

ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ РАЗВИТИЯ
XXIV ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Current Development of the XXIV Solar Cycle

Abstract. The main characteristics and course of the current solar cycle XXIV evolution after four years of development and some signs suggesting that the current cycle is in the phase of maximum are considered. At the same time, the curve of the current solar cycle evolution is similar to the solar cycle XIV – the lowest of the authentic solar cycles. During the current solar cycle 43 large solar flares have occurred up to now, among which two flares with class $X>5$ and 13 flares with class $X\geq 1.0$. The number of geoeffective solar flare events and coronal holes is abnormally low. During the period no severe magnetic storms ($A_p\geq 100$), only one major magnetic storm ($A_p\geq 70$), two solar proton events ($E_{pr} > 10$ MeV) with a flux of protons greater than 1000 p.f.u. and only one GLE event were registered.

Абстракт. Рассмотрены основные характеристики и ход эволюции текущего 24 цикла СА после 49 месяцев развития в фазе максимума активности. Кривая развития текущего солнечного цикла проходит немного выше цикла 14 – самого низкого из достоверных. Запуск солнечной обсерватории SDO позволил с очень высоким пространственным и временным разрешениями начать изучение солнечных вспышек малых, средних (146) и больших (30) баллов, в том числе 14 протонных событий, выявить предполагавшиеся связи между вспышками и выбросами солнечных волокон и подтвердить глобальный характер даже не мощных вспышечных явлений. В то же время, геоэффективность солнечных вспышечных явлений и корональных дыр остаётся аномально низкой: за прошедшие 4 года не зарегистрировано ни одной очень большой магнитной бури ($A_p\geq 100$), всего две большие магнитные бури ($A_p\geq 70$) и лишь четыре солнечных протонных событий ($E_{pr} > 10$ МэВ) с потоком протонов больше 100 p.f.u. и только одна вспышка в космических лучах (GLE-событие).

1. Прогноз хода развития текущего и, возможно, последующих солнечных циклов, выявление периодов экстремальной вспышечной активности, как на Солнце, так и в околоземном космическом пространстве (ОКП), позволило бы избежать многих технологических аварий и катастроф. К сожалению, статистика научных исследований солнечных циклов очень коротка (с 1849 г. – середина IX цикла). На временной шкале в 163 года нам реально доступны лишь 14 циклов солнечной активности (СА). С этого времени, наблюдения солнечных пятен стали регулярно проводиться несколькими солнечными обсерваториями, положив начало *достоверному* ряду относительных чисел солнечных пятен в отличие от восстановленного по отдельным наблюдениям *пронумерованного* ряда чисел Вольфа (с 1750 г.). Недавние исследования (Ishkov V., Shibaev I. Bull. of the RASci. Phys., 2006, **70**, 1439) показали, что восстановление было низкого качества и спектральные характеристики пронумерованного и достоверного рядов совершенно разные, что закрывает возможность использования пронумерованного ряда в

научных целях. Малая статистика не даёт возможности найти механизмы образования солнечной цикличности и построить её модель. В настоящий момент в рамках уже реализованной истории достоверных солнечных циклов становится понятно, что, начиная с XXIII цикла, СА вступает в эпоху циклов средней и низкой величины. Предыдущий низкий солнечный цикл был XIV ($W^* = 64$), а самый высокий – солнечный цикл XIX ($W^* = 201$), который реализовался в окружении высоких циклов XVIII, XXI и XXII, создав вершину высокой СА продолжительностью ~ 50 лет.

