

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 523.98

ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ. III. СОЛНЕЧНАЯ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ В 24-М ЦИКЛЕ. РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова,
А. А. Петрукович, М. В. Кожухов

Проведен анализ структуры солнечной и геомагнитной активности 24-го солнечного цикла. Параметры солнечной и геомагнитной активности в 24-м солнечном цикле значительно отличаются от средних значений 17 – 23 циклов: суммарное число солнечных пятен уменьшается на ~50%, полная геомагнитная активность в цикле и максимальная геомагнитная активность уменьшаются на ~30%. Показано влияние снижения солнечной активности на процессы в гео- и гелиопространстве: значительное снижение в 24-м цикле потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и увеличение потоков галактических космических лучей в межпланетном пространстве. В 2009 г. на геостационарной орбите зарегистрированы минимальные величины (с 1986 г.) потоков электронов >2 МэВ (данные GOES). Потоки галактических космических лучей с энергией <1 ГэВ/нуклон в 2008 – 2009 гг. были самыми высокими по сравнению с минимумами пяти предыдущих солнечных циклов. Результаты реконструкции динамики параметров солнечной и геомагнитной активности (1870 – 2015 гг.) предполагают, что с вероятностью ~ 65 – 45 % в течение последующих 50 лет может произойти постепенное снижение солнечной активности. 24-й цикл представил реальную картину возможной динамики процессов в гео- и гелиопространстве при снижении солнечной активности.

Ключевые слова: солнечные пятна, циклы солнечной и геомагнитной активности, внешний радиационный пояс Земли, галактические космические лучи.

Введение

Предлагаемый обзор «Динамика солнечной и геомагнитной активности», состоящий из трех частей, посвящен анализу современных представлений о связи геомагнитной активности с динамическими процессами в солнечной короне. Геомагнитная активность формируется как отклик магнитосферных процессов на изменение структуры потоков солнечного ветра, то есть фактически отражает изменения структуры солнечной короны в процессе развития солнечной активности. Наиболее значительные крупномасштабные вариации геомагнитной активности (магнитные бури или штормы) связаны с влиянием корональных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра. В первой части обзора «Источники геомагнитной активности, корональная масс-эжекция, высокоскоростные потоки солнечного ветра» [1] рассмотрены основные вопросы, связанные с влиянием на геомагнитную активность изменения структуры потоков солнечного ветра при воздействии корональных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра. Во второй части обзора «Периодические вариации солнечной и геомагнитной активности» [2] для 8 циклов солнечной активности (17 – 24 циклы) рассмотрена связь 11-летних, рекуррентных и сезонных вариаций геомагнитной активности с периодическими вариациями солнечной активности. Данная часть работы посвящена рассмотрению связи структуры солнечной и геомагнитной активности для 24-го

солнечного цикла, анализируются возможные причины снижения геоэффективности 24-го цикла, рассмотрены вопросы реконструкции и наиболее вероятные сценарии развития динамики солнечной и геомагнитной активности.

Солнечная и геомагнитная активность в 24-м цикле

Рассмотрим более подробно место 24-го цикла солнечной активности в общей структуре динамики солнечной и геомагнитной активности среди 8 циклов солнечной активности (17 – 24 циклы, 1932 – 2019 гг.). Основные параметры солнечной и геомагнитной активности для 8 солнечных циклов представлены в табл. 1: $\Sigma Kp_{\text{цикл}}$ – суммарная величина Kp -индекса в цикле; $\Sigma SSN_{\text{цикл}}$ – суммарное число солнечных пятен в цикле; $Kp_{\text{макс}}$ – максимальная величина Kp -индекса для каждого цикла, указан год для $Kp_{\text{макс}}$, $SSN_{\text{макс}}$ – максимальное число солнечных пятен в цикле и указан год $SSN_{\text{макс}}$. В таблице также указаны средние для 7 циклов (17 – 23 циклы) значения следующих величин: $\Sigma Kp_{\text{цикл}}$, $Kp_{\text{макс}}$, $\Sigma SSN_{\text{цикл}}$, $SSN_{\text{макс}}$, – также указаны максимальные отклонения от средних величин. Для 24-го цикла указаны отклонения наблюдаемых величин от средних значений для 7 циклов, эти величины значительно превышают максимальные отклонения от средних величин для 7 циклов. В табл. используются средне-годовые среднесуточные величины Kp -индекса.

