

На правах рукописи

КУЛЕШОВА Алена Игоревна

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

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории
Российской академии наук

Научный руководитель:

Наговицын Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории РАН

Официальные оппоненты:

Мордвинов Александр Вениаминович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
руководитель Лаборатории солнечной активности
Института Солнечно-Земной Физики СО РАН

Веретенко Светлана Викторовна,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт земного
магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Защита состоится 1 июня 2018 года в 11 час. 15 мин. на заседании
Диссертационного совета Д 002.120.01 Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН) по
адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО
РАН (www.gao.spb.ru).

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Булига Станислава Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Солнечная активность – изменения магнитного поля Солнца на различных пространственных и временных масштабах и их проявления

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 (10^{28} - 10^{32} 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 [1]. 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 вспышечных процессов в активных областях – короткая временная шкала, так и в плане закономерностей характеристик 11-летних циклов и грандиозных максимумов и минимумов – длительная.

Цели работы

1. Выявление закономерностей рекуррентности (повторяемости) солнечных вспышек.
2. Рассмотрение диагностических свойств правила Вальдмайера, его модификация, прогноз цикла активности.
3. Изучение новых закономерностей, в том числе относительной глубины, исторических грандиозных минимумов солнечной активности.

Научная новизна

1. По данным КА GOES изучена статистика наблюдений рентгеновских вспышек и впервые показано, что статистическое распределение времен рекуррентности рентгеновских вспышек для типичных времен 25-2500 минут (94% всех вспышек) является логнормальным. Это может свидетельствовать о том, что вероятность появления вспышек определяется нелинейным взаимодействием многих факторов, а, следовательно, простые однофакторные методы прогноза вспышек могут быть малоэффективными – прогноз должен быть многофакторным.

2. Получены типичные значения *средних* времен рекуррентности вспышек в АО, - 180, 290, 370, 470, 590 и 950 минут, близкие к типичным периодам долгопериодических колебаний пятен.

3. Предложена новая модификация правила Вальдмайера, которая, кроме фундаментального интереса, позволяет более точно и заблаговременно диагностировать величину максимума солнечного цикла с помощью параметра максимальной скорости изменения индексов активности на ветви роста цикла.

4. Показано, что значения максимумов чисел Вольфа 11-летних циклов имеют верхний предел, близкий к значению в 19-м цикле активности, что подтверждает заключение авторов [2].

5. Впервые произведены реконструкции солнечной активности в прошлом 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. они не столь малы, как это обычно представляется.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты представляют интерес для понимания процесса развития цикла и солнечных вспышек. Сформулированное в главе 3 модифицированное правило Вальдмайера может быть использовано для ранней диагностики наступающего 11-летнего цикла. Описанные в 4 главе результаты помогают восстановить картину солнечной активности в прошлом, уточняя понятие грандиозных минимумов солнечной активности.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что статистическое распределение времен рекуррентности рентгеновских вспышек для типичных времен 25-2500 минут (94% всех вспышек) может быть аппроксимировано логнормальным распределением, а не экспоненциальным (типа Пуассона) или степенным (типа скейлинга), как это предполагалось ранее.

2. Сформулировано модифицированное правило Вальдмайера, которое, кроме фундаментального интереса, позволяет по скорости нарастания активности на ветви роста производить раннюю диагностику амплитуды 11-летнего цикла.

3. Найдено, что учет вариаций концентрации углекислого газа в атмосфере Земли и глобальной температуры приводит к тому, что реконструированные значения гелиосферного модуляционного потенциала и чисел Вольфа во время минимума Маундера могут быть сравнимы со значениями во время минимума Дальтона.

Апробация работы и достоверность результатов

Результаты работ прошли апробацию 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. Гневышева, 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 2016.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены применением адекватных статистических методов, достаточных объемов выборок, учетом существенных (климатических) факторов при реконструкциях солнечной активности в прошлом.

Личный вклад автора

Автором были проведены расчеты, описанные в главах 2, 3, 4. 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 4. Автор участвовала в постановке задач, анализе полученных результатов и их интерпретации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы (110 наименований). Полный объем диссертации 77 страниц текста, включая 24 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации показана актуальность темы диссертации и сформулированы цели и задачи работы.

