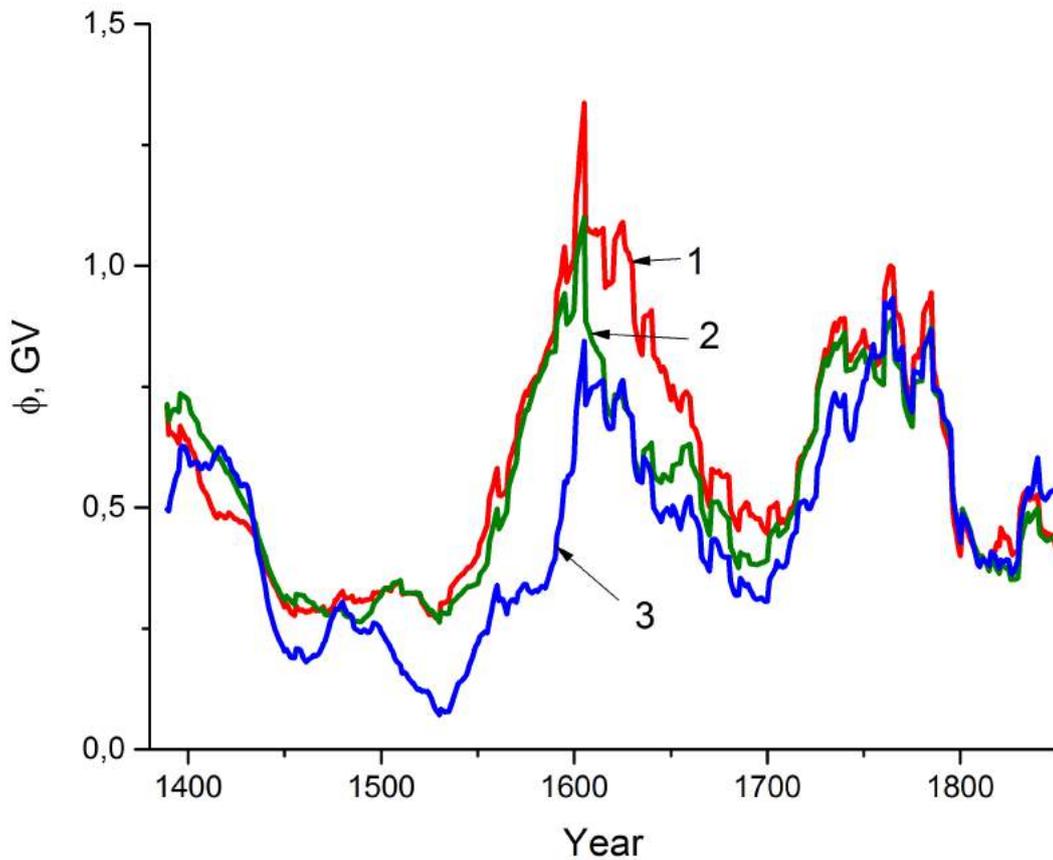


Рис. 4.7: Значения модуляционного потенциала, вычисленные при помощи разных температурных реконструкций: 1 – реконструкции Mann et al., 1999 [61], 2 - реконструкции Crowley et al., 2000 [28], 3 - реконструкции Moberg et al., 2005 [64].

время минимума Маундера была ниже, чем во время минимума Дальтона. Однако для минимума Шперера такое допущение возможно.

Для реконструкции чисел Вольфа на основе $\phi(t)$ использовалась линейная регрессия между расчетными значениями $\phi(t)$ и числами Вольфа, усредненными по 11-летнему циклу с начала 18 века и по начало 19-го [88, 89]. При этом, согласно [96], рассматривалась регрессия между этими величинами для фазы роста и фазы спада отдельно. Регрессионные соотношения приведены в таблице 3.

Таблица 3: Регрессионные соотношения между числами Вольфа и модуляционным потенциалом.

	Ветвь роста	Ветвь спада
Mann et al., 1999 [61]	$W = 83.64 \times \phi - 17.18$	$W = 123.52 \times \phi - 25.89$
Crowley et al., 2000 [28]	$W = 93.69 \times \phi - 22.8161$	$W = 152.52 \times \phi - 45.7$
Moberg et al., 2005 [64]	$W = 121.62 \times \phi - 26.98$	$W = 145.02 \times \phi - 41.35$

4.3 Выводы

В этой работе показано, что учет вариаций глобальной температуры и концентрации CO_2 может существенно влиять на результаты реконструкции скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C в земной атмосфере, и это обстоятельство тем более необходимо учитывать при реконструкции солнечной активности в прошлом из данных измерений концентрации ^{14}C . Показано, что учет земных климатических изменений приводит к тому, что во время минимумов Маундера и Шпёрера восстановленные значения скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C могут быть сравнимы со значениями во время минимума Дальтона, в то время как пренебрежение этим влиянием приводит к аномально большим значениям этой величины [95], и, как следствие, – к занижению оцениваемого уровня солнечной активности в данные временные интервалы. Похожие результаты были получены в работе [104].