Таблица 1

№ цикла	$\Sigma Kp_{\text{цикл}}$	$\Sigma SSN_{\text{цикл}}$	Год $SSN_{\text{макс}}$	$SSN_{\text{макс}}$	Год $Kp_{\text{макс}}$	$Kp_{\text{макс}}$
17	185 (-6%)	1015	1937	191	1943	20,6 (-13%)
18	201	1097	1947	215	1951	24,6 (+4%)
19	194	1355 (+23%)	1957	269 (+32%)	1960	23,4
20	207 (+5%)	1005 (-9%)	1968	150	1974	23,4
21	199	1157	1979	220	1982	24,4
22	195	1054	1989	211	1991	24
23	196	1013	2000	174 (-15%)	2003	24,5
Среднее	197	1099		204		23,6
24	140 (-29%)	545 (-50%)	2014	113 (-45%)	2015	17 (-28%)

Таблица 2

Параметр	Единицы	21/22 циклы	24 цикл	Разница	Соотношение, %
Скорость, V	км/с	430	398	-32	-7%
Плотность, N_p	см ⁻³	8,01	5,74	-2,27	-28%
Температура, T_p	10 ⁵ К	1,10	0,74	-0,36	-33%
Тепловое давление, nkT	пПа	10,6	5,2	-5,4	-51%
Поток массы	10 ⁸ а.е.м./см ² ·с	3,25	2,15	-1,1	-34%
Динамическое давление	нПа	2,28	1,40	-0,88	-39%
Поток энергии	мВт/м ²	1,01	0,57	-0,44	-44%
Модуль межпланетного магнитного поля (ММП), В	нТл	6,77	4,90	-1,87	-28%

Максимальное (113) и суммарное (545) число солнечных пятен в 24-м цикле уменьшилось соответственно на 45 и 50 % относительно средних величин для 7 циклов. Уменьшение геоэффективности 24-го цикла проявляется в уменьшении на ~30% суммарной ($\Sigma Kp_{\text{цикл}}$) и максимальной ($Kp_{\text{макс}}$) геомагнитной активности, и это напрямую не связано с динамикой числа солнечных пятен. В 24-м цикле максимальная геомагнитная активность зарегистрирована через год после максимума солнечной активности. Следует отметить, что среднее за 7 циклов время запаздывания $Kp_{\text{макс}}$ составляет ~4 лет. Среди 8 солнечных циклов 24-й цикл является самым «маленьким» не только по числу солнечных пятен, но и по «производительности» (output) – в 24-м цикле зарегистрирован самый «слабый» солнечный ветер. В табл. 2 для сравнения представлены параметры потоков солнечного ветра (СВ) средние для фазы возрастания 21 и 22-го солнечных циклов (1976 – 1980 гг., 1986 – 1989 гг.) и для фазы возрастания 24-го цикла (2009 – 20 марта 2013 г.) [3]. Основные параметры СВ (плотность, температура, магнитное поле) в 24-м цикле на ~30% меньше средних величин 21/22-го циклов, динамическое давление и поток энергии уменьшаются на ~40%. Уровень геомагнитной активности зависит от числа и «мощности» (эффективности) основных управляющих структур, которые формируются при распространении в межпланетном пространстве