В главе 1, носящей обзорный характер, описаны основные понятия, относящиеся к солнечной активности, даны характеристики 11-летних циклов активности и рассмотрены долговременные циклы.

В главе 2 приведены результаты по поиску закономерностей повторяемости появления вспышек в течение 11-летнего цикла активности. Результаты этого исследования опубликованы в работах [1А, 6А]. Параграф 2.1 носит вводный характер, описаны основные параметры вспышечной активности. В параграфе 2.2 описываются задачи работы по выявлению закономерностей вспышечных событий. Ранее, в работе Goldvarg et al. [3] 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. Временной охват наблюдательного материала [3] был невелик, бюллетень Solar Geophysical Data включал в себя основные данные о солнечных событиях, данные о солнечных вспышках были зарегистрированы с наземных обсерваторий. В то же время показано [4, 5], что характеристики магнитного поля АО изменяются с циклом, а вспышечные процессы связаны со структурой магнитного поля. В связи с этим, было решено рассчитать времена рекуррентности вспышечного энерговыделения (РВЭ) рентгеновских вспышек на отрезке времени в несколько солнечных циклов, 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. 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>. Всего в рассмотрении присутствовало ~10000 вспышек из 330 АО. В работе рассматриваются только рентгеновские вспышки. В качестве величины времени РВЭ, которая характеризует *средний* параметр РВЭ для каждой отдельной АО использовалась величина

$$TRS = \frac{t_n - t_1}{n - 1},$$

где $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$ – моменты вспышек в избранной АО, n – количество событий в данной АО. Другая величина характеризует время РВЭ для отдельных вспышек:

$$TRI = t_{i+1} - t_i$$

В этом случае каждую АО характеризует некоторое статистическое распределение. Если рассмотреть суммарное статистическое распределение для всех вспышек (рис.1), где по оси x отложено $\log(TRI)$, мы получим распределение, весьма близкое к гауссиане с максимумом $\sim 185^m$ (среднее квадратическое отклонение в логарифмах 0.559, что соответствует диапазону 50-675^m, коэффициент корреляции между эмпирическим и теоретическим распределениями 0.998). Таким образом, распределение рекуррентности времен вспышек 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 обстоятельства, что у нас получилось логнормальное распределение, можно предположить, что повторяемость вспышек в АО определяется неаддитивным (нелинейным) взаимодействием многих факторов. Здесь следует заметить, что ряд авторов предлагали для времен рекуррентности вспышек экспоненциальный (типа Пуассона) или степенной (типа скейлинга) закон распределения. Мы полагаем, что в будущем выбор между тремя видами распределений TRI поможет выработать правильный взгляд на природу происхождения вспышек.

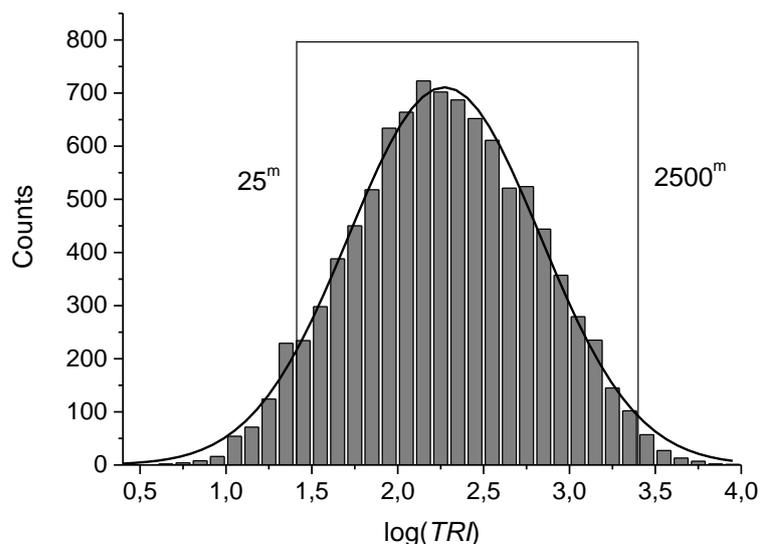


Рис.1. Статистическое распределение для ~ 10000 вспышечных событий, по оси x - десятичный логарифм времени РВЭ – TRI .