На рисунке 4.8 видны все глобальные минимумы солнечной активности: минимумы Шперера, Маундера и Дальтона. Однако существует и ряд особенностей. Использование температурной реконструкции Манна и др. [61] для восстановления скорости генерации изотопа ^{14}C в земной атмосфере, гелиосферного модуляционного потенциала и, в конечном итоге, чисел Вольфа приводит к тому, что найденные значения чисел Вольфа для минимума Шперера могут быть

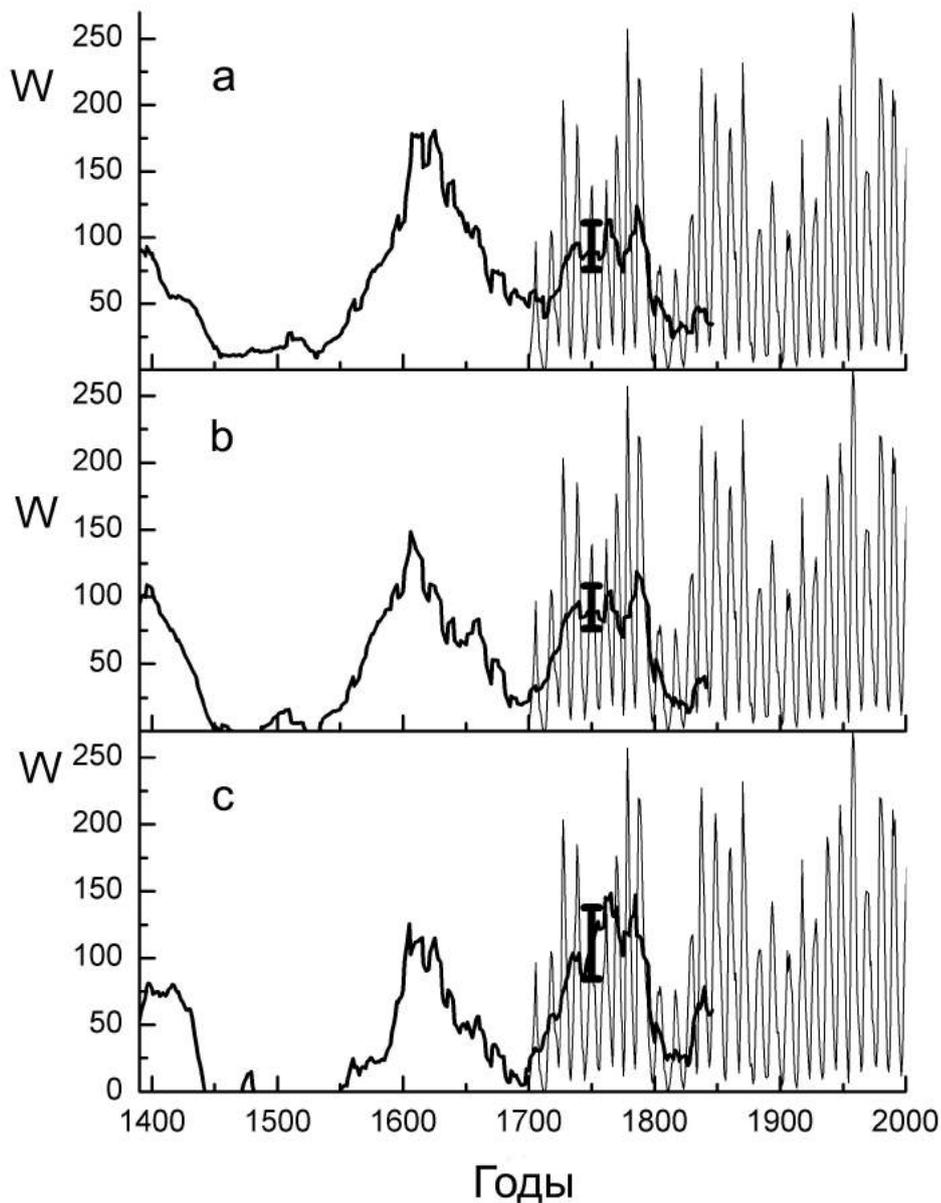


Рис. 4.8: а, b, с – измеренные (серая линия, <http://www.sidc.be/silso/datafiles>) и восстановленные значения чисел Вольфа с погрешностями реконструкций.

