

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ПЕРВЫЕ ЦИКЛЫ ЭПОХ ПОНИЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. В. Н. Ишков*

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: ishkov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 08.03.2021 г.

После доработки 21.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

По однородному ряду геомагнитного индекса Aa с учетом современной шкалы интенсивности возмущений в околоземном космическом пространстве и сценария солнечной цикличности рассмотрен вопрос о распределении экстремальных и очень больших магнитных бурь, интенсивности (G5, G4), в первых циклах (12 и 24) эпох пониженной солнечной активности. Значительное уменьшение количества таких событий и солнечных активных явлений в последнем цикле может свидетельствовать о том, что пятнообразовательная и вспышечная активность в солнечном цикле 12 была значимо выше, чем в цикле 24, но значительно уступала солнечным циклам эпохи повышенной солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794021060080

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Достоверный ряд наблюдений солнечной активности

Одной из самых замечательных особенностей Солнца являются почти периодические изменения различных проявлений солнечной активности (СА) – всей совокупности наблюдаемых нестационарных явлений в атмосфере Солнца, вызывающих изменения его излучения в различных диапазонах электромагнитных волн и потоках частиц различных энергий. Уровень СА характеризуется определенными наблюдательными индексами, наиболее длительный ряд из которых имеет относительное число солнечных пятен (W), впервые введенный Р. Вольфом в 1849 г., когда в Европе была организована служба – ежедневные наблюдения солнечных пятен по одной методике на нескольких обсерваториях, чем было положено начало научных наблюдений Солнца. Кроме того, Вольф, по неполным наблюдательным данным, восстановил среднемесячные значения данного индекса с 1749 и среднегодовые с 1700 г. За первый цикл условно принят цикл СА, начавшийся в марте 1755 г., образовав тем самым “пронумерованный” ряд относительных солнечных пятен. Следует иметь в виду, что этот ряд до 1849 г. был восстановлен по довольно обрывочным данным различных европейских наблюдателей. Современные исследователи по еще более отрывоч-

ным данным отдельных телескопических наблюдений сумели качественно продлить этот ряд до 1611 г. Достоверность всех восстановленных данных несравненно ниже достоверного ряда: спектральные характеристики восстановленной части (100 лет) совершенно отличаются от достоверного ряда, и в ней присутствуют черты и характеристики отдельных циклов, которые не наблюдаются у достоверного ряда за 180 лет [Ишков и Шибаяев, 2006].

Таким образом, для научных исследований нам доступен ряд из 15 достоверных циклов СА. В работе [Shibaev and Ishkov, 2012] приведены аргументы для возможного включения (для ограниченного круга задач) циклов 8 и 9 (как условно-достоверных), которые по основным характеристикам меньше всего отличаются от достоверных солнечных циклов (СЦ). Тем самым мы расширили статистику до 17 СЦ (1834–2021 гг.).

1.2. Циклы солнечной активности

Циклы СА проявляются в регулярном, почти периодическом изменении числа пятен и других наблюдаемых на видимом диске Солнца активных образований. Полный, физический цикл СА связан с динамикой магнитного поля Солнца, имеет продолжительность в среднем 22 года и состоит из двух 11-летних циклов. Первый из них

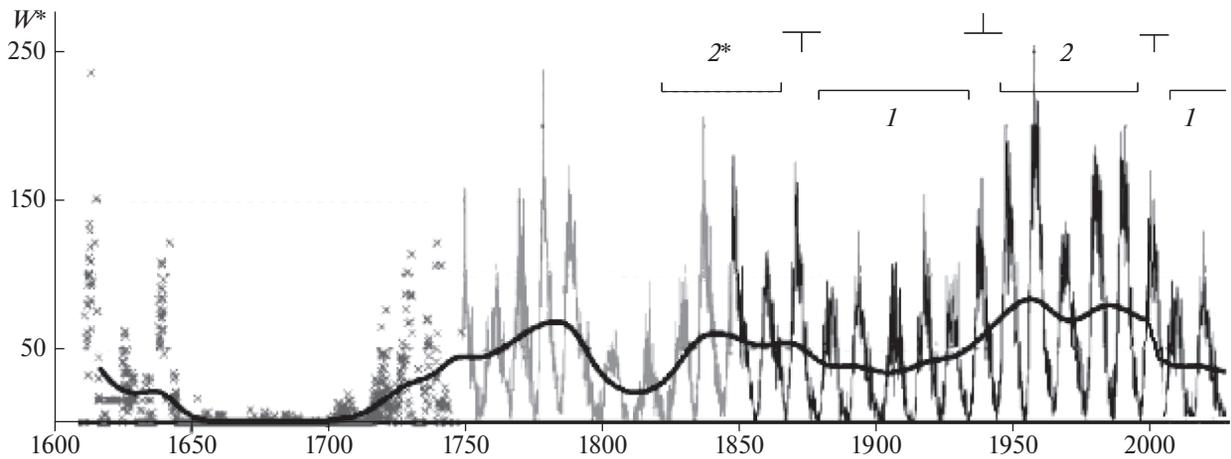


Рис. 1. Полный ряд наблюдений относительных чисел солнечных пятен. Достоверный ряд с 1849 г. (черный) с границами структурных эпох пониженной (1) и повышенной (2) СА с переходными циклами между ними. Вероятный период повышенной солнечной активности (2*), включающей СЦ 10 – 6. Вероятный ход развития 25 СЦ (последний справа). Преобразованный рисунок из Википедии <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>.

имеет четный номер и обычно имеет меньшую амплитуду.