Статистическое распределение величины TRS , которая характеризует *средний* темп появления вспышек в отдельных АО, а также типичные времена повторяемости, представлены на рис.2 – видно, что значения пиков близки к типичным временам так называемых долгопериодических колебаний солнечных пятен [5, 6]. Это обстоятельство может говорить о связи явлений, но требует дальнейших исследований.

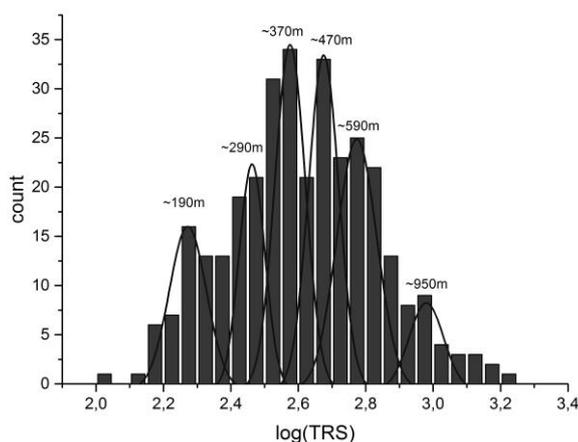


Рис.2. Статистическое распределение $\log (TRS)$ для 330 активных областей.

Рис.3 иллюстрирует динамическую плотность вероятности встречаемости тех или иных значений TRI в зависимости от фазы 11-летнего цикла (т.е. число событий нормировано на общее число событий в году). Видно, что 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. Это обстоятельство может иметь отношение к динамо-механизму 11-летнего цикла.

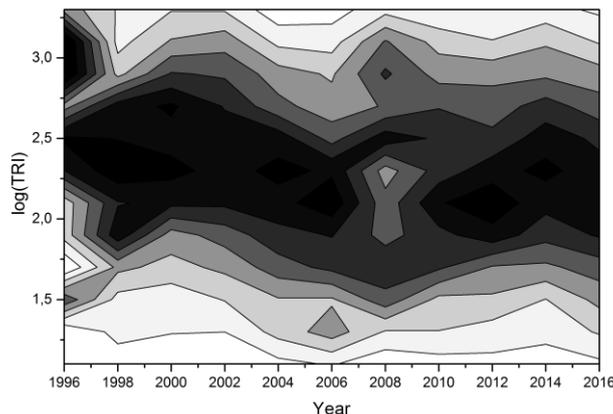


Рис.3. Динамическая плотность вероятности частоты вспышечных событий.

В параграфе 2.3 приведены выводы и результаты данной работы.

Глава 3 посвящена модифицированному правилу Вальдмайера. Результаты этого исследования опубликованы в работах [2А, 3А, 7А].

Параграф 3.1 носит вводный характер, в нем рассмотрены закономерности поведения 11-летних циклов активности, в том числе правило Вальдмайера, ряды данных, а также поведение 23 цикла активности и существующие прогнозы поведения 24 цикла.

В параграфе 3.2 описано модифицированное правило Вальдмайера, где в качестве параметра, связывающего амплитуду цикла с его предыдущим поведением на ветви роста до максимума, использовалась максимальная скорость нарастания магнитного потока на ветви роста развивающегося цикла, оцениваемая различными индексами. Для среднегодовых значений чисел Вольфа (версия 1.0) вводился параметр цикла $\Delta W_i = W_i - W_{i-1}$, характеризующий среднегодовую скорость прироста суммарного пятенного магнитного потока (скорость развития цикла). Оказывается, модуляция максимумов ΔW_i происходит параллельно модуляции чисел Вольфа в максимуме данного цикла, предвеляя максимум на несколько лет. Если обозначить максимальную скорость прироста как $DW(n) = \max \Delta W_i$ для n -го цикла, задать очевидное

асимптотическое условие $DW = 0$ при $W = 0$, то, сопоставив эту величину с величиной максимума данного цикла для интервала с 1700 по 2010 год, получаем нелинейную зависимость (рис 4 а), аппроксимировав которую по методу наименьших квадратов, имеем

$$W_M(n) = (3.21 \pm 0.14)DW(n) - (1.40 \pm 0.21)10^{-2}DW^2(n),$$

$$\sigma = 12, \quad k = 0.95$$

В этой формуле знак минус у квадратичного члена обеспечен как 6.7σ , и можно уверенно говорить, что $W_M(n)$ имеет верхний предел.