несколько меньше, чем для минимума Дальтона, а для минимума Маундера несколько выше. Использование температурной реконструкции Кроули и др [28] понижает восстановленные значения чисел Вольфа как для минимума Шпер-

ра, так и для минимума Маундера. Минимальные значения чисел Вольфа во время минимума Маундера становятся практически сравнимыми с минимальными значениями для минимума Дальтона [51]. Использование температурной реконструкции Моберга и др. [64] еще более понижает полученные значения чисел Вольфа для первых двух минимумов активности Солнца. Эти температурные реконструкции были выбраны на основании того, что реконструкция Манна и др.[61] показывает минимальное изменение температуры во время Малого ледникового периода, а реконструкция Моберга и др. [64] – наибольшее.

5 Заключение

5.1 Личный вклад автора

Автором были проведены расчеты, описанные в главах 1,2,3. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Автором была произведена работа по отбору и статистическому исследованию вспышечных событий (глава 2), а также написана программа для расчетов, используемых в главе 3. Автор участвовал в постановке задачи, анализе полученных результатов и их интерпретации.

5.2 Научная новизна

1. Получено модифицированное правило Вальдмайера, которое позволяет более точно и заблаговременно диагностировать величину максимума солнечного цикла с помощью параметра максимальной скорости изменения числа Вольфа.
2. Оценено максимальное значение индекса чисел Вольфа на уровне 3σ . Это оценка предельной величины 11-летнего цикла. Подтверждается заключе-

ние авторов [89] о рекордной величине 19 цикла.

3. Собрана статистика по наблюдению рентгеновских вспышек с разбиением на классы и впервые показано, что статистическое распределение времен рекуррентности вспышек является логнормальным. Это может свидетельствовать о том, что вероятность появления вспышек в АО определяется нелинейным взаимодействием многих факторов, следовательно, простые однофакторные методы прогноза вспышек являются малоэффективными – прогноз должен быть многофакторным.
4. Средние времена рекуррентности вспышек в АО имеют типичные значения 180, 290, 370, 470, 590 и 950 минут, что близко к типичным периодам долгопериодических колебаний пятен.
5. Впервые произведены реконструкции солнечной активности по содержанию радионуклидов в природных датированных образцах с учетом климатических факторов. Показано, что значения чисел Вольфа во время минимума Маундера могут быть сравнимы со значениями во время минимума Дальтона, т.е. не столь малы, как это обычно представляется.

5.3 Апробация

Результаты работ докладывались на российских и международных научных конференциях:

- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2012», 24 – 28 сентября 2012;
- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013», 25 – 27 сентября 2013;
- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2014», 20 – 24 октября 2014;

- Международная конференция «Radiosun workshop - 2014», 11 – 15 августа 2014;
- Конференция по физике Солнца "Солнечная активность в эпоху смены режима цикличности», посвященная 100-летию со дня рождения М.Н. Гневывшева, 7 – 11 июля 2014 г;
- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2015», 5 – 9 октября 2015;
- Российско-финляндский симпозиум "Multi-Wavelength Study of Stellar Flares and the Properties of Active Galactic Nuclei 25 – 29 мая 2015 г;
- 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 15 – 19 августа 2016;
- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016», 10 – 14 октября 2016;
- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2017», 9 – 13 октября 2017;
- Международная конференция «Физика.СПб-2017», 24 – 26 октября 2017.

5.4 Основные публикации по теме диссертации

1. Наговицын Ю.А., Кулешова А.И. Соотношение Вальдмайера и ранняя диагностика величины максимума текущего цикла солнечной активности. // *Астрономический журнал*. - 2012. - Т.89, №10. - С.883-887;
2. Nagovitsyn Yu. A., Kuleshova A.I. Recurrence of Flare Energy Releases in Solar Active Regions (Cycle 23). // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2013. - V.53, №8. - P.985-988;