2. Характеристики солнечных циклов XXII и XXIII (первый – самый высокий из чётных) дали весомые аргументы осуществившейся перестройки режима генерации солнечных магнитных полей в конвективной зоне Солнца (Ishkov V.N., Sun and Geosphere, 2010, 5(2), 43), которая изменила условия появления активных областей (АО). Признаками такой перестройки могли быть:

- появление больших групп пятен на высоких для пятнообразования широтах ($\geq 35^\circ$);
- реализация наиболее мощных солнечных вспышек в фазе максимума, а не на фазе спада;

– полное отсутствие вспышек рентгеновского класса X на фазе спада цикла, впервые со времени наблюдений солнечных вспышек;

– единственный из статистики достоверных солнечных циклов (XXII–XXIII) случай нарушения правила Гневышева–Оля, по которому нечётный солнечный цикл должен быть выше предыдущего чётного. Основным следствием такой перестройки стало значительное ослабление магнитных полей в тенях солнечных пятен и, соответственно, рост яркости теней пятен, как показано в (Livingston W., Penn M., Svalgaard L., 2012, ArJL, 757, L8), которое началось в фазе максимума XXIII цикла СА и продолжается до настоящего времени (Рис. 1).

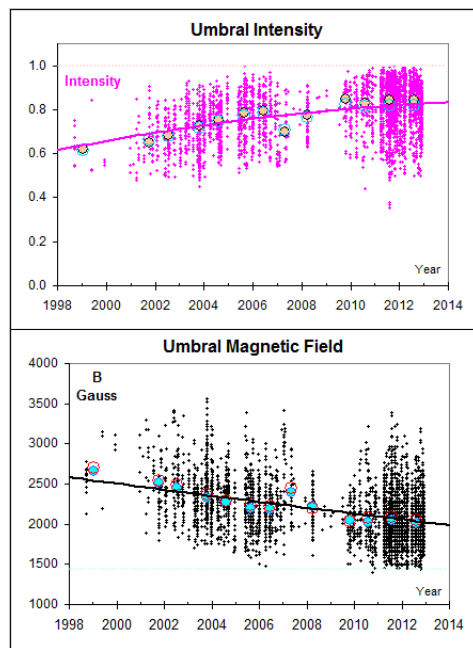


Рис. 1: Регулярное понижение напряжённости магнитного поля и, соответственно, повышение яркости в тенях солнечных пятен по наблюдениям (Livingston W, Penn M, Svalgaard L., 2012, ArJL, 757, L8).

3. Вторым возможным следствием этого процесса стала рекордно затянувшаяся фаза минимума XXIII–XXIV солнечных циклов. Фаза минимума, начавшаяся в мае 2005 г., продлилась до декабря 2010 г., захватив первые два года развития текущего XXIV цикла SA. В этот период осуществился спад относительных чисел солнечных пятен, в ходе которого как Солнце, так и гелиосфера достигли рекордно низких значений по основным параметрам. Период фазы минимума впервые дал возможность оценить и проанализировать солнечные активные явления в условиях минимальной генерации солнечных магнитных полей и получить наименьшие, фоновые значения основных наблюдательных параметров на Солнце и в межпланетной среде (Ишков В.Н., Циклы активности на Солнце и на звёздах, Сб. под ред. В.Н. Обридко, Ю.А. Наговицына, АО, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург, 2009, с.5). В предыдущий подобный период между солнечными циклами XIV и XV Солнце прошло в начале 20 века, и подробное его исследование было невозможно. Количество беспятенных дней на видимом диске Солнца в 2008 г. составило 266 дней (73% от общего количества суток в году). В первый год текущего цикла SA, 2009 г. – 260 (71%), в 2010 г. – 51 (44%), а всего за данную фазу минимума и ближайших её окрестностей (2004–2011 г.) – 821 сутки при среднем для всех достоверных циклов SA – 485 суток. Рекордсменом и здесь является фаза минимума 14–15 солнечных циклов: 1019 беспятенных дней. Абсолютный рекорд по количеству беспятенных дней за год принадлежит 1913 г. со значением 311 суток (85%). За 100 лет последовательно пятна отсутствовали в течение 92 дней в апреле, мае и июне 1913 года.