Средний период достоверных циклических изменений составляет 10.81 лет, хотя просматривается тенденция к его уменьшению. Так, в семи солнечных циклах XX века (циклы 15–19, 21, 22) средняя продолжительность цикла составила 10.44 года. В настоящее время статистика наблюдений солнечных пятен позволяет определить сценарий солнечной цикличности, его свойства, характеристики и правила развития по достоверным (10–24 циклы) плюс условно-достоверным солнечным циклам (8 и 9) на временной шкале в 180 лет (рис. 1). Достоверный ряд относительных чисел солнечных пятен показывает удивительное постоянство в основных проявлениях развития отдельных 11- и 22-летних циклов. Структура цикличности достоверного ряда, на данной статистике, подразумевает периодическую смену эпох повышенной (СЦ → 6, 7, 8–10 и 18–22) и пониженной (СЦ 12–16 и 24 → 28¹) СА. Между этими эпохами наблюдаются переходные солнечные циклы (11, 23 и 17) – периоды, во время которых меняется характер пятнообразовательной активности, т.е. режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца [Ишков, 2013; Ishkov, 2018].

Первая эпоха пониженной солнечной активности длилась с 1878 по 1933 г. (5 солнечных циклов). Но в то время наблюдательные данные о Солнце ограничивались числами Вольфа, числом и площадями групп солнечных пятен и данными о вариациях геомагнитного поля – величиной возмущения геомагнитного поля (*Aa*-индекс) по

¹ Курсивом обозначены циклы не входящие в семейство достоверных или пока не реализовавшиеся.

двум разнесенным по полушариям среднеширотным геомагнитным обсерваториям, осуществляющим непрерывную запись состояния магнитного поля Земли, и внезапными кратковременными возрастаниями геомагнитного поля SC (внезапные начала), которые в современном понимании отражают приход в околоземное космическое пространство (ОКП) межпланетных ударных волн. Кроме того, по записям вариаций геомагнитного поля можно выделить так называемые “кроше” (от фр. *crochet* – крючок), появляющиеся в момент облучения ионосферы Земли электромагнитным излучением Солнца в максимуме достаточно мощной солнечной вспышки. Однако и по этим наблюдениям можно оценить ход развития и, в некотором приближении, характер вспышечной активности СЦ и ее геоэффективность в эпоху “пониженной” СА. Только с началом космической эры (СЦ19, начало 60-х годов XX века) наблюдения Солнца и его влияния на ОКП становятся регулярными и все более полными. Основная доля наших знаний об активных явлениях на Солнце и их влиянию на ОКП относится к эпохе повышенной СА (1944–1996 г.) и к переходному периоду между эпохами СЦ23, когда, вслед за ослаблением (больше, чем в 2 раза) общего магнитного поля Солнца, в период СЦ24 уменьшились практически все магнитные характеристики активных явлений на Солнце и, как следствие, уменьшились магнитные поля в окружающем межпланетном пространстве, и, соответственно, в ОКП [Ишков, 2018]. Так что основные характеристики геоэффективной активности первой эпохи пониженной СА, как фоновые, так и средние, стало возможным изучать только в СЦ24 – первом СЦ второй эпохи пониженной СА и в текущем СЦ25. Последний, согласно сце-

нарию достоверных СЦ, должен быть средней величины, так как внутри эпох правило Гневыве-ва—Оля на достоверном ряде неукоснительно выполнялось. Нарушения этого правила можно ожидать только в переходные периоды, что и произошло в СЦ 22–23. Наблюдения показывают, что эти два СЦ были достаточно необычными по своим характеристикам и в какой-то степени нарушали сложившуюся картину развития СЦ. По мере развития СЦ 23 стало понятно, что мы наблюдаем процессы, связанные с перестройкой условий пятнообразовательной активности от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА [Ишков, 2013], которые напрямую зависят от изменений в общем магнитном поле Солнца.

Данная работа основывается на следующих наблюдательных данных:

– достоверный ряд относительных чисел пятен за 1849–2019 гг., версия V1 – (<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>), использование версии V2 особо оговаривается;

– достоверный исправленный ряд площадей групп солнечных пятен (1874–2019 гг.) – (<http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/GPR/>);

– современная шкала воздействий солнечных активных явлений на ОКП – (<http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscale>);

– полный ряд самых длительных наблюдений геомагнитной активности – aa-индекса за 1868–2019 гг. – (<http://isgi.unistra.fr>);

– полный ряд регистрации внезапных начал геомагнитных возмущений (Geomagnetic sudden storm commencements 1868–2019 гг.) – (<http://isgi.unistra.fr>);

– каталог больших солнечных пятен и геомагнитных бурь Гринвичской обсерватории за 1874–1954 гг. [Sunspot and geomagnetic storm data, 1955].

Целью данной работы является сравнение условий реализации геоэффективных солнечных явлений и их экстремальных проявлений в ОКП в начальные СЦ эпох пониженной СА.

2. СОВРЕМЕННАЯ ШКАЛА ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ В ОКП

Напомним, что современная шкала воздействий солнечных активных явлений на ОКП оценивает такую реакцию в пятибалльной, нарастающей по интенсивности, шкале по трем позициям R, S, G (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>):

R (1–5). Электромагнитный удар – воздействие электромагнитного излучения во время развития мощной солнечной вспышки, в основном, на ионосферу (внезапные ионосферные возмущения), которое приводит к нарушениями ра-

диосвязи на временном интервале до нескольких часов. Регистрация таких событий стала возможной только с появлением и развитием прикладной радиосвязи, т.е. примерно с первой трети XX века, однако по ионосферным эффектам (sfe – solar flare effect), в первом приближении, это стало возможным с начала служебных наблюдений вариаций геомагнитного поля.