3. Nagovitsyn Yu. A., Obridko V.N., Kuleshova A.I. The Upper Limit of Sunspot Activity as Observed over a Long Time Interval. // Solar Physics. - 2015. - V.290, no.4. - P.1285-1294;
4. Kuleshova, A.I., Dergachev V.A., Kudryavtsev I.V., Nagovitsyn Yu.A., Ogurtsov M.G. Possible influence of climate factors on the reconstruction of the cosmogenic isotope ^{14}C production rate in the earth's atmosphere and solar activity in past epochs. // Geomagnetism and Aeronomy. - 2015. - V.55. - P.1071-1075;
5. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A., Kuleshova, A.I. Reconstructions of the heliospheric modulation potential and Wolf numbers based on the content of the ^{14}C isotope in tree rings during the Maunder and Sporer minimums // Geomagnetism and Aeronomy. - 2016. - V.56. - P.998-1005;
6. Ю.А. Наговицын, А.И. Кулешова. Моменты экстремумов 11-летних циклов солнечной активности в последние два тысячелетия (верификация данных Шоува). // Труды конференции Солнечная и солнечно-земная физика – 2012» - С.93-96;
7. Ю.А.Наговицын, А.И.Кулешова. О рекуррентности вспышек в активных областях. // Труды конференции Солнечная и солнечно-земная физика – 2011». - С.165-168;
8. Кулешова А.И., Дергачёв В.А., Кудрявцев И.В., Наговицын Ю.А., Огурцов М.Г. Возможное влияние климатических факторов на реконструкцию скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C в атмосфере земли и солнечная активность в прошлые эпохи/ // Труды конференции Солнечная и солнечно-земная физика – 2014. - С.255–258;
9. Кулешова А.И., Дергачёв В.А., Кудрявцев И.В., Наговицын Ю.А., Огурцов М.Г. Изменение солнечной активности на основе данных по содержанию

космогенного изотопа ^{14}C во время малого ледникового периода. // Труды конференции Солнечная и солнечно-земная физика – 2015. - С.253–256;

10. Кулешова А.И., Дергачёв В.А., Кудрявцев И.В., Наговицын Ю.А., Огурцов М.Г. Реконструкции гелиосферного модуляционного потенциала с конца 14 века до середины 19-го на основе данных по содержанию космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в природных архивах. // Труды конференции Солнечная и солнечно-земная физика – 2016. - С.187–190.

Список литературы

- [1] *Агекян Т.А.* Теория ошибок для астрономов и физиков. - Наука, 1971.
- [2] *Арсланов Х.А.* Радиоуглерод: геохимия и геохронология. - Ленинград, 1987.
- [3] *Брей Р., Лоухед Р.* Солнечные пятна. - Наука, 1967.
- [4] *Бютнер Е.К.* Планетарный газообмен между O_2 и CO_2 . - Гидрометеиздат, 1986.
- [5] *Витинский Ю.И.* Цикличность и прогнозы солнечной активности. - Наука, 1973.
- [6] *Витинский Ю.И.* Солнечная активность. - Наука, 1983.
- [7] *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. - Наука, 1986.
- [8] *Дергачев В. А., Векслер В. С.* Применение радиоуглеродного метода для изучения природной среды прошлого. - Ленинград, 1984.
- [9] *Дергачев В.А., Остряков В.М.* К вопросу о диффузионном распределении космогенного радиоуглерода в динамическом резервуаре. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* - 1979. - Т.43. - С.835-839.
- [10] *Каримова Л.М., Круглун О.М., Макаренко Н.Г., Романова Н.В.* Степенной закон распределения в статистике отказов в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов. // *Космические исследования.* - 2011. - Vol.Т, №.5. - С.470-475.
- [11] *Наговицын Ю.А., Кулешова А.И.* К прогнозу цикла солнечной активности №24. // *Труды всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца: Солнечная и солнечно-земная физика –2012».* - 2012. - С.565-566.
- [12] *Обридко В.Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. - Наука, 1985.