корональной масс-эжекции (СМЕ) и высокоскоростных потоков (HSS). Это межпланетная корональная масс-эжекция (ICME) и коротирующие области взаимодействия (CIR). Возможные причины уменьшения в 24-м цикле геоэффективности ICME и CIR при формировании магнитных бурь анализируются в работах [4 – 6]. Число магнитных бурь типа G1 ($Kp = 5$) и G2 ($Kp = 6$) в 24-м цикле по сравнению с 23-м циклом уменьшилось в ~2 раза, типа G3 ($Kp = 7$) уменьшилось в ~4,8 раза (SpaceWeatherLive.com [сайт]. – URL : <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle>). Геомагнитная активность для 17 – 24 циклов для периода возрастания солнечной активности рассмотрена в работе [4]. Уменьшение числа магнитных бурь типа G1 связано с уменьшением эффективности HSS, что в свою очередь связано со слабым магнитным полем высокоскоростных потоков (<5 нТл – минимальное значение с 1970 г.). Только 10 интенсивных магнитных бурь с $Dst < -100$ нТл (ICME-бурь) было зарегистрировано за 4 года 2009 – 2012 гг. на фазе возрастания 24-го цикла (в 23-м цикле за тот же период – 21 буря), магнитные бури с $Dst < -200$ нТл отсутствовали (в 23-м цикле – 4 бури). Отсутствие в структурах, связанных с ICME, сильного южного магнитного поля и низкая скорость СМЕ (почти равная скорости СВ) снизили геоэффективность СМЕ для вспышек типа G2 и G3 в 24-м цикле [4].

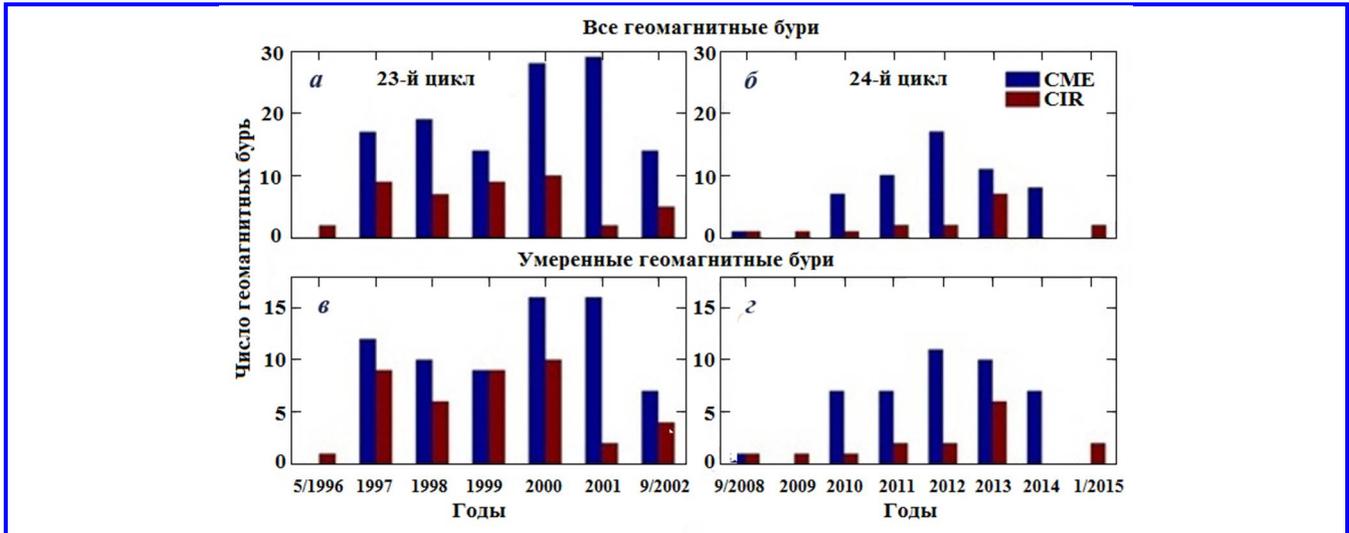


Рис. 1. Распределение полного числа магнитных бурь мощностью $\geq G2$ (а, б) и числа умеренных магнитных бурь ($-50 > Dst > -100$, $Kp \approx 6$) (в, г) для 23-го и 24-го циклов солнечной активности

Сравнение геомагнитной активности для первых 77 месяцев 23-го и 24-го солнечных циклов (фаза возрастания и максимума солнечных циклов) проведено в работе [5]. На рис. 1 для рассматриваемых периодов 23-го и 24-го циклов представлено распределение полного числа магнитных бурь мощностью $\geq G2$, связанных с ICME и CIR, вызванных HSS, и отдельно распределение числа умеренных ($-50 > Dst > -100$, $Kp \approx 6$) магнитных бурь [5].