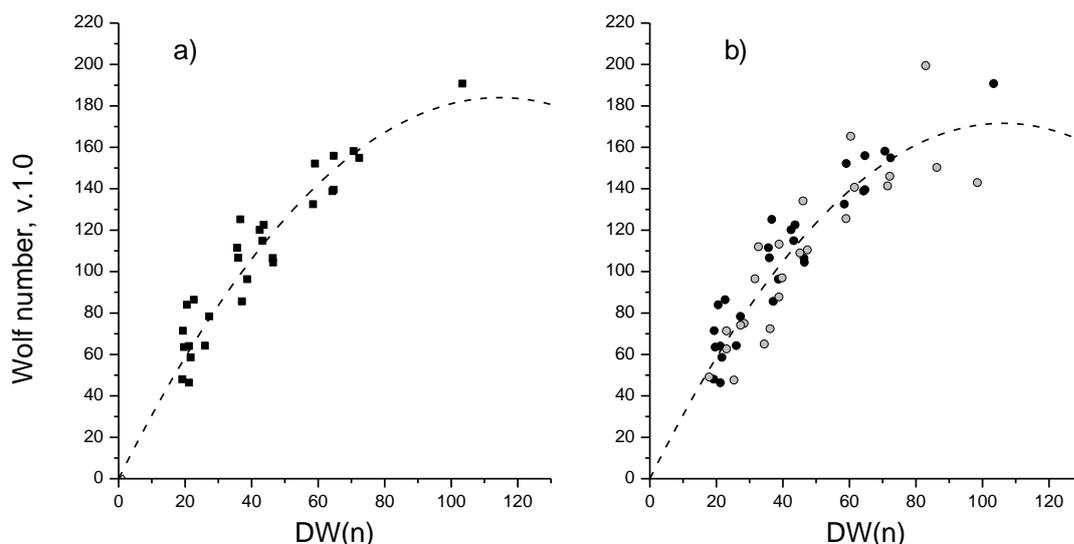


Рис.4. Зависимость числа Вольфа в максимуме $W_M(n)$ для n -го цикла от максимальной среднегодовой скорости его изменения на ветви роста $DW(n)$: а) при обычном вычислении среднегодовых, по [2А]; б) при обычном вычислении среднегодовых – черные кружки, при вычислении со сдвигом на полгода – серые, по [3А].

Отметим, что среднегодовые числа индексов можно считать не только с января по декабрь, но и со сдвигом на полгода: с июля по июнь следующего года. Так и было сделано в [3А] – см. рис.4 б), светлые кружки. В этом случае знак минус в квадратичной регрессии обеспечен 5.0σ . Для общего случая, когда мы используем оба способа подсчета среднегодовых значений, знак минус обеспечен 8.2σ .

Верхняя точка на рис.4 а) соответствуют 19-му циклу. Мы видим, что по оси абсцисс она находится вблизи положения максимума аппроксимирующей кривой, так что подтверждается заключение авторов [2] о рекордной величине 19-го цикла активности.

Интересно, что для ряда Хойта-Шаттена нормированного числа групп пятен коэффициент корреляции оказался заметно ниже ($k = 0.86$), чем для чисел

Вольфа, а для ряда суммарных площадей пятен – почти сравнимый с числами Вольфа ($k = 0.93$).

Следуя [2А], заметим, что точность нашего модифицированного правила Вальдмайера вдвое превышает точность оригинального правила. Поэтому с помощью параметра максимальной скорости изменения числа Вольфа мы можем заблаговременно диагностировать величину максимума цикла.

В подразделе 3.2.4 на основе модифицированного правила Вальдмайера был произведен прогноз 24-го цикла солнечной активности в шкале чисел Вольфа. Таким образом, по прогнозу в начале 2012 г. максимум цикла № 24 составит не меньше $W_M = 104 \pm 12$, сам максимум состоится не ранее 2013 г.

Для определения не только максимального числа Вольфа, но и формы цикла, были использованы регрессионные методы [7, 8], что позволило определить вероятный ход числа Вольфа в 24-м цикле (рис.5). Реальный максимум цикла, хотя и состоялся несколько позже ожидаемого, попадает в область прогнозируемых значений.