- [13] *Смит Г., Смит Э.* Солнечные вспышки. - Мир, 1966.
- [14] *Сун В., Яскелл С.* Минимум Маундера и переменные солнечно-земные связи. - Регулярная и хаотическая динамика, 2008.
- [15] *Abramenko V.I., Eryushev I.I., and Tsvetkov L.I.* Quasi-periodic pulsations of the radio emission of a proton region on the sun in July 1974 at 3.5, 2.5, and 1.9 cm. // *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.* - 1982. - Vol.65. - P.87.
- [16] *Aguirre A., Dow-Hygelund C., Schaye J., Theuns T.* Metallicity of the Intergalactic Medium Using Pixel Statistics. IV. Oxygen. // *ApJ.* - 2008. - Vol.689, no.2. - P.851-864.
- [17] *Alikaeva K. V., Kondrashova N. N., Polupan P. N.* Physical conditions in photospheric layers of the McMath 15526 active region at the stage of flare activity. // *Bulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR.* - 1989. - Vol.7. - P.93 – 98.
- [18] *Arnold J. R. and Libby W. F.* Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age. // *Science.* - 1949. - Vol.110. - P.678–680.
- [19] *Aschwanden M.J., McTiernan J.M.* Reconciliation of Waiting Time Statistics of Solar Flares Observed in Hard X-rays. // *The Astrophysical Journal.* - 2010. - Vol.717, no.2. - P.683-692.
- [20] *Baiesi M., Paczuski M., Stella A.L.* Intensity Thresholds and the Statistics of the Temporal Occurrence of Solar Flares. // *Physical Review Letters.* - 2006. - Vol.96, no.5. - id. 051103.
- [21] *Boffetta G., Carbone V., Giuliani P., Veltri P., Vulpiani A.* Power Laws in Solar Flares: Self-Organized Criticality or Turbulence? // *Physical Review Letters.* - 1999. - Vol.83, no.22. - P.4662-4665.

- [22] *Box A. D.* Renormalisation group analysis of supersymmetric particle interactions. // *ProQuest Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.)*. - 2008. - 70-02, Section: B, page: 1093.
- [23] *Brown C.M.* What determines sunspot maximum? // *MNRAS*. - 1976. - Vol.174. - P.185-190.
- [24] *Choudhuri A.R.* Prospects for predicting cycle 24. // *Journal of Astrophysics and Astronomy*. - 2008. - Vol.29, no.1-2. - P.41-47.
- [25] *Clark D.H., Stephenson F.R.* An Interpretation of the Pre-Telescopic Sunspot Records from the Orient. // *QJRAS*. - 1978. - Vol.19. - P.387.
- [26] *Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W.* Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle. // *Space Science Reviews*. - 2014. - Vol.186, no.1-4. - P.35-103.
- [27] *Cook G.T., Mackenzie A.B., Naysmith P., Anderson R.* Natural and anthropogenic ^{14}C in the UK coastal marine environment. // *Journal of environmental radioactivity*. - 1998. - Vol.4, no.1. - P.89-111.
- [28] *Crowley T.J. and Lowery T.S.* How warm was the Medieval Warm Period? // *Ambio*. - 2000. - Vol.29. - P.51-54.
- [29] *Currie R. G.* Fine structure in the sunspot spectrum 2 to 70 years. // *Astrophys. Space Sci*. - 1973. - Vol.20. - P.509–518.
- [30] *Damon P.E., Lerman J.C., Long A.* Temporal Fluctuations of Atmospheric ^{14}C : Causal Factors and Implications. // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. - 1978. - Vol.6. - P.457.
- [31] *Дергачев В.А.* Солнечная активность и климат: 200-летний цикл. // *Труды международной конференции Пулково*. - 2002. - P.183-193.
- [32] *Дергачев В. А., Чистяков В. Ф.* Солнечный цикл. - Санкт-Петербург, 1993.

- [33] *Dmitriev I.V., Kuzanyan K.M., Obridko V.N.* Amplitude and period of the dynamo wave and prediction of the solar cycle. // *Solar Phys.* - 2000. - Vol.195, no.1. - P.209-218.
- [34] *Donnelly R. F., Grubb R. N., Cowley F. C.* Solar X-ray measurements from SMS-1, SMS-2, and GOES-1, information for data users. // *Unknown.* - 1977.
- [35] *Dorman L.I.* Specific features in studying cosmic ray variations using the radiocarbon method. // *Proc. 6th All-Union Meeting "Astrophysical Phenomena and Radiocarbon, Tbilisi.* - 1976. - P.49-96.
- [36] *Eddy J.A.* The Case of the Missing Sunspots. // *Scientific American.* - 1977. - Vol.236, no.5. - P.80-92.
- [37] *Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A.* Sunspot oscillations as derived from the SOHO/MDI magnetograms. // *Cosmic Research.* - 2011. - Vol.50, no.1. - P.44-55.
- [38] *Etheridge D.M., Steele L.P., Francey R.J., Langenfelds R. L.* Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* - 1998. - Vol.103, no.D13. - P.15979–15993.
- [39] *Gleissberg W.* Secularly Smoothed Data on the Minima and Maxima of Sunspot Frequency. // *Solar Phys.* - 2007. - Vol.2, no.2. - P.231-233.
- [40] *Goldvarg T.B, Nagovitsyn Yu. A., Solov'ev A.A.* On the Periodicity of Energy Release in Solar Active Regions. // *Astronomy Letters.* - 2005. - Vol.31, no.6. - P.414-421.
- [41] *Grubb, R. N.* The SMS/GOES space environment monitor subsystem. // *Unknown.*- 1975.