Суммарное число магнитных бурь $\geq G2$ в 24-м цикле уменьшилось в $\sim 2,5$ раза (166/67), при этом количество умеренных и интенсивных магнитных бурь уменьшилось соответственно в ~ 2 раза (111/55) и в $\sim 4,5$ раза (54/12). Это уменьшение в основном связано с уменьшением числа CME-бурь, которые составляют основную массу умеренных (соответственно 60 и 74 % для 23-го и 24-го циклов) и интенсивных магнитных бурь (соответственно 89 и 92 % для 23-го и 24-го циклов). Следует отметить, что основные средние параметры CME (скорость, B_z -компонента ММП, поток массы при CME) – главной управляющей структуры умеренных и интенсивных магнитных бурь, не показали значительных различий для 23-го и 24-го циклов. Средние распределения величин Dst -индекса во время магнитных бурь практически подобны. Средняя угловая ширина корональных выбросов для 24-го цикла на $\sim 20^\circ$ больше. Вклад энергии СВ в магнитосферу составил $1,83 \cdot 10^{12}$ Вт для 23-го цикла и $9,93 \cdot 10^{11}$ Вт для 24-го цикла (уменьшение $\sim 45\%$) [5]. Особенности распространения корональных выбросов в «слабом» СВ в 24-м цикле проанализированы в [6]. Уменьшение в

24-м цикле на $\sim 40\%$ полного давления СВ (сумма плазменного и магнитного давления) привело к аномальному расширению корональных выбросов при их распространении в СВ. При одинаковой начальной скорости CME в 24-м цикле расширение проходит более интенсивно, например, при скорости 1000 км/с угловая ширина коронального потока будет на $\sim 38\%$ больше для 24-го цикла (130° и 185° соответственно для 23-го и 24-го циклов). Такое расширение приводит к значительному ослаблению структур ICME вблизи Земли и уменьшению вероятности образования интенсивных магнитных бурь. Следует отметить, что число корональных выбросов в обоих циклах приблизительно равно (скорость образования CME составила $\sim 1,95$ CME/day). Авторы предполагают, что уменьшение на $\sim 78\%$ числа интенсивных магнитных бурь в 24-м цикле может быть связано с уменьшением эффективности CME при распространении в слабом ветре. Формирование геоактивных параметров в структурах ICME и CIR (увеличение скорости и плотности плазмы, образование отрицательной компоненты B_z -компоненты магнитного поля) зависит от соотношения параметров окружающего СВ и параметров CME и HSS. При распространении CME и HSS в очень слабом СВ снижается вероятность образования вблизи Земли геоэффективных для возбуждения магнитных бурь структур СВ типа ICME и CIR. Анализ динамики геомагнитных бурь показал, что возможной причиной низкой геомагнитной активности 24-го солнечного цикла является уменьшение геоэффективности HSS и CME при

распространении в очень слабом ветре. Отметим некоторые достаточно важные последствия низкой «производительности» 24-го солнечного цикла, в частности, уменьшение динамического давления и межпланетного магнитного поля (IMF). Уменьшение на ~40% динамического давления СВ в 24-м цикле изменяет положение магнитопаузы. При среднем давлении 2,4 нПа (1974 – 1994 гг.) магнитопауза (подсолнечная точка) расположена на расстоянии в ~10 радиусов Земли, при уменьшении давления до 1,4 нПа расстояние увеличится до ~11 радиусов, что приведет к изменению условий пересоединения и, соответственно, к изменению структуры магнитосферных токов и условий формирования внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). Динамика электронов ВРПЗ в условиях очень низкой геомагнитной активности на примере событий минимума 23 – 24 солнечных циклов рассмотрена в работах [7 – 12]. В 2009 г. во ВРПЗ на $4 \leq L \leq 7$ (измерения на спутниках POES, GOES, LANL)