Минимальный поток радиоизлучения на 10.7 см (с 1947 г.), отмечен именно в данном минимуме, в июле 2008 г. – феврале 2009 г. он оставался на уровне ~ 68 солнечных единиц потока. По данным спутника VIRGO (Fröhlich C., A&A, 2009, 501, 3, L27) уровень солнечной постоянной в 2007–2009 годах держался на самом низком значении за всё время внеатмосферных измерений данной величины. Солнечная постоянная стала более чем на 0.2 Вт м^{-2} ниже, чем в минимуме 1996 г. Из (Gibson S.E. et al., J. Geophys. Res. 2009, **114**, A09105) следует, что наблюдения Солнца и солнечного ветра над полюсами (Ulysses) и в эклиптике показали значительные различия между последним солнечным минимумом и прошлым.

Площадь полярных корональных дыр существенно уменьшилась и магнитный поток на поверхности Солнца на полюсах на 40% слабее по сравнению с прошлым минимумом. Магнитные поля в солнечном ветре над полюсами уменьшились примерно втрое, также как и плотность (10–20%) и скорость ($\sim 3\%$) солнечного ветра. Подобные различия в средних характеристиках солнечного ветра отмечены и в ОКП: средняя напряжённость магнитного поля в солнечном ветре стала ниже на 15%, а средняя плотность солнечного ветра – на $\sim 45\%$. Однако скорость солнечного ветра у Земли возросла в среднем на 13%. Кроме того, произошла полная перестройка характерных периодов собственных колебаний, как в характеристиках солнечного ветра, так и в индексах, характеризующих авроральную зону и радиационные пояса. Существование больших приэкваториальных корональных дыр (КД) затянулось по времени на весь период фазы минимума 23 солнечного цикла. Высокоскоростные потоки солнечного ветра от этих КД стали более интенсивными, длительными, но средняя плотность частиц в них значительно упала, поэтому и степень их геоэффективности, воздействия на ОКП стало более слабым. Количество геомагнитных возмущений, достигающих уровня малых магнитных бурь резко упало, хотя сглаженное значение Ap индекса достигло своего минимума только в сентябре 2009 г. Уменьшение средней величины магнитного поля гелиосферы облегчи-

ло проникновение галактических космических лучей во внутренние области солнечной системы и привело к тому, что их поток в межпланетном пространстве значительно вырос (Ebert R. et al., J. Geophys. Res., **114**, A01109). По измерениям ядер железа с энергиями 250–450 МэВ/нуклон это увеличение достигло 20% от прошлых максимальных значений. Эти данные позволяют предположить, что получены фоновые значения параметров, описывающих состояние системы Солнце–Земля в отсутствии каких-либо вспышечных явлений.

4. Начавшийся в таких условиях текущий XXIV цикл СА после 49 месяцев своего развития вошёл в фазу максимума. Для достоверных солнечных циклов фазу максимума можно определить, как период времени, когда значения сглаженных чисел Вольфа лежат в пределах 15% от величины максимума данного солнечного цикла. Наиболее близко развитие текущего солнечного цикла пока соответствует самому низкому из достоверного ряда XIV циклу СА. Три с половиной года развития текущего цикла раскрывают его характеристики и особенности его эволюции. Текущий цикл – первый компонент физического 22-летнего солнечного цикла, и по правилу Гневнышева–Оля следующий XXV солнечный цикл должен быть выше. На данный момент цикл развивается как цикл низкой высоты ($W_{\text{макс}}^* \leq 80$). Низких циклов среди достоверных было всего три (XII, XIV, XVI), и все чётные. Одной из самых заметных характеристик достоверных низких циклов является многовершинность их фаз максимумов (рис. 1), и самый высокий из них – обычно третий – формально берётся за высоту данного цикла. В феврале 2012 г. текущий солнечный цикл прошёл первый пик своего развития, и следующие четыре месяца продолжается падение сглаженных значений относительного числа солнечных пятен. За развитием текущего солнечного цикла можно следить на странице <http://www.izmiran.ru/saf>, где каждый первый понедельник месяца публикуются основные индексы солнечной и геомагнитной активности и все изменения в пятнообразовательной и вспышечной деятельности Солнца.