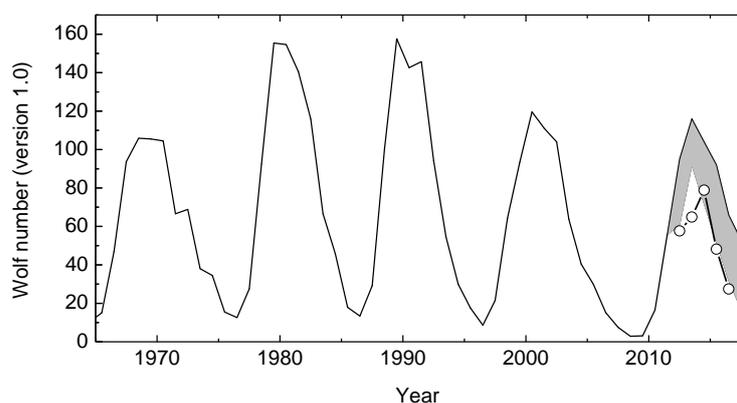


Рис.5. Прогноз среднегодового хода 24-го цикла числа Вольфа на основе модифицированного правила Вальдмайера, произведенный в 2012 году (серая область – пределы вероятных значений), его сравнение с предыдущими 11-летними циклами (сплошная линия) и реальные наблюдаемые значения после 2012 года (кружки).

В параграфе 3.3 сформулированы основные выводы по данной главе.

В главе 4 приведены результаты реконструкции гелиосферного модуляционного потенциала и чисел Вольфа за период с конца 14 по середину 19 века на основе данных по содержанию космогенного изотопа ^{14}C в атмосфере Земли. Результаты этого исследования опубликованы в работах [4А, 5А, 8А, 9А, 10А].

Вводная информация представлена в параграфе 4.1, где описан углеродный цикл, даны сведения об используемой пятирезервуарной модели, а также о грандиозных минимумах активности Солнца.

В параграфе 4.2 приведены цели и задачи работы. Одной из таких задач является понимание глубины грандиозных минимумов активности. О величине солнечной активности в доинструментальную эпоху (в отсутствие достоверных прямых и косвенных данных) судят по восстановленной скорости генерации изотопа ^{14}C , содержащегося в природных архивах (кольцах деревьев). Указано, что возможной причиной завышения реконструируемых значений скорости генерации изотопа ^{14}C в атмосфере Земли ($Q(t)$) под действием галактических космических лучей во время минимумов Шперера и Маундера (и, следовательно, занижения оцениваемой активности Солнца в работе [18]) является пренебрежение влиянием земных климатических изменений на результаты реконструкции. Необходимость учета этого влияния была отмечена достаточно давно [9], но ему не уделялось должного внимания. Причина состоит в том, что скорости перехода ^{14}C между природными резервуарами зависят от температуры и, следовательно, от изменений климата, и могут приводить к перераспределению углекислого газа (CO_2) между рассматриваемыми резервуарами, – поэтому климатические изменения необходимо учитывать на соответствующих промежутках времени.

Скорость генерации ^{14}C рассчитывалась при использовании пятирезервуарной модели [10]. Содержание изотопов ^{14}C в разных резервуарах описывается системой дифференциальных уравнений, которая решалась относительно $Q(t)$.

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

~~$$\frac{dN_b}{dt} = \lambda_{ab}N_a - (\lambda_{ba} + \lambda_{bh} + \lambda_{bO})N_b + \lambda_{hb}N_h + \lambda_{Ob}N_{O}$$~~

~~$$\frac{dN_h}{dt} = \lambda_{hb}N_b + \lambda_{ha}N_a - (\lambda_{bh} + \lambda_{ho} + \lambda_{hm})N_h + \lambda_{oh}N_{O}$$~~

~~$$\frac{dN_{mO}}{dt} = \lambda_{mOa}N_a + \lambda_{mOb}N_b + \lambda_{mOh}N_h - (\lambda_{mOa} + \lambda_{mOb} + \lambda_{mOh} + \lambda_{mOdO})N_{mO} + \lambda_{dOmO}N_{dO}$$~~

~~$$\frac{dN_{dO}}{dt} = \lambda_{dOmO}N_{mO} - \lambda_{dO}N_{dO}$$~~

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; $\lambda = 1.21 \cdot 10^{-4} \text{Год}^{-1}$ - 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.