регистрировались минимальные с 1968 г. потоки электронов [7]. На рис. 2 представлена динамика потоков электронов >2 МэВ по измерениям на спутнике GOES (геостационарная орбита) с 1998 по 2014 гг. (23-й цикл и начало 24-го цикла) [7]. На рис. 2 для сопоставления показана динамика скорости СВ и AE - и Kp -индексов геомагнитной активности.

Минимальные среднегодовые величины всех параметров зарегистрированы в 2009 г. Следует отметить, что снижение потоков электронов ВРПЗ в 2009 г. наблюдалось для всех спектральных групп частиц: от электронов источника (десятки кэВ), зародышевых электронов (сотни кэВ) до релятивистских энергий. По данным измерений на спутнике LANL, в 2009 г. на геостационарной орбите значительно изменяется структура энергетических спектров: дифференциальные потоки электронов <300 кэВ в среднем по сравнению с 2007 г. уменьшаются в ~3 раза, потоки электронов 1 и 2 МэВ – в ~6 и 15 раз [8].

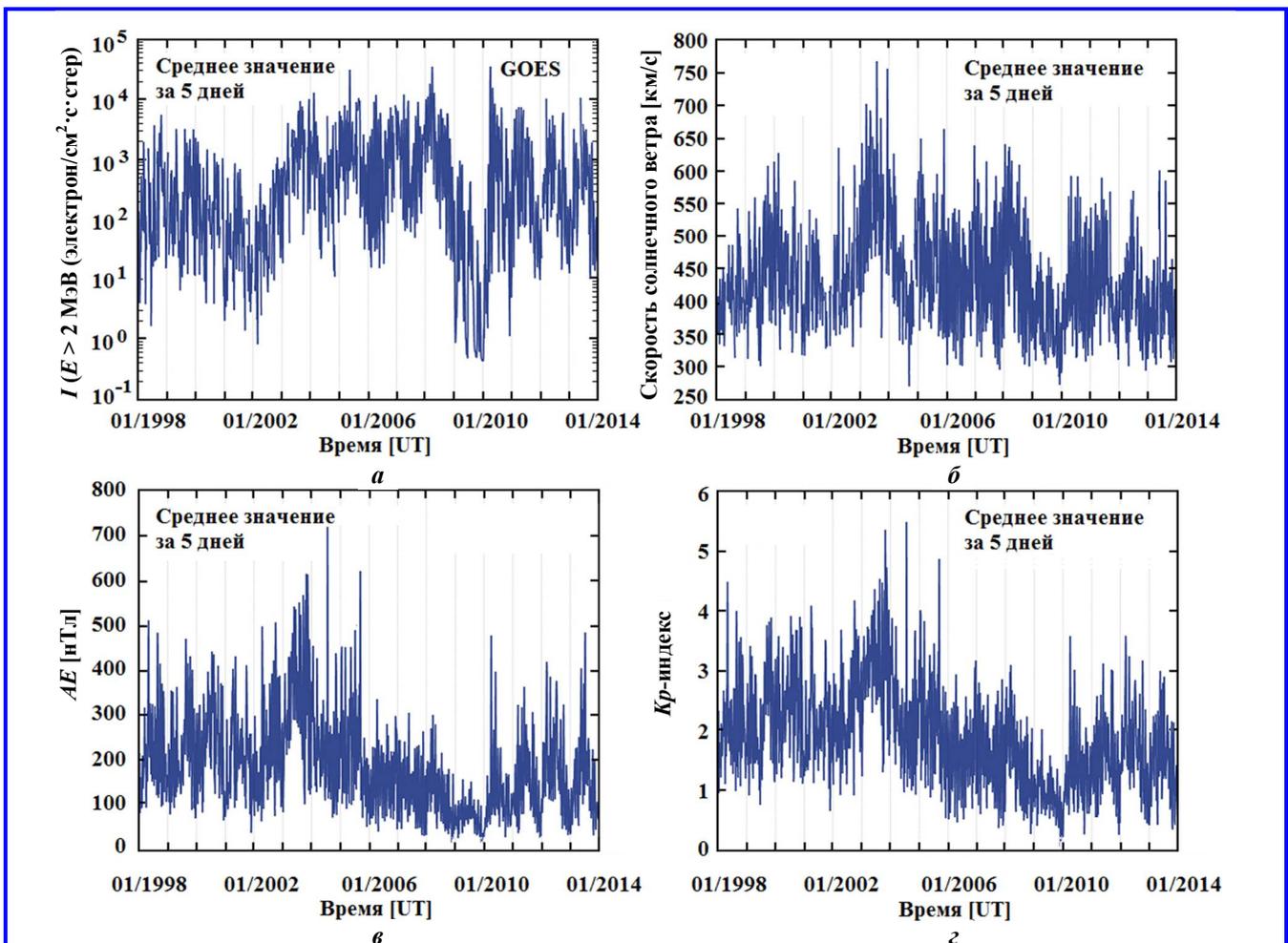


Рис. 2. Динамика потока электронов >2 МэВ на геостационарной орбите с 01/1998 г. по 01/2014 г. (а); динамика скорости солнечного ветра (б); динамика AE -индекса (в); динамика Kp -индекса (г)