S(1–5). Солнечные протонные события (СПС) – приход в ОКП солнечных заряженных частиц больших энергий ($E \geq 10$ МэВ) – воздействуют на радиационную обстановку в окрестности Земли, создают новые и усиливают существующие радиационные пояса, вызывают рост электронной концентрации над полярными шапками, нарушая радиосвязь на полярных трассах. Постоянные наблюдения СПС стали возможными только с началом эры космических исследований, когда стала возможной регистрация заряженных частиц во всем диапазоне энергий. Необходимо отметить, что событий класса S5 с потоком протонов $\geq 10^5$ см⁻² с⁻¹ ср⁻¹ еще не наблюдалось.

G (1–5). Возмущения геомагнитного поля – магнитные бури – следствие прихода в ОКП потоков солнечной плазмы повышенной плотности, скорости частиц и температуры, с усиленным магнитным полем. Интенсивность магнитных бурь в данной позиции оценивается по планетарному 3-часовому Kp-индексу, который вычисляется по Kp-индексам 12 наземных среднеширотных магнитных обсерваторий, распределенных по земному шару.

К экстремальным событиям в этой статье относятся события, попадающие в позиции (классы) G4 и G5.

2.1. Экстремальные солнечные события и их проявления в околоземном космическом пространстве

Определение экстремальных событий [Ishkov, 2015] напрямую зависит от тех возмущений (экстремальных отклонений от фоновых значений) в ОКП, которые производят солнечные вспышечные события – вспышки и выбросы волокон, те же вспышки, только вне активных областей в слабых магнитных полях. Сами по себе солнечные активные явления даже максимальных баллов и размеров обычно вызывают интерес только в узком кругу солнечных физиков, если они не вызывают сильных магнитных бурь или мощных солнечных протонных событий. Таким образом, естественно было бы определить солнечные экстремальные события как большие мощные вспышечные явления, следствием которых в ОКП является осуществление максимальных возмущений во всех трех позициях, т.е. R4–5, S4–5, G4–5. Однако явления позиций S и G существенно за-

висят от локализации солнечного вспышечного события на видимом диске Солнца. Например, от мощного вспышечного события вблизи западного лимба Солнца возмущения геомагнитного поля (G) будут минимальны, так как большая доля энергии коронального выброса вещества от этой вспышки уйдет мимо Земли (вспышечное событие 4.11.2003 г.). Мощнейшая вспышка на восточном лимбе слабо проявится и в S , и в G , так как и солнечные протоны, и корональный выброс вещества будут направлены в сторону от Земли (события 1.06.1991 г., 6.03.1989 г.). До начала космической эры самые мощные солнечные вспышечные события можно было оценить только по эффектам, которые они вызывали в ОКП. Наблюдатели часто отмечали, что такие эффекты были связаны со вспышками, излучение от которых наблюдались в непрерывном спектре (“белом” свете), т.е. при наблюдении групп пятен на фотосфере. Впервые солнечное экстремальное вспышечное событие наблюдал Р. Кэррингтон 1.09.1859 г., как вспышку в “белом” свете [Carrington, 1859], после которой через 17h 40m в Америке и Европе были отмечены очень большая магнитная буря, серьезные нарушения проводной телеграфной связи, а полярные сияния наблюдались в Риме, в Гаване и на Гавайях. В СЦ17 подобные вспышки отмечены в конце января—начале марта 1942 г., в СЦ18 — ноябрь 1949 г., в СЦ19 — ноябрь 1960 г. и, возможно, июль 1961 г., в СЦ20 — август 1972 г., в СЦ21 — июнь, июль и декабрь 1982 г. и конец апреля 1984 г.

2.2. Магнитные бури: определение, индексы геомагнитной активности

Наиболее эффектными проявлениями воздействия солнечных вспышечных событий на поверхности Земли являются спорадические магнитные бури, причем с развитием цивилизации и появлением высокотехнологических систем, как наземных, так и космических, их воздействие становится все более ощутимым. Во время очень больших и экстремальных магнитных бурь отмечаются нарушения (в некоторых случаях катастрофические) в технологических системах, протяженных энергосистемах и трубопроводах, нарушается радиосвязь и GPS-локация, а полярные сияния наблюдаются в приэкваториальных областях. Регистрация магнитных возмущений стала возможной после создания приборов для постоянного наблюдения магнитного поля Земли и развернутой сети геомагнитных обсерваторий, реально с 1867 г. Количественной мерой геомагнитной активности на средних широтах являются индексы, среди которых по длительности достоверного ряда наблюдений первым является планетарный Aa -индекс. Он определяется по данным 2 магнитных обсерваторий в разных полушариях

Земли. Затем, с 1932 г. основным стал суточный планетарный индекс Ap , который определяется осреднением восьми 3-часовых значений ap -индекса 12 наземных среднеширотных (между 63° и 48° северной и южной геомагнитных широт) магнитных обсерваторий, по всему земному шару, и с 1947 г. индекс Dst — изменение магнитного поля из-за появления кольцевого тока в магнитосфере. Индекс Dst вычисляется по значениям H -компонента поля четырех обсерваторий, равномерно распределенных по долготе и не подвергающихся воздействию авроральной и экваториальной электроструй.

Сам класс магнитных возмущений “ G ” базируется на планетарном 3-часовом Kp -индексе, который вычисляется простым осреднением значений 12 магнитных обсерваторий, имеет 27-бальную шкалу нарастания возмущения и выражается числами от 0 до 9 со знаками $-$, 0 , $+$ от 0_0 до 9_0 . Позиция 0_0 означает исключительно спокойный период, 9_0 — бурю наибольшей интенсивности. Интенсивность магнитного возмущения за период его осуществления оценивается по наибольшему значению индекса Kp , что приводит всю шкалу “ G ” к оценке максимальной интенсивности явления, а не к оценке его мощности. Внутри класса “ G ” интенсивность магнитных бурь оценивается следующим образом: $G5$, если хотя бы один 3-часовой интервал имеет $Kp = 9$ — экстремальная (extreme) магнитная буря; $G4$ — очень большая (severe) — $Kp = 8$, $G3$ — большая (strong) — $Kp = 7$, $G2$ — умеренная (moderate) — $Kp = 6$, $G1$ — малая (minor) — $Kp = 5$.