Рассмотрим основные характеристики текущего цикла СА после 41 месяца его развития:

- формальное начало текущего цикла СА январь 2009 года, и начальное значение сглаженного числа Вольфа $W_{\text{мин}}^* = 1.7$;
- первая группа текущего цикла появилась в северном полушарии в январе 2009 г., а первая группа нового цикла в южном полушарии появилась только в мае 2009 г. Как правило, первые группы пятен нового цикла обычно появляются за 1–1.5 года до точки минимума (Harvey K.L. et al., Solar-Terrestrial Predictions, 1996, **5**, 77);
- начало фазы роста – апрель 2011 г. ($W = 54.4$, $F_{10.7} = 112.6$), когда видимый диск Солнца одновременно проходили сразу три группы пятен среднего размера с площадями >300 м.д.п.;
- появление первой большой ($Sp \geq 500$ м.д.п.) группы солнечных пятен – февраль 2011, а первой очень большой ($Sp \geq 1500$ м.д.п., северное полушарие Солнца) – начало ноября 2011 года;
- с началом текущего солнечного цикла наблюдается явное преобладание пятнообразовательной активности северного полушария Солнца: за три с половиной года развития (на 10.05.2012 г.) на видимом диске Солнца появилось 477 группы пятен, из которых 292 образовались в северном полушарии и 185 – в южном;
- ожидаемый максимум относительного числа солнечных пятен – вторая половина 2012 г.