Во времена Малого Ледникового Периода изменение температуры происходило не только в атмосфере, но и в океане. В работе [11] 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 [12] показано, что изменения температуры могут приводить к вариациям содержания ^{14}C в атмосфере, сравнимым с результатами влияния вариаций интенсивности галактических космических лучей на содержание ^{14}C ($\Delta^{14}\text{C}$).

В работе [13] скорость перехода радиоуглерода из поверхностного слоя океана в атмосферу λ_{mOa} представлена в виде:

$$\lambda_{\text{mOa}} = k \Delta T$$

где ΔT - изменение глобальной температуры, k - численный коэффициент.

При этом считалось, что изменение температуры воды происходило синхронно с изменением приземной глобальной температуры.

В качестве температурных рядов при расчетах $Q(t)$ в нашей работе [4А] были выбраны три реконструкции глобальной температуры приземного слоя воздуха – [14,15,16], описывающих три варианта поведения температурной кривой на рассматриваемом интервале. В работе [13] были приведены обоснования выбора величины температурного коэффициента k , было показано, что он должен принимать значения $\sim 0.1\text{K}^{-1}$. Более подробное описание реконструкции скорости генерации $Q(t)$ приведено в работе [4А].

Восстановление чисел Вольфа производилось на основе реконструированных значений модуляционного потенциала ($\varphi(t)$) - параметра, характеризующего изменение интенсивности различных видов частиц космических лучей в зависимости от времени. Для его нахождения мы использовали восстановленные нами значения скорости генерации космогенного изотопа ^{14}C в атмосфере Земли $Q(t)$ на основе радиоуглеродных данных с учетом изменений глобальной температуры и концентрации CO_2 в земной атмосфере. Учет влияния геомагнитного поля, изменяющегося во времени, проводился согласно работам [17, 18]. На рисунке 6 приведены результаты вычислений $Q(t)$ с учетом изменения концентрации углекислого газа при использовании трёх различных температурных реконструкций.

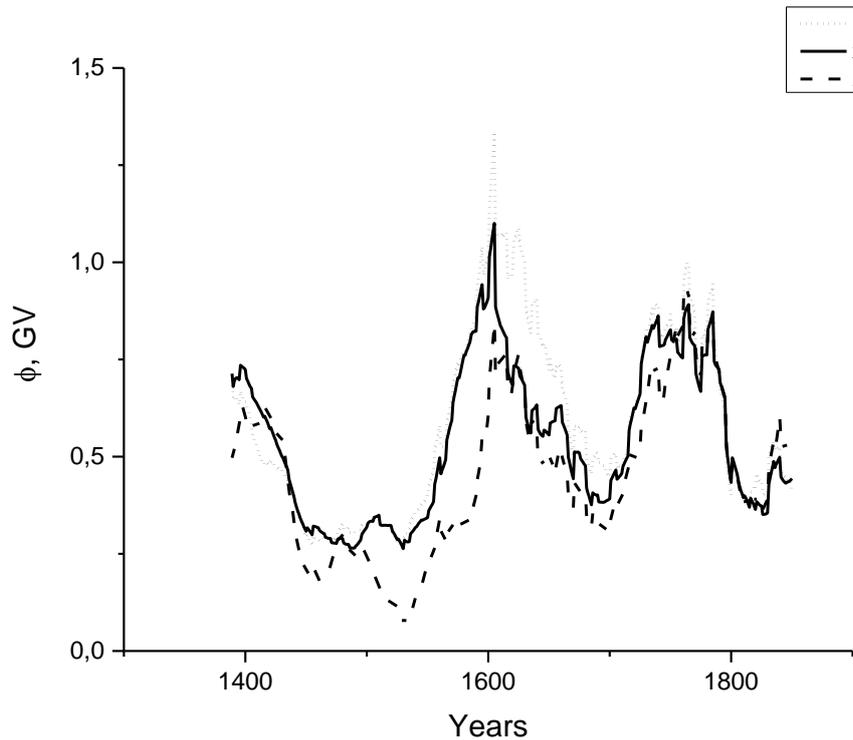


Рис 6. Значения модуляционного потенциала, реконструированные для $k=0.1\text{K}^{-1}$ и трех разных температурных реконструкций: 1 - Mann et al. 1999 [14], 2 - Crowley et al., 2000 [15], 3 - Moberg et al., 2005 [16].