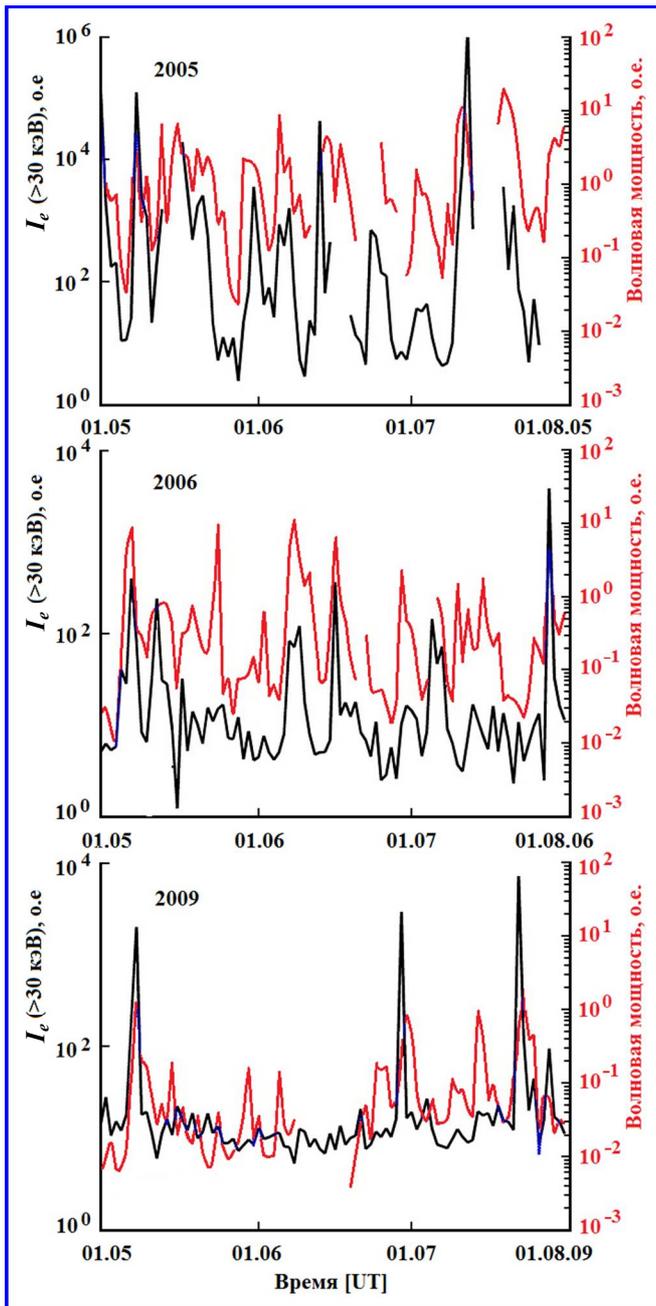


Рис. 3. Значения величины мощности ОНЧ-волн (красным цветом) и интегральных потоков высыпавшихся электронов с энергией более 30 кэВ в 2005, 2006, 2009 гг. (период май – август)

По данным измерений на спутнике DEMETER, отдельные периоды уменьшения потоков релятивистских электронов в 2009 г. совпадают с периодами уменьшения на 1 – 2 порядка интенсивности очень низких частот (ОНЧ (VLF)-волн в диапазоне $\sim 5 - 25$ кГц [9]. На рис. 3. представлены значения мощности ОНЧ-волн и интегральных потоков высыпавшихся электронов с энергией более 30 кэВ за периоды с мая по август в 2005, 2006 и 2009 гг. [9].

В течение 2005 – 2009 гг. среднегодовая мощность ОНЧ-волн уменьшается приблизительно на два порядка. Спад волновой активности в 2009 г. связан с уменьшением числа и мощности суббурь и ослаблением магнитосферной конвекции. Эти явления фактически определяют процессы формирования электронов источника и зародышевых электронов ВРПЗ и, соответственно, определяют величину потоков релятивистских электронов. Таким образом, значительное «вымывание» потока релятивистских электронов в 2009 г. связано с чрезвычайно низкими величинами межпланетного магнитного поля (~ 4 нТл) и скорости СВ (~ 364 км/с), что в свою очередь привело к чрезвычайно низкой геомагнитной активности (Kp -индекс = 8,99; Dst -индекс = $-2,9$), значительному уменьшению числа и мощности суббурь и ослаблению магнитосферной конвекции [9, 10]. Влияние параметров высокоскоростных потоков СВ (скорости и плотности) и Kp - и Dst -индексов геомагнитной активности на формирование структуры потоков электронов ВРПЗ в период минимума солнечной активности (2007 г.) рассмотрено в работах [11, 12]. Получены численные оценки влияния вариаций каждого параметра на вариации потоков электронов источника (~ 30 кэВ), зародышевых электронов ($\sim 150 - 400$ кэВ) и релятивистских электронов. Вариации электронов источника, в основном, связаны с вариациями Kp - и Dst -индексов, вариации релятивистских электронов – с вариациями скорости СВ. Результаты показывают близкое подобие (функциональное, но не численное) динамики электронов источника и релятивистских электронов при изменении скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов, но для всех соотношений величин управляющих параметров вариации интенсивности релятивистских больше. Анализ динамики потоков релятивистских электронов ВРПЗ (энергии $\sim 1,8 - 7,7$ МэВ) в 24-м цикле солнечной активности (период сентябрь 2012 г. – сентябрь 2018 г., данные двух спутников VAN ALLEN) проведен в работах [13, 14]. Возрастания потоков ультрарелятивистских электронов >3 МэВ в ВРПЗ регистрировались только при определенных условиях в СВ: магнитные бури при скоростях СВ ≥ 500 км/с и с низкой плотностью плазмы СВ, наличие южной компоненты межпланетного магнитного поля B_z , большие величины солнечного электрического поля E_y , повышенная и длительная субштормовая активность. Скорость СВ и AE -индекс геомагнитной активности во многом определяют вероятность ускорения ультрарелятивистских электронов. Следует отметить, что если