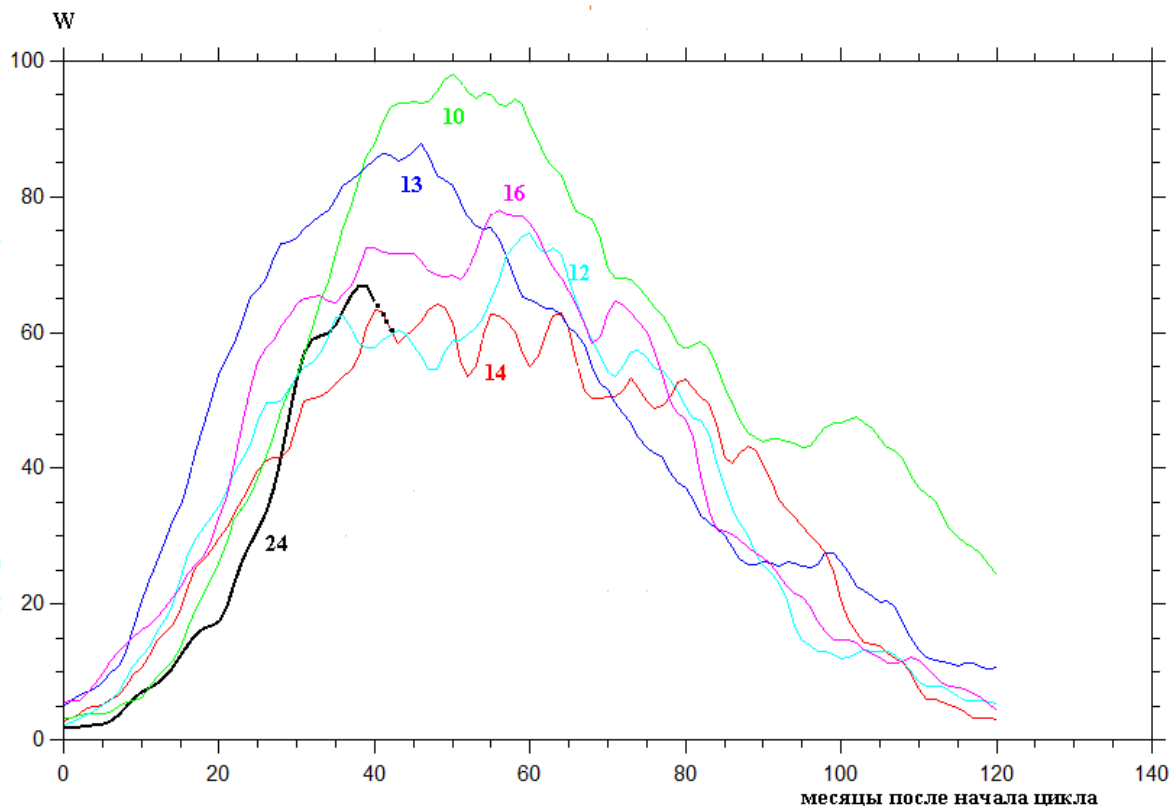


Рис. 2: Ход развития (42 месяца) XXIV цикла СА среди достоверных циклов низкой и средней (10, 13) величины по сглаженным за 13 месяцев относительным числам солнечных пятен (W^*).

За данный период развития текущего солнечного цикла видимый диск Солнца проходили 75 КД (162 прохождения), причём один оборот наблюдались 47 КД, 2 – 10 КД, 3 – три КД, 4 – девять КД, 5 – две КД, 6 – две КД и 9 – одна КД. Из КД со временем существования один солнечный оборот в северном полушарии образовались 13 КД, в южном полушарии – 23 КД, и приэкваториальных – 11 КД. Среди КД, существовавших два оборота, шесть КД локализовались в северном полушарии, одна в южном и три были приэкваториальными. Более долгоживущие корональные дыры (17) локализовались как по полушариям, так и переходили в разряд приэкваториальных и, иногда, возвращались в полушарие, где они зародились.

Первая вспышечно-активная группа пятен AR11041 (S25L052; XRI= 1.18; $M_6^{3.4}$), в которой за 29^h 19–20.01.2010 г. произошло шесть вспышек среднего рентгеновского класса. Для эволюционной характеристики группы пятен мы используем (Ишков В.Н., Астрон. вестник, 2005, **39**, 1) её порядковый номер в системе Службы Солнца NOAA US, гелиокоординаты и её вспышечный потенциал. Последний включает количество солнечных вспышек по рентгеновским классам, причём верхний индекс показывает класс самой большой вспышки по интенсивности мягкого рентгена ($1-8 \text{ \AA} = 12.5-1 \text{ кэВ}$), и вспышечный индекс группы пятен, введённый П. Мак-Интошем. Он рассчитывается по сумме вспышек баллов X и M, где вспышки X дают единицы (X5.3 даёт 5.3), а вспышки M дают десятые доли (M8.3 даёт 0.83). Первые большие вспышки осуществились уже в