Однако надо иметь в виду, что Kp -индекс имеет полулогарифмическую шкалу и для реальной работы более удобно применять индекс Ap — среднесуточная планетарная амплитуда в нТл наиболее возмущенного магнитного элемента D или H , получаемая осреднением отдельных восьми значений ap (соответствующих Kp) в 3-часовых интервалах за сутки. Таким образом, индекс Aa — более простой аналог Ap -индекса по двум среднеширотным магнитным обсерваториям. Соответственно, для оценки интенсивности магнитного возмущения в системе регистрации Aa -индекса воспользуемся достоверным рядом индекса Kpa , аналогом Kp , Международной службы геомагнитных индексов (<http://isgi.unistra.fr>), который измеряет амплитуду глобальной геомагнитной активности в 3-часовом интервале, приведенной к геомагнитным широтам $\pm 50^\circ$.

Корреляция между ними на общем временном интервале в среднем 0.9, хотя немного более слабая в четных СЦ и более сильная в фазах минимума и в дневные часы [Mayaud, 1972; Coffey and Egwin, 2001]. Этот результат позволяет провести сравнение значимых магнитных возмущений в системе Kpa -индекса в разных солнечных циклах всего достоверного ряда наблюдений Солнца.

Так как в большинстве работ по космической погоде используется именно NOAA шкала (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>) оценки воздействия возмущений на ОКП, мы в данной работе останемся ее рамках. Хотя для оценки мощности именно магнитных бурь существует, на наш взгляд, более объективный критерий [Gosling et al., 1991] – соответствующие индексы должны регистрироваться, по крайней мере, в трех 3-часовых интервалах за сутки: для очень большой (major) магнитной бури – индексы ($Kp_{max} \geq 8$ и $Kp \geq 6$), для большой (large) бури – ($7- \leq Kp_{max} \leq 7+$ и $Kp \geq 6$), умеренной (medium) бурей считаются все события с Kp не менее 6–, а малые (small) бури имеют $5- \leq Kp_{max} \leq 5+$.

В данной работе под термином “магнитная буря” понимается магнитное возмущение длительностью не меньше 12 ч и средний индекс Ap (Aa) возмущения достигает значения 27 (в западных странах пороговое значение $Ap = 30$). Кроме того, магнитную бурю не прерывает одиночное значение $Kp = 3(-/0/+)$, например, ряд – (4+ 5+ 3o 5– 4– 5– 3– 5– 4o) описывает одну магнитную бурю – одно событие. Магнитные возмущения длительностью менее 12 ч (три 3-часовых интервала) в данной работе относятся к среднеширотным магнитным суббурям.

3. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ БУРИ В ПЕРВЫЕ ЦИКЛЫ ЭПОХ Пониженной СА

В настоящее время стало понятным, что источниками экстремальных магнитных бурь могут быть и мощные вспышечные события, и вспышечные события средних классов (<M5) со сложным внутренним развитием. Они осуществляются в геоэффективно расположенных на видимом диске Солнца вспышечных активных областях. Составной частью этих вспышечных событий всегда являются высокоскоростные корональные выбросы вещества (КВВ) типа “гало”, занимающих в поле зрения угол в 360° , более редко – типа “частичное гало” (от 90° до 300°). Хорошим примером источника экстремальной магнитной бури является событие 18.11.2003 г., когда в рамках одной оптической вспышки (2N) осуществилось два рентгеновских всплеска класса M3.2 и M3.9, между которыми произошел выброс волокна [Srivastava et al., 2009]. Все три “подсобытия” осуществились во временном интервале ~2 ч и сопровождалась тремя КВВ. Взаимодействие этих КВВ в межпланетном пространстве вызвало в ОКП самую большую по интенсивности (G5: $Kp = 9$, $Dst = -472$ нТл), но не по мощности, магнитную бурю в СЦ23. Поэтому при определении источника экстремального возмущения необходимо, когда это возможно, учитывать всю динамику

развития данного события как на Солнце, так и в межпланетном пространстве.

Как говорилось выше, ветвь спада СЦ22 и весь СЦ23 составили переходный период между эпохой повышенной и пониженной СА, когда значительно уменьшились фоновые значения общего магнитного поля Солнца [Svalgaard, 2011] что повлекло за собой изменение режима генерации солнечных пятен в конвективной зоне. Этот процесс привел к падению величины магнитного поля во всех структурах активных явлений на Солнце от солнечных пятен, что отразилось на вспышечной активности, до корональных дыр, что отразилось на рекуррентных событиях, и, соответственно, на всех магнитных и физических характеристиках солнечного ветра, заметно снизив уровень геоэффективности их воздействия на ОКП. Наиболее представительным следствием этого процесса стало наблюдаемое падение магнитного поля и соответствующее повышение яркости в тенях солнечных пятен [Livingston et al., 2012].

Естественно ожидать, что подобный процесс постепенного снижения фоновых значений общего магнитного поля Солнца происходил и перед наступлением СЦ12, в такой же переходной период от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА с середины 10 до конца 11СЦ. Рассматривая магнитные возмущения большой интенсивности и привязывая их к ситуации на Солнце, можно, в некотором приближении, сравнить уровень геоэффективности солнечных активных явлений, состояние межпланетной среды и сделать предварительные выводы об уровне фонового общего магнитного поля Солнца в начальные циклы эпох пониженной СА.