- [42] *Hathaway D.H.* Solar Cycle Forecasting. // *Space Sci Rev.* - 2007. - Vol.44, no.1-4. - P.401-412.
- [43] *Hoyt D.V., Schatten K.H.* Group Sunspot Numbers: A New Solar Activity Reconstruction. // *Solar Phys.* - 2000. - Vol.179, no.1. - P.189-219.
- [44] *Kahler S.W., Kreplin R.W.* The NRL SOLRAD X-ray detectors - A summary of the observations and a comparison with the SMS/GOES detectors. // *Solar Phys.* - 2011. - Vol.133. - P.371-384.
- [45] *Kane R. P.* Solar Cycle Predictions based on Solar Activity at Different Solar Latitudes. // *Solar Phys.* - 2007. - Vol.246, no.2. - P.471-485.
- [46] *Kilcik A., Anderson C.N.K., Rozelot J.P., Ye H., Sugihara G., Ozguc A.* Nonlinear Prediction of Solar Cycle 24. // *The Astrophysical Journal.* - 2009. - Vol.693, no.2. - P.1173-1177.
- [47] *Kitiashvili I., Kosovichev A. G.* Application of Data Assimilation Method for Predicting Solar Cycles. // *The Astrophysical Journal Letters.* - 2008. - Vol.688, no.1. - article id. L49.
- [48] *Kocharov G.E., Vasilev V.A., Dergachev V.A., Ostryakov V.M.* An 8000-year sequence of galactic cosmic-ray fluctuations. // *Soviet Astronomy Letters.* - 1983. - Vol.9. - P.110-112.
- [49] *Kovaltsov G.A., Mishev A., Usoskin I.G.* A new model of cosmogenic production of radiocarbon ^{14}C in the atmosphere. // *Earth and Planetary Science Letters.* - 2012. - Vol.337. - P.114-120.
- [50] *Krivsky L.* Long-term fluctuations of solar activity during the last thousand years. // *Solar Phys.* - 1984. - Vol.93. - P.189-194.
- [51] *Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A., Kuleshova, A.I.* Reconstructions of the heliospheric modulation potential and Wolf numbers based on the content of

- the ^{14}C isotope in tree rings during the Maunder and Sporer minimums. // *Geomagn. Aeron.* - 2016. - Vol.56. - P.998.
- [52] *Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A., Nagovitsyn Yu.A., Ogurtsov M. G., Jungner H.* Influence of climatic factors on the past atmospheric content of the ^{14}C isotope. // *Geomagn. Aeron.* - 2013. - Vol.53, no.8. - P.927-931.
- [53] *Koudriavtsev I.V., Dergachev V.A., Nagovitsyn Yu.A., Ogurtsov M.G., Junger H.* On the influence of climatic factors on the ratio between the cosmogenic isotope ^{14}C and total carbon in the atmosphere in the past. // *Geochronometria.* - 2014. - Vol.41, no.3. - P.216-222.
- [54] *Kuleshova, A.I., Dergachev V.A., Kudryavtsev I.V., Nagovitsyn Yu.A., Ogurtsov M.G.* Possible influence of climate factors on the reconstruction of the cosmogenic isotope ^{14}C production rate in the earth's atmosphere and solar activity in past epochs. // *Geomagn. Aeron.* - 2015. - Vol.55. - P.1071.
- [55] *Lantos P.* Prediction of the Maximum Amplitude of Solar Cycles Using the Ascending Inflexion Point. // *Solar Phys.* - 2000. - Vol.196, no.1. - P.221-225.
- [56] *Libby W.F.* Radiocarbon dating. - University of Chicago Press, 1977.
- [57] *Damon P.E., Lerman J.C., Long A.* ^{14}C bomb effect in tree-rings of tropical and subtropical species of Brazil. // *Tree-ring research.* - 2001. - Vol.57, no.2. - P.191-196.
- [58] *Lomb N. R., Andersen A. P.* The analysis and forecasting of the Wolf sunspot numbers. // *MNRAS.* - 1980. - Vol.190. - P.723-732.
- [59] *Makarov V.I., Tlatov A.G., Callebaut D.K., Obridko V.N., Shelting B.D.* Large-Scale Magnetic Field and Sunspot Cycles. // *Solar Phys.* - 2001. - Vol.198, no.2. - P.409-421.