феврале 2010 г. Сначала в AR11045 (N24L250; XRI=1.52; $M_8^{6.4}+C_{24}$); за 72 часа 6–9.02 осуществилось семь средних и одна большая вспышки (M6.4), а с 10.02 начала быстро усложняться магнитная конфигурация группы пятен AR11046 (N24L186, XRI=0.83; $M_1^{8.3}+C_4$) и 12.02 в ней осуществилась большая вспышка M8.3. Последняя большая солнечная вспышка произошла только в ноябре 2010 г., когда в небольшой по площади группе пятен AR11121 (S19L121, XRI=0.74; $M_3^{5.4}$) наблюдалась вспышка M5.4. Картина вспышечной активности кардинально изменилась с февраля 2011 г. AR11158 (S19L036, $S_p = 620$ м.д.п.; XRI = 3.59; $X_1^{2.2}+M_6^{6.6}$) образовалась 11.02 и уже 13.02 она выдала первую большую вспышку класса M6.6/1N, а 15.02 первую в текущем цикле вспышку класса X2.2. Всего же за 69 часов 13–16.02 АО реализовала две большие и пять вспышек средних классов. 18.02 в центральной области видимого диска Солнца образовалась группа пятен с очень быстрым развитием AR11162 (N18L336; XRI = 0.89; $M_3^{6.6}$), в которой в тот же самый день за 11 часов произошло три вспышки балла M, среди которых была и большая – класса M6.6. В первой декаде марта видимый диск Солнца проходили две большие и две группы пятен средней площади. Первая AR11165 (S22L181, $S_p = 420$ м.д.п.; XRI = 1.53; $M_6^{5.3}+C_{25}$), которая образовалась 26.02 в центральной зоне видимого диска и резко активизировалась 7.03, что привёл к тому, что 7–8.03 за 22 часа в активной области осуществились шесть значимых вспышек, среди которых была и большая балла M5.3. Вторая, AR11166 (N10L095, $S_p = 750$; XRI = 2.16; $X_1^{1.5}+M_4+C_{24}$) вышла из-за восточного лимба 1.03 большой группой пятен и до 8.03 была спокойной. 9 марта за 13 часов в ней произошли одна большая (X1.5) и две вспышки среднего класса. В первой декаде августа 2011 г. наступил следующий период больших солнечных вспышек. AR11261 (N16L330, $S_p = 390$ м.д.п.; XRI = 2.71; $M_5^{9.3}+C_{36}$) вышла из-за восточного лимба 25 июля группой средней площади и всплытие нового магнитного потока в конце суток 28 июля привело к резкому увеличению числа пятен и значительному усложнению магнитной конфигурации. Это привело к осуществлению большой солнечной вспышки балла M9.3 30.07. Новый всплывающий магнитный поток привёл к реализации ещё одного периода осуществления больших солнечных вспышек 3–4.04, когда за 23 часа в этой же АО произошли ещё две большие вспышки баллов M6.0/2B и M9.3/2B, возмущения от которых вызвали в ОКП солнечное протонное событие 4–6.08 (S1) и большую магнитную бурю 5–7.08 (G4). Вторая группа пятен AR11263 (N17L301, $S_p = 720$ м.д.п.; XRI = 7.67; $X_1^{6.9}+M_3+C_{33}$) к 7.08 выросла в категорию большой и 8–9 августа за 13 часов выдала одну, самую мощную вспышку текущего солнечного цикла балла X6.9 и две вспышки среднего балла. От большой вспышки в ОКП пришли солнечные протоны с $E > 10$ МэВ, осуществив 9.08 солнечное протонное событие интенсивностью S1. В сентябре 2011 года период осуществления больших солнечных вспышек связан с активной областью AR11283 (N12L227, $S_p = 230$ м.д.п.; XRI = 5.60; $X_2^{2.1}+M_5$), которая вышла из-за восточного лимба в конце суток 29.08 группой пятен среднего размера и новый всплывающий магнитный поток, появившийся 4.09, снова отразился лишь в быстром увеличении числа пятен и усложнением магнитной конфигурации. За 61 час 6–8.09 АО произвела четыре большие вспышки, в том числе X2.1 (6.11) и X1.8 (7.11). Возмущения от этих солнечных вспышек вызвали в ОКП умеренную магнитную бурю 9–10.09. 21.09 из-за восточного лимба Солнца вышла большая группа пятен AR11302 (N13L280, $S_p = 1300$ м.д.п.; XRI = 8.73; $X_2^{1.9}+M_{17}+C_{72}$) и за 66 часов 22–25.09 осуществились пять больших вспышек X1.4, X1.9, M7.1, M5.4, M7.4. Возмущения от этих вспышек вызвали в ОКП умеренную (26–27.09) и малую (28–29.09) магнитные