Начальный цикл первой эпохи пониженной СА (12) начался в декабре 1878 г. с начальной величины $W_{min}^* = 2.2$ (3.7 в версии V2), с максимумом $W_{max}^* = 74.6$ (124.4) в декабре 1883 г. и окончился в феврале 1890 г. на значении $W_{min}^* = 5.0$ (8.3). Ветвь роста заняла 5.0 лет, а ветвь спада – 6.3 г., что обеспечило полное время развития цикла 11.3 г. Первая большая группа пятен ($Sp_{max} = 1155$ миллионов долей полусферы – м. д. п.) появилась в северном полушарии конце мая 1880 г., через 1.5 г. после начала цикла, первая очень большая – в апреле 1882 г. ($Sp_{max} = 2258$ м. д. п.). Всего за цикл появилось 11 очень больших групп пятен – 8 на ветви роста и 3 на ветви спада.

Первый цикл второй эпохи пониженной СА(24) начался в январе 2009 г. с начального значения $W_{min}^* = 1.7$ (2.2 в версии V2), с максимумом $W_{max}^* = 81.9$ (116.4) в апреле 2014 г. и окончился в декабре 2019 г. на еще меньшем значении $W_{min}^* = 1.3$

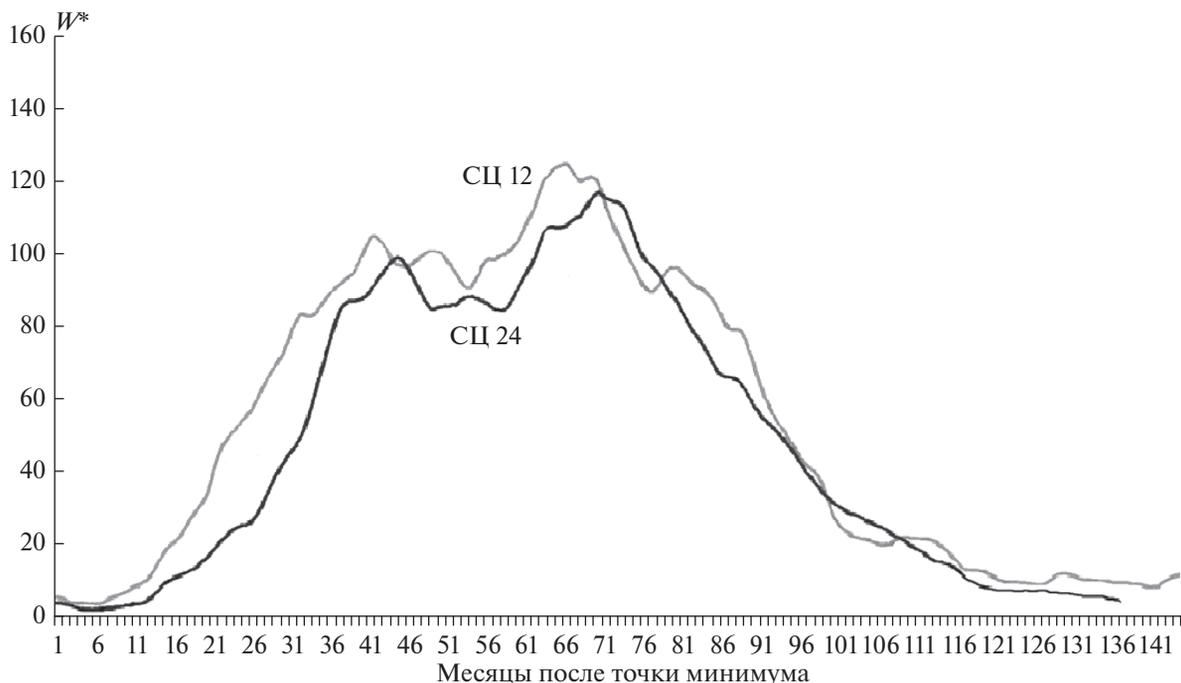


Рис. 2. Ход развития СЦ 12 и 24. Значения I^* приводятся в новой версии V2 (<http://sidc.oma.be/silso>).

(1.8). Ветвь роста продлилась 5.3 г., ветвь спада 5.7 г., полная продолжительность СЦ 24 составила 11.0 лет. Первая большая группа пятен ($S_p = 550$ м. д. п.) появилась в северном полушарии в октябре 2010 г., через 1.8 г. после начала цикла. Однако очень большая (1560 м. д. п.) группа пятен, которая оставалась таких же размеров два оборота Солнца (1580 м. д. п.), появилась только в январе 2014 г., как и единственная гигантская ($S_p = 2740$ м. д. п.) — октябрь 2014 г., все в южном полушарии. Заметим, что в СЦ12 ни одной гигантской группы пятен ($S_p \geq 2500$ м. д. п.) не отмечено, хотя очень больших с площадями больше ($S_p \sim 2000$ м.д.п.) было 4. Надо отметить, что ход развития рассматриваемых солнечных циклов, как видно из рис. 2, в большой мере похож, и их длительности практически одинаковы. У обоих (СЦ12 и 24) циклов отмечены два значимых пика, причем вторые пики и явились максимумами циклов. В обоих СЦ примерно до половины ветви роста преобладали группы пятен северного полушария, а основные максимумы обеспечила пятнообразовательная активность южного полушария (<http://users.telenet.be/j.janssens/SC24web/SC24.html#Nemarea>). Однако в СЦ12 всю ветвь спада доминировали группы пятен южного полушария, а в СЦ24 в фазе минимума снова преобладала активность северного полушария.