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 [18,19]. При этом, согласно [20], рассматривалась регрессия между этими величинами для фазы роста и фазы спада отдельно. На рисунке 7 приведены восстановленные значения чисел Вольфа.

В параграфе 4.3 приведены выводы и результаты. Учет вариаций концентрации углекислого газа в атмосфере Земли и глобальной температуры приводит к выводу, что реконструированные значения гелиосферного модуляционного потенциала и чисел Вольфа во время минимума Маундера могут быть сравнимы со значениями во время минимума Дальтона. Это подтверждает возможность немалой амплитуды циклов в маундеровском минимуме [21].

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации, показана научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

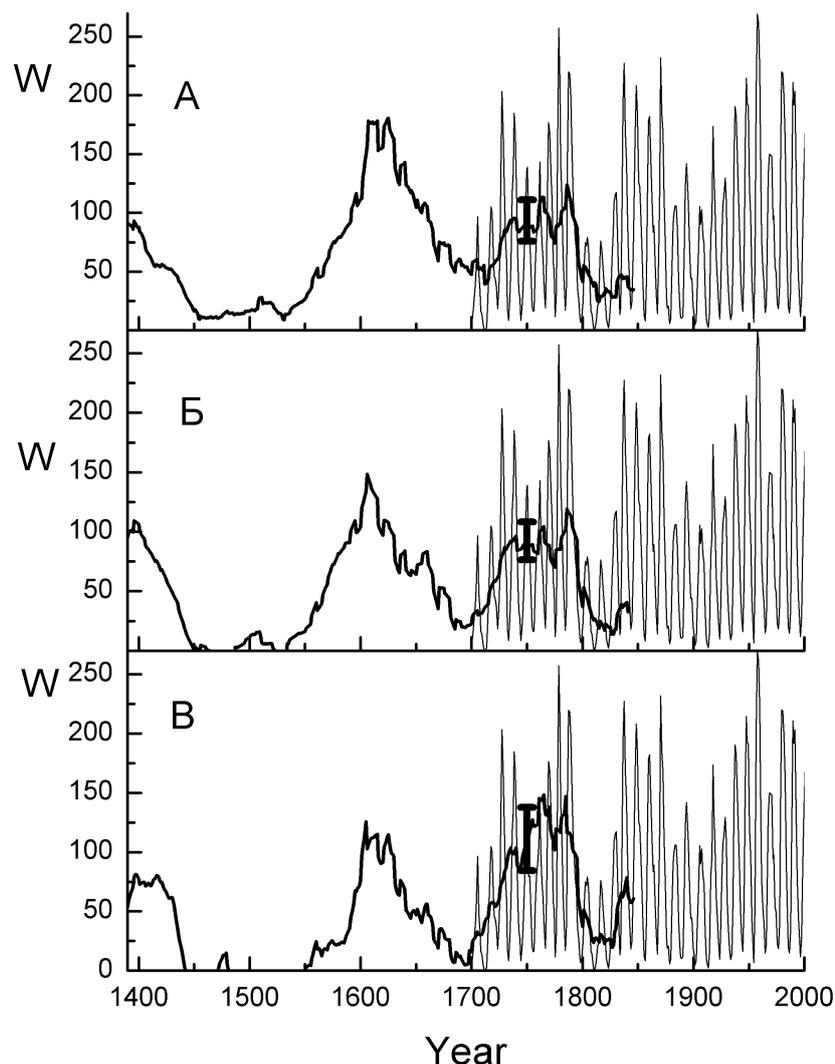


Рис 7. Измеренные (серая линия, <http://www.sidc.be/silso/datafiles>) и восстановленные А, Б, В значения чисел Вольфа с погрешностями реконструкций 1, 2 и 3 (по рис.6).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 5 работ в изданиях, индексируемых в Web of Science и входящих в список ВАК:

[1A]. Nagovitsyn Yu. A., Kuleshova A.I. Recurrence of Flare Energy Releases in Solar Active Regions (Cycle 23). // *Geomagn. Aeron.* – 2013. - v.53. - No.8. – P. 985-988;

[2A]. Наговицын Ю.А., Кулешова А.И. Соотношение Вальдмайера и ранняя диагностика величины максимума текущего цикла солнечной активности // *Астрономический журнал.* – 2012. – Т.89. – No.10. - С.883-887;

- [3A]. 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;
- [4A]. 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. – V.55. –P. 1071-1075;
- [5A]. 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 Spörer minimums. // Geomagn. Aeron. – 2016. – V.56. – P.998-1005.