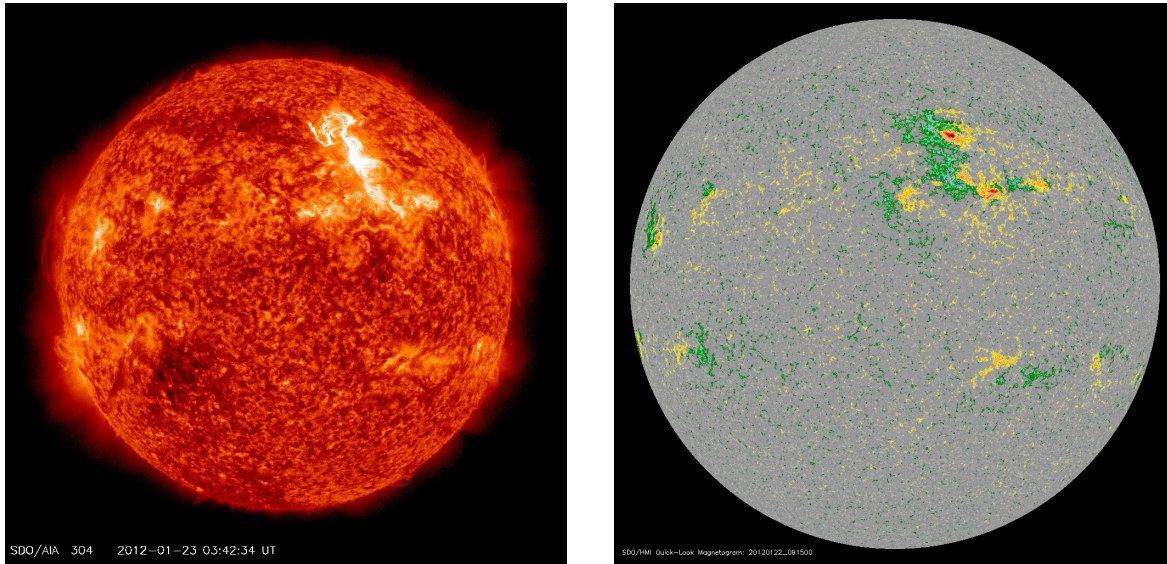


Рис. 3: На левом снимке КАО января 2012 г.: 4 АО в общем магнитном поле. На правом снимке ($\lambda = 304 \text{ \AA}$) большая протонная вспышка 23.01, захватившая оба главных компонента КАО. Снимки взяты со страниц SDO.

бури. 30.10 в полном развитии на видимый диск Солнца вышла AR11339 (N19L103, $S_p = 1540$ м.д.п.; $XRI = 4.18$; $X_1^{1.9} + M_9 + C_{38}$), в которой уже со 2.11 за 59 часов произошли большая ($X1.9$ 3.11) и пять вспышек среднего балла. 13 января 2012 г. из-за восточного лимба появились группы пятен AR11401 (N15L212, $S_p = 540$ м.д.п.; $XRI = 0.37$; $M_3^{1.7} + C_{19}$) и AR11402 (N28L211, $S_p = 630$ м.д.п.; $XRI = 2.89$; $X_1^{1.7} + M_2^{8.7} + C_9$). После очень длинной по времени (> 6 часов) вспышки M3.2/2N 19 января, в ОКП 22.01 наблюдалась умеренная магнитная буря.