Полное сравнение всех характеристик и хода развития первых СЦ, да и обеих эпох пониженной СА, — это задача будущих исследований, по мере накопления наблюдений по дальнейшему

развитию второй подобной эпохи, а пока остановимся на сравнении осуществления в них значимых магнитных возмущений и, особенно, экстремальных магнитных бурь (G5, G4), приведенных в таблице 1. Время начала, максимума и конца магнитного возмущения приводится по началу 3-часового интервала *K_p*-индекса (<http://isgi.unistra.fr>). Для каждого события даются группы пятен, в которых вероятнее всего осуществилось вспышечное событие — источник магнитного возмущения, для СЦ12 из [Sunspot and geomagnetic storm data, 1955].

Согласно этому каталогу две группы пятен, в которых произошли вспышечные события — источники экстремальных магнитных бурь в СЦ12, были с очень большими площадями, превышающими 2000 м.д.п. (рис. 3). В обеих группах пятен Gr885 и Gr729 произошли вспышечные события, вызвавшие по две магнитные бури, из которых в наше рассмотрение попали обе ноябрьские и одна апрельская, так как интенсивность второй апрельской относилась к классу G3. Источниками остальных трех экстремальных магнитных бурь, по версии этого каталога, были вспышечные события, которые произошли в группах пятен с площадями, меньшими 500 м.д.п. Выше приводится пример экстремальной, самой большой в СЦ23 по интенсивности, как по *Ap*-индексу, так и по *Dst* (–472 нТл), магнитной бури ноября 2003 г. Эта магнитная буря была вызвана сложным трехступенчатым вспышечным событием среднего балла, которое произошло в группе пятен AR10501

Таблица 1. Основные характеристики экстремальных магнитных бурь первых СЦ эпох пониженной СА

№	То год мес д/ч	Tmax д/ч	Те д/ч	ΔT ч	кра нТл	Класс NOAA	SC д/ч/мин	АО Gr, NOAA
<u>СЦ12</u> (1879 I–1883 XII–1890 II); G5–3 G4–3 G3–11 G2–43 G1–78; SC 212								
1	18800812/09	12/12	14/06	45	334	G4	12/1136	Gr343
2	18810131/06	31/18	01/03	21	337	G4	31/0848	Gr412
3	18820416/12	17/12	17/18	30	536	G5	16/2312	Gr729
4	18821116/09	17/09,15 18/00-03	19/03	66	531/531 464	G5	16/0818 17/1006	Gr885
5	18821119/12	20/09-12	21/00	36	536	G5		Gr885
6	18860330/06	30/09, 18	01/09	51	337/331	G4	30/0800	Gr1860
<u>СЦ24</u> (2009 I–2014 IV–2019 XII) G4–1 G3–3 G2–24 G1–71 SC 250								
1	20150622/06	22/18	24/06	48	363		22/0544, 22/1833	AR12371

Примечание. То – год, месяц, день и час начала; Tmax – день и час максимальных значений; Те – конец; ΔT – длительность; величина кра-индекса в нТл; класс по шкале NOAA; SC – день и время прихода внезапного импульса; АО – номер группы пятен, в которой произошло вспышечное событие-источник магнитного возмущения (для СЦ12 – наиболее вероятной); Gr – номер по Гринвичу, AR – номер по NOAA. Время (всемирное – UT).

с площадью пятен $S_p = 410$ м. д. п. со сложной эволюционной и магнитной структурой. Вполне вероятно, что в случае СЦ12 мы имеем дело с подобным развитием событий, как и произошло при осуществлении единственной в СЦ24 экстремальной магнитной бурей июня 2015 г. Активная область AR12371 (рис. 4) проходила центральный меридиан видимого диска Солнца 22.06.2015 г. и имела сложную структуру в средней части группы пятен и максимальную площадь $S_p = 1180$ м. д. п. Подробное исследование этой активной области, геоэффективного вспышечного события и реакции на него ОКП [Vemareddy, 2017; Piersanti et al.,

2017; Joshi et al., 2018] показало, что и в этом случае присутствовало сложное взаимодействие корональных выбросов вещества при распространении по межпланетному пространству от двух солнечных вспышечных событий – выброса солнечного волокна 19.06/05:00 UT из юго-восточного квадранта видимого диска Солнца и вспышечного события 21.06/01:02 UT балла 1N с двумя последовательными рентгеновскими всплесками среднего класса M2.0 и M2.6, осуществившимися в интервале 1 ч в средней части активной области (рис. 4). Возмущение от первого события пришло в ОКП в виде внезапного импульса SI 22.06/05:45 UT