низкая «производительность» 24-го цикла привела к значительному ослаблению внутримангитосферных процессов и вымыванию потоков электронов ВРПЗ, то для гелиосферных процессов одним из чрезвычайно важных последствий уменьшения на ~30% основных параметров СВ является увеличение потоков галактических космических лучей (ГКЛ) в периоды минимума 23/24-го циклов и в 24-м цикле. В 2009 г. потоки ГКЛ с энергией <1 ГэВ/нуклон были самыми высокими за всю истории измерений на спутниках (The ACE Science Center [сайт]. – URL : <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>). На рис. 4 для 23-го и 24-го циклов представлены вариации среднегодовых дифференциальных потоков протонов ГКЛ для 6 энергетических каналов (300 – 1600 МэВ) с 1995 по 2015 гг. по измерениям на спутнике SOHO [15]. Для сравнения на рис. 4 (верхняя часть) показаны числа солнечных пятен и скорость счета нейтронного монитора Kiel – среднемесячные значения.

В среднем динамика потоков протонов повторяет стандартную картину модуляции ГКЛ: вблизи максимума солнечного цикла потоки минимальны, вблизи минимума потоки максимальны. Глубина модуляции уменьшается с увеличением энергии частиц. Сопоставим динамику потоков протонов в 23-м и 24-м циклах. В табл. 3 для сравнения приведены среднегодовые дифференциальные потоки протонов (пр/см²·стер·с·ГэВ) для энергий 292, 513, 681 и 1040 МэВ для периодов максимумов и минимумов 23-го и 24-го циклов – $J_{\min}(23)$, $J_{\max}(23)$, $J_{\min}(24)$, $J_{\max}(24)$ (столбцы 2, 3, 5, 6); приведены соотношения потоков для минимумов и максимумов циклов – $J_{\min}(23)/J_{\min}(24)$ (столбец 8), $J_{\max}(23)/J_{\max}(24)$ (столбец 9); вычислена глубина модуляции в % (как изменение интенсивности потоков между минимумами и максимумами циклов) для 23-го и 24-го циклов – $J_{\min}(23)/J_{\max}(23)$ (столбец 4) и $J_{\min}(24)/J_{\max}(24)$ (столбец 7).

Отметим ряд особенностей динамики ГКЛ в 23-м и 24-м циклах. Для минимумов и максимумов солнечной активности потоки ГКЛ в 24-м цикле солнечной активности превышают величины потоков в 23-м цикле (табл. 3), при этом увеличение потоков для максимума 24-го цикла значительно превышает увеличение для минимума цикла. Поэтому глубина модуляции в 23-м цикле (столбец 4) значительно превышает величину для 24-го цикла (столбец 7). Сравнение потоков ГКЛ для минимумов 23-го (2009 г.) и 22-го (1997 – 1998 гг.) цикла солнечной активности рассмотрено в работе [16]. В 2008 – 2009 гг. потоки ГКЛ с энергией <1 ГэВ/ нуклон были самыми высокими по сравнению с минимумами пяти предыдущих солнечных циклов (потоки ионов кислорода с энергией 176 – 238 МэВ/нуклон увеличиваются на ~22%, расчетное увеличение потоков протонов с энергией >120 МэВ составляет ~13,7%). Авторы связывают увеличение потоков ГКЛ в минимуме 23/24 циклов с изменением общей структуры параметров СВ: уменьшением на ~40% магнитного поля и динамического давления и снижением уровня флуктуаций магнитного поля.

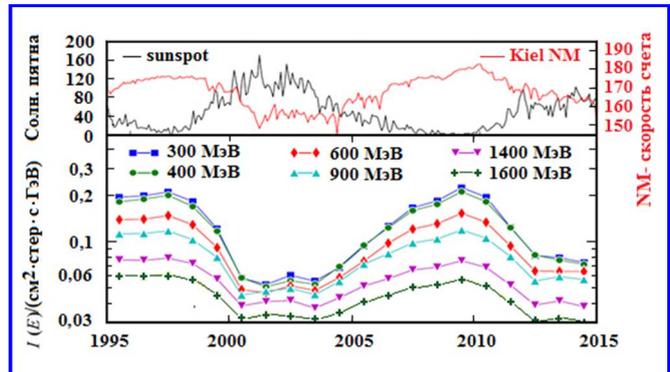


Рис