- [60] *Malinin V.N., Obraztsova A.A.* Variability of the carbon dioxide exchange in the ocean–atmosphere system. // *Community. Environment. Development.* - 2011. - Vol.4. - P.220–226.
- [61] *Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K.* Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. // *Geophysical Research Letters.* - 1999. - Vol.26, no.6. - P.759-762.
- [62] *McNish A. G., Lincoln J. V.* Prediction of sunspot numbers. // *American Geophysical Union.* - 1949. - Vol.30, no.5. - P.673-685.
- [63] *Miyahara H., Masuda K., Muraki Y., Kitagawa H., Nakamura T.* Variation of solar cyclicity during the Spoerer Minimum. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* - 2006. - Vol.111, no.A3.
- [64] *Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W.* Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. // *Nature.* - 2005. - Vol.433, no.7026. - P.613-617.
- [65] *Monnin E., Steig E.J., Siegenthaler U. et al.* Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. // *Earth and Planetary Science Letters.* - 2004. - Vol.224. - P.45-54.
- [66] *Nagovitsyn Yu. A.* A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past. // *Astronomy Letters.* - 1997. - Vol.23, no.6. - P.742-748.
- [67] *Nagovitsyn Yu. A.* To the Description of Long-Term Variations in the Solar Magnetic Flux: The Sunspot Area Index. // *Astronomy Letters.* - 2005. - Vol.31, no.8. - P.557-562.

- [68] *Nagovitsyn Yu.A.* Solar and geomagnetic activity on a long time scale: Reconstructions and possibilities for predictions. // *Astronomy Letters*. - 2006. - Vol.32, no.5. - P.344-352.
- [69] *Nagovitsyn Yu.A.* Solar cycles during the Maunder minimum. // *Astronomy Letters*. - 2007. - Vol.33, no.5. - P.340-345.
- [70] *Nagovitsyn Yu.A.* Specific features in the effect of solar activity on the Earth's climate changes. // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2014. - Vol.54, no.8. - P.1010-1013.
- [71] *Nagovitsyna E.Yu., Nagovitsyn Yu.A.* Spatial variations in parameters of Quasi-Hourly Sunspot Fragment Oscillations and a Singular Penumbra Oscillator. // *Astronomy Letters*. - 2002. - Vol.28, no.2. - P.121-129.
- [72] *Nagovitsyn, Yu. A., Georgieva, K., Osipova, A. A., Kuleshova, A. I.* Eleven-year cyclicality of the sun on the 2000-year time scale // *Geomagnetism and Aeronomy* - 2015. - Vol.55, no.8. - P.1081-1088.
- [73] *Nagovitsyn Yu. A., Kuleshova A. I.* The Waldmeier rule and early diagnostics of the maximum of the current solar cycle. // *Astronomy Reports*. - 2012. - Vol.56, no.10. - P.800-804.
- [74] *Nagovitsyn Yu.A., Ivanov V.G., Miletsky E.V., Nagovitsyna E.Yu.* The Maunder minimum: North-south asymmetry in sunspot formation, mean sunspot latitudes, and the butterfly diagram. // *Astronomy Reports*. - 2010. - Vol.54, no.5. - P.476-480.
- [75] *Nagovitsyn Yu.A., Obridko V.N., Kuleshova A.I.* The Upper Limit of Sunspot Activity as Observed over a Long Time Interval. // *Solar Phys*. - 2015. - Vol.290, no.4. - P.1285-1294.

- [76] *Nagovitsyn Yu. A., Rybak A. L., Nagovitsyna E. Yu.* Magnetic field variations and spatial configurations of long-period sunspot oscillations according to the SOHO data. // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2012. - Vol.52, no.7. - P.902-907.
- [77] *Obridko V.N., Georgieva K., Nagovitsyn Yu.A.* The Sun: New Challenges. - Springer, 2012.
- [78] *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 Phys.* - 2002. - Vol.211, no.1. - P.371-394.
- [79] *Penn M.J., Livingston W.* Long-term evolution of sunspot magnetic field. // *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*. - 2011. - Vol.273. - P.126-133.
- [80] *Petrovay K.* Solar Cycle Prediction. // *Living Reviews in Solar Physics*. - 2010. - Vol.7, no.1. - P.59.
- [81] *Pevtsov A.A., Nagovitsyn Yu.A., Tlatov A.G., Rybak A.L.* Long-term Trends in Sunspot Magnetic Fields. // *The Astrophysical Journal Letters*. - 2011. - Vol.742, no.2. - P.4.
- [82] *Reimer P.J., Baillie M. G., Bard E., Beck J.W. and 21 coauthors.* IntCal04: A New Consensus Radiocarbon Calibration Dataset from 0-26 ka BP. // *American Geophysical Union*. - 2004. - Vol.46, no.3. - P.1029-1058.
- [83] *Reimer P.* IntCal04: Refinements to the IntCal09 and Marine09 radiocarbon calibration curves. // *Quaternary International*. - 2009. - Vol. 279-280. - P.397.
- [84] *Roth R., Joos F.* A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene ^{14}C and CO_2 records: implications of data and model uncertainties. // *Clim. Past*. - 2013. - Vol.9. - P.1879–1909.
- [85] *Schöve D.J.* Sunspot cycles. - Hutchinson Ross Publ. Co., 1983.