Кроме того, в трудах конференций опубликовано 5 работ:

- [6A]. Ю.А.Наговицын, А.И.Кулешова. О рекуррентности вспышек в активных областях. // Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013». – 2013. - с.165-168.
- [7A]. 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». – 2012. - с.93-96.
- [8A]. 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». – 2014. - с. 255 – 258;
- [9A]. 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». – 2015. - с. 253 – 256;
- [10A]. 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 космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в природных архивах. // Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016. – 2016. - с. 187 – 190;

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1]. Nagovitsyn Yu.A. Specific features in the effect of solar activity on the Earth's climate changes. // *Geomagn. Aeron.* – 2014. – V.54. – No.8. – P.1010-1013.
- [2]. 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. – V.431. - P.1084-1087.
- [3]. Goldvarg T.B, Nagovitsyn Yu. A., Solov'ev A.A. On the Periodicity of Energy Release in Solar Active Regions. // *Astronomy Letters.* – 2005. – V.31. – No.6. – P.414-421.
- [4]. Pevtsov A.A., Nagovitsyn Yu.A., Tlatov A.G., Rybak A.L. Long-term Trends in Sunspot Magnetic Fields. // *The Astrophysical Journal Letters.* – 2011. – V.742, No.2. – P.4.
- [5]. 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. // *Geomagn. Aeron.* – 2012. – V.52. – No.7. – P.902-907.
- [6]. Efremov V. I., Parfinenko L. D., Solov'ev A. A. Sunspot oscillations as derived from the SOHO/MDI magnetograms // *Cosmic Research.* – 2012. – V.50. – No.1. - P.44-55.
- [7]. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Ленинград: Наука. - 1973.
- [8]. Nagovitsyn, Yu. A. A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past. // *Astronomy Letters.* – 1997. - V.23. – No.6. – P.742-748.
- [9]. Дергачев В.А., Остряков В.М. К вопросу о диффузионном распределении космогенного радиоуглерода в динамическом резервуаре. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* – 1979. – V.43. – P.835-839.
- [10]. 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.
- [11]. Shevenell A.E., Ingalls A.E., Domack E.W., Kelly C. Holocene Southern Ocean surface temperature variability west of the Antarctic Peninsula. // *Nature.* – 2011 - V.470, No.7333. – P.250-254.
- [12]. 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 C-14 isotope. // *Geomagn. Aeron.* – 2013. – V.53. – No.8. – P.927-931.

- [13]. Koudriavtsev I., Dergachev V., Nagovitsyn Yu. et al. 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. – V.41. – No.3. - P.216.
- [14]. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – V.26. – No.6. – P.759-762.
- [15]. Crowley, T.J., Lowery, T.S. How warm was the medieval warm period? // *Ambio*. – 2000. - V.29. – No.1. - P. 51-54.
- [16]. Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlén W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. // *Nature*. – 2005. – V.433. No.7026, P.613-617.
- [17]. 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. – V.337. – P.114-120.
- [18]. Usoskin I.G., Hulot G., Gallet Y., Roth R., Licht A., Joos F., Kovaltsov G.A., Thébaud E., Khokhlov A. Evidence for distinct modes of solar activity. // *Astronomy & Astrophys*. – 2014. – V.562. – P.4.
- [19]. Usoskin I.G., Mursula K., Solanki S.K., Schüssler M., Kovaltsov G.A. A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. – 2002. - V.107. – No.A11. - SSH 13-1.
- [20]. Solanki S. K., Krivova N. A., Schüssler M., Fligge M. Search for a relationship between solar cycle amplitude and length. // *Astron. Astrophys*. – 2002. – V.396. P.1029-1035.
- [21]. Zolotova N. V.; Ponyavin D. I. The Maunder Minimum is Not as Grand as it Seemed to be. // *The Astrophysical Journal*. – 2015. – V. 800. –article id. 42, 14 pp.