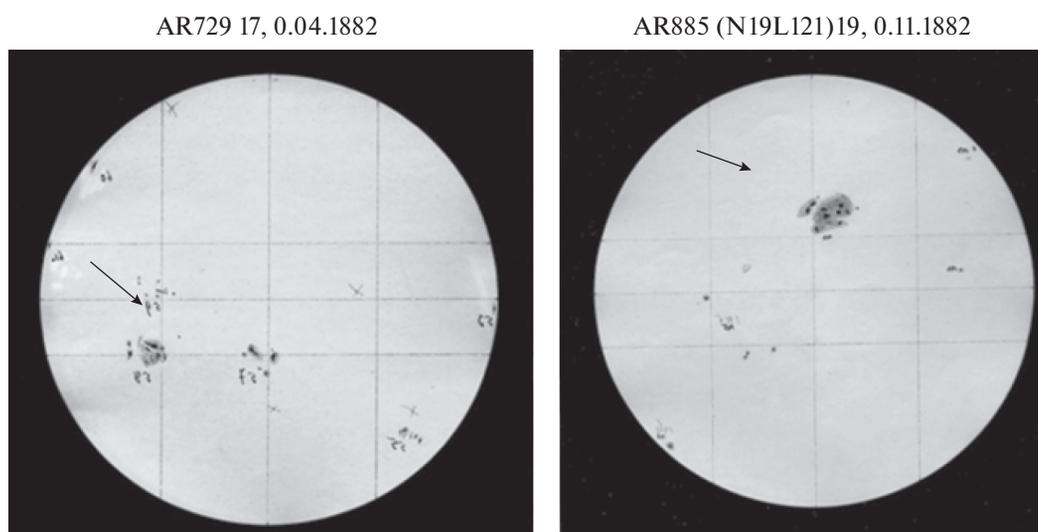
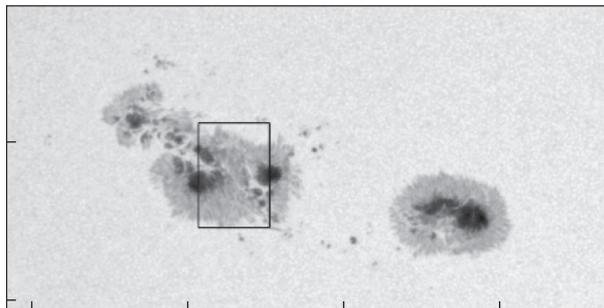


Рис. 3. Вид групп пятен Gr729 апреля 1882 г. и Gr885 ноября 1882 г. в СЦ12 на фильтограммах Гринвичской обсерватории из каталога (<http://feni.solarobs.csfk.mta.hu/GPR/>). Стрелки указывают на соответствующие группы пятен.

SDO/HMI continuum Jun. 21, 2015 00:58:25 UT



SDO/HMI longitudinal field Jun. 21, 2015 00:58:25 UT

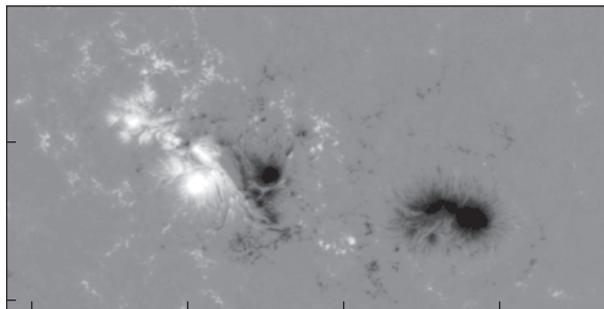


Рис. 4. Вид AR12371, верхний рисунок – фотосфера, нижний – магнитное поле [Piersanti et al., 2017]. В рамке ограничена область, где произошло геоэффективное вспышечное событие.

(19 нТл по данным геомагнитной обсерватории Гуам), дав начало магнитной буре, которая выросла до значений очень большой магнитной бури (G4) после прихода второго магнитного импульса 22.06/17:59 UT (41 нТл) от вспышки 21.06. Из вышесказанного следует, что за осуществление экстремальных магнитных бурь могут быть ответственны не только сложные вспышечные события, но и особенности распространения их возмущений в межпланетном пространстве.

Как следует из табл. 1, прошедший цикл 24 существенно уступает СЦ12 по количеству магнитных бурь всех классов, кроме малых магнитных бурь класса G1, которых примерно столько же (71/78). Все экстремальные магнитные бури, кроме одной, в 12-м СЦ осуществились на ветви роста (5/1). Такая картина в первую эпоху пониженной СА повторилась только в СЦ 16 (3/1). В остальных же циклах эпохи соотношение экстремальных магнитных бурь было либо в пользу ветви спада – 1/3 в СЦ14 и СЦ15, что характерно для эпохи повышенной СА и переходных периодов, либо равным 2/2 в СЦ13. Единственная очень большая магнитная буря класса G4 и все три большие магнитные бури класса G3 в СЦ24 произошли на ветви спада. Эти наблюдательные факты, с большой вероятностью говорят в пользу того, что геоэффективность прохождения возмущения от солнечного источника через межпла-

нетное пространство на ветви роста была существенно выше в СЦ12, чем на фазе роста СЦ24, а на фазе спада условия примерно выровнялись. Если учесть, что и очень больших групп пятен ($S_p \geq 1500$ м. д. п.) на фазе роста СЦ12 было принципиально больше (8 против 2 в СЦ24), и переходный СЦ11 между эпохами (от повышенной к пониженной) был высоким, в отличие от СЦ23 (средней величины), можно предположить, что ветвь роста СЦ12 еще попадала под влияние переходного периода. Пример такого возможного влияния переходного периода на первый цикл наступающей эпохи дает и единственный на достоверном ряде СА переходный период (СЦ17) от эпохи пониженной к эпохе повышенной СА, когда на ветви роста СЦ18, единственный раз за всю историю наблюдения солнечных пятен, появились сверхгигантские группы пятен с площадями >4000 м. д. п., а площадь самой большой достигла 6132 м. д. п. в марте 1947 г.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение однородного наблюдательного материала и использование одной системы оценки интенсивности возмущений в ОКП для экстремальных (G5) и очень больших (G4) магнитных возмущений в первые циклы эпох пониженной СА показало, что условия для осуществления высокогеоэффективных вспышечных событий, вызвавших в ОКП экстремальные магнитные бури, были более благоприятны на ветви роста СЦ12, чем на ветви роста цикла 24. За время ветви роста в цикле 24 не наблюдалось даже больших (G3) геомагнитных возмущений. На ветви спада произошло сравнительное выравнивание условий реализации рассматриваемых событий, но все равно в первую эпоху пониженной СА их было значимо больше, чем во вторую. Сравнительно одинаковым было только число малых магнитных бурь (78/71), но, как известно, они в основном рекуррентные и их источником являются корональные дыры. Асимметрия в числе магнитных возмущений, вероятно, есть следствие асимметрии пятнообразовательной активности – появления групп пятен с площадями ($S_p \geq 1000$ м. д. п.), которая в нашем случае достаточно убедительная: на фазе роста СЦ12 их появилось 38, а на фазе спада всего 16. В СЦ24 картина совсем другая, на фазе роста таких групп пятен проходило всего 8, а на фазе спада 6, то есть количество подобных групп пятен было почти одинаковым. Значимое падение солнечных активных явлений в начале второй эпохи пониженной СА, как в пятнообразовательной активности, так и в осуществлении больших магнитных возмущений, может косвенно указывать на более высокие фоновые значения общего магнитного поля Солнца в первую эпоху (СЦ12). Это привело к более высокому уровню