- [86] *Shevenell A.E., Ingalls A.E., Domack E.W., Kelly C.* Holocene Southern Ocean surface temperature variability west of the Antarctic Peninsula. // *Nature*. - 2011. - Vol.470, no.7333. - P.250-254.
- [87] *Sokoloff D.* The Maunder Minimum and the Solar Dynamo. // *Solar Phys.* - 2004. - Vol.224, no.1-2. - P.145-152.
- [88] *Solanki S. K., Krivova N. A., Schussler M., Fligge M.* Search for a relationship between solar cycle amplitude and length. // *Astron. Astrophys.* - 2002. - Vol.396. - P.1029-1035.
- [89] *Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schuessler M. and Beer J.* An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. // *Nature*. - 2004. - Vol.431. - P.1084-1087.
- [90] *Stuiver M, Pollach H.A.* Discussion: reporting of ^{14}C data. // *Radiocarbon*. - 1977. - Vol.19. - P.355-363.
- [91] *Suess H.E.* Radiocarbon Concentration in Modern Wood. // *Science*. - 1955. - Vol.122, no.3166. - P.415-417.
- [92] *Takahashi T., Olafsson J., Goddard J.G., Chipman D.W., Sutherland S. C.* Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. // *Global Biogeochemical Cycles*. - 1993. - Vol.7, no.4. - P.843-878.
- [93] *Tlatov A.G.* The Minimum Activity Epoch as a Precursor of the Solar Activity. // *Solar Phys.* - 2009. - Vol.260. - P.465-477.
- [94] *Usoskin I.G.* A History of Solar Activity over Millennia. // *Living Reviews in Solar Physics* - 2008. - Vol.5, no.1. - P.88.

- [95] *Usoskin I.G., Hulot G., Gallet Y., Roth R., Licht A., Joos F., Kovaltsov G.A., Thebault E., Khokhlov A.* Evidence for distinct modes of solar activity. // *Astronomy&Astrophys.* - 2014. - Vol.562. - P.4.
- [96] *Usoskin I.G., Mursula K., Solanki S.K., Schussler M., Kovaltsov G.A.* A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics).* - 2002. - Vol.107, no.A11. - P.1374.
- [97] *Volobuev D. M.* Solar activity record from archaeomagnetic data. // *IAU Symposium.* - 2004. - Vol.223. - P.563-564.
- [98] *Wagner W.J., Grubb R.N., Heckman G.R., Mulligan P. J.* The Solar X-Ray Imagers (SXI) on NOAA's GOES. // *Bulletin of the American Astronomical Society.* - 1987. - Vol.19. - P.923.
- [99] *Waldmeier M.* Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve. // *Astronomische Mitteilungen der Eidgenossischen Sternwarte Zurich.* - 1935. - Vol.14. - P.105-136.
- [100] *Wheatland M.S., Litvinenko Y.E.* Understanding solar flare waiting-time distributions. // *Solar Phys.* - 2002. - Vol.211, no.1. - P.255-274.
- [101] *Wilson R.M., Hathaway D.H., Reichmann E.J.* An estimate for the size of cycle 23 based on near minimum conditions. // *J. Geophys. Res.* - 1949. - Vol.104, no.A4. - P.6595-6603.
- [102] *Wittmann A.D., Xu Z.T.* A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684. // *Supplement Series.* - 1987. - Vol.70, no.1. - P.83-94.
- [103] *Wolf R.* Schreiben des Herrn Prof. R. Wolf an den Herausgeber // *MNRAS.* - 1861. - Vol.21. - P.77.
- [104] *Zolotova N.V., Ponyavin D. I.* The Maunder Minimum is Not as Grand as it Seemed to be. // *Ap. J.* - 2015. - Vol.800, no.1. - P.14.