Большая вспышка M8.7/2B 23.01 стала источником второго по интенсивности (6310 p.f.u. – S3) протонного события текущего солнечного цикла. И после следующей большой вспышки X1.7 27.01 в ОКП осуществилось солнечное протонное событие интенсивностью 701 p.f.u. (S2). В конце суток 1.03 на видимый диск вышли AR11429 (N18L301, $S_p = 1270$ м.д.п.; $XRI = 11.92$; $X_2^{5.4} + M_{14}^{8.4} + C_{32}$) и AR11430 (N19L319, $S_p = 200$ м.д.п.; $XRI = 1.3$; $X_1^{1.3} + C_3$). Уже с 5.03 за 46^h первая группа пятен произвела две большие вспышки класса X и 10 вспышек класса M. Последней была двойная вспышка X5.4+X1.3, которая захватила обе АО и стала источником самого большого по интенсивности (6530 p.f.u. – S3) протонного события текущего цикла SA. Кроме того быстрый CME от этого вспышечного события вызвал в ОКП 8–9.03 большую магнитную бурю ($Dst = 139$ nT). 9–10 марта в основном компоненте КАО за 38 часов осуществились две большие вспышки баллов M6.3 и M8.4. И, наконец, 13 марта на W59 осуществилась большая протонная вспышка балла M7.9 с потоком протонов в максимуме интенсивности 469 p.f.u. (S2). Следующая вспышечная серия связана с AR11476 (N12L188, $S_p = 1050$ м.д.п., $XRI = 2.01$, $M_{11}^{5.7} + C_{87}$), в которой 17.04 произошла большая (M5.1) протонная вспышка, сопровождавшаяся потоком протонов с энергией > 1 ГэВ. Это пока единственная в текущем солнечном цикле вспышка в космических лучах, отмеченная возрастанием на наземных мониторах. В начале июля резко активизировалась AR11515 (S16L205, $S_p = 900$ м.д.п.; $XRI = 8.5$; $X_1^{1.1} + M_{30}^{6.9} + C_{72}$), в которой 1.07 отмечено появление нового магнитного пото-

ка, увеличившего площадь группы пятен более чем в два раза и со 2.07 начался период осуществления значимых вспышек (пять больших), который продлился 73 часа. Эта серия вспышек вызвала в околоземном космическом пространстве два малых протонных события 7 и 9.07 и две малых магнитных бури 9 и 10.07. В это же время, 7 июля, появились первые пятна AR11520 (S16L084, Sp = 1460 м.д.п.; XRI=2.93; $X_1^{1.4} + M_5^{7.7} + C_{26}$). Уже на второй день её площадь превысила 1000 м.д.п., а 12.07 достигла максимальных значений и произвела две большие вспышки 12 и 19.07 – обе протонные. Последняя серия больших вспышек осуществилась за 57 часов 20–23 октября 2012 г. при выходе на видимый диск группы пятен AR11598 (S10L113, Sp = 420 м.д.п.; XRI = 3.33; $X_1^{1.8} + M_3^{9.0} + C_{25}$).

Итак, в текущем XXIV солнечном цикле за четыре года развития на Солнце произошло 43 больших солнечных вспышек, среди которых две вспышки с баллом $X > 5$ и 13 вспышек с баллом $X \geq 1.0$.

5. Из сказанного выше следует, что текущий цикл развивается по сценарию типичному для нормальных циклов SA: наиболее мощные вспышечные события обычно происходят на фазе спада цикла и иногда на фазе роста. С большой вероятностью солнечная активность миновала переходной период перестройки режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца и вышла (или ещё выходит?) в стационарный режим чередования низких и средних солнечных циклов аналогичных временному интервалу солнечных циклов 12–17. Можно ожидать, что правила развития циклов, таких, как правило, Гневывшева–Оля и правило осуществления самых мощных событий на ветви спада, снова будут выполняться. В таком случае 25 солнечный цикл будет выше текущего ($W^* \sim 80 - 100$). Наиболее мощные вспышечные события нас ожидают в 2015–2016 г. Ожидаемое значительное снижение числа вспышечных событий приведет к значимому уменьшению количества обычно более сильных спорадических геомагнитных возмущений и росту периодов спокойных геомагнитных условий. Ослабление режима выноса солнечных магнитных полей привело к уменьшению зоны модуляции галактических космических лучей в межпланетном пространстве и значительному росту их интенсивности в ОКП и, соответственно, к росту радиационного фона на всем протяжении солнечного цикла, а не только в эпоху минимума. Спорадический нагрев земной атмосферы значимо уменьшился, что приведёт к ещё большему загрязнению ОКП космическим мусором и другим неблагоприятным последствиям.

Учреждение РАН Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
имени Н.В. Пушкова
г. Троицк, Москва, 142190, Россия
ishkov@izmiran.ru

В.Н. Ишков
V.N. Ishkov

Поступила 1 февраля 2013 года