пятнообразовательной активности по сравнению с началом второй эпохи пониженной СА, но, конечно, существенно ниже, чем в эпохи повышенной СА. Отсюда и осуществление большего количества геоэффективных вспышечных событий, и, соответственно, создание более благоприятных условий передачи возмущений через солнечный ветер в ОКП.

Таким образом, изменения в солнечных магнитных полях и вызванные ими физические условия в межпланетной среде к началу второй эпохи пониженной СА, оказались еще более значительными, чем мы предполагали. Отсюда можно сделать предварительный вывод, что доля вспышечных событий средних баллов со сложной структурой, которые происходят в сравнительно небольших активных областях со сложной магнитной конфигурацией, была несколько выше в начальном цикле первой эпохи пониженной СА, чем в настоящее время – в начальном цикле 24 второй такой эпохи.

Поэтому наряду с накоплением наблюдательных данных по дальнейшему развитию СЦ наступившей эпохи пониженной СА, необходимо продолжить изучение и внимательно проанализировать весь имеющийся наблюдательный материал по СА первой эпохи, учитывая более тонкие вариации геомагнитного поля, связанные непосредственно с солнечными активными событиями (*croche*, *sfe*, ...) для выявления особенностей геоэффективности активных явлений того времени и возможности прогноза развития и основных характеристик СЦ наступившей эпохи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Ишков В.Н., Шубаев И.Г.* Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 70. № 10. С. 1439–1442. 2006.
- *Ишков В.Н.* Периоды “пониженной” и “повышенной” солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты / Тр. конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2013”, 25–27.09.2013. Ред. Ю.А. Наговицын. Санкт-Петербург. Пулковско: Изд.-во ВВМ. С. 111–114. http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf. 2013.
- *Ишков В.Н.* Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 6. С. 785–800. 2018.
- *Carrington R.C.* Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859 // Mon. Not. R.-Astron. Soc. V. 20(1). P. 13–15. 1859.
- *Coffey H., Erwin E.* When do the geomagnetic aa and Ap indices disagree? // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 63. № 5. P. 551–556. 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00171-1)
- *Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame S.J.* Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // J. Geophys. Res. V. 96. N A5. P. 7831–7839. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA00316>
- *Ishkov V.N.* Solar flare super-events: when they can occur and the energy limits of their realization // Sun and Geosphere. V. 10. № 1. P. 89–96. 2015. http://newsserver.stil.bas.bg/SUNGEO/00SGArhiv/SG_v10_No1_2015-pp-89-96.pdf.
- *Ishkov V.N.* Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable Wolf numbers series / Variability of the Sun and Sun-like Stars: from Asteroseismology to Space Weather. Eds. J.-P. Rozelot, E.S. Babaev. EDP Sciences Proceedings. P. 109–118. ISBN 978-2-7598-2195-2. 2018.
- *Joshi B., Ibrahim M.S., Shanmugaraju A., Chakrabarty D.* A major geoeffective CME from NOAA12371: Initiation, CME-CME interaction, and interplanetary consequences // Solar Phys. V. 293:107. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1325-2>
- *Livingston W., Penn M. J., Svalgaard L.* Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux // Astrophys. J. Lett. V. 757. L8. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8>
- *Mayaud P.N.* The aa indices: A 100-year series characterizing the magnetic activity // J. Geophys. Res. V. 77. № 34. P. 6870–6874. 1972.
- *Piersanti P., Alberti T., Bemporad A.* Comprehensive analysis of the geoeffective solar event of 21 June 2015: Effects on the magnetosphere, plasmasphere, and ionosphere systems // Solar Phys. V. 292:169. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1186-0>
- *Shibaev I., Ishkov V.* Investigation of the statistical characteristics of Wolf numbers reliable series: signs of solar cycles likelihood // 7th Scientific Conf. “Space, Ecology, Safety–2011”. 29.11–1.12.2011. Conf. Proc. Sofia. Bulgaria. SRTI Bulgar Academie Sciences. P. 297–301. <http://www.space.bas.bg/BG/magasin/SES/PROCEEDINGS%20SES%202011.pdf>. 2012.
- *Srivastava N., Shibu K., Rohan E., Wiegelmann T.* Source region of the 18 November 2003 coronal mass ejection that led to the strongest magnetic storm of cycle 23 // J. Geophys. Res. V. 114. A03107. 7 p. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013845>
- Sunspot and geomagnetic storm data derived from Greenwich Observations 1874–1954. London (H.M.S.O.), P. 106. 1955. <https://doi.org/10.1002/cj.49708235223>
- *Svalgaard L.* The mean field of the Sun. <https://www.leif.org/research>. 2011.
- *Vemareddy P.* Successive homologous Coronal Mass Ejections driven by shearing and converging motions in solar active region NOAA 12371 // The Astrophys. J. V. 845:59. 14 p. 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7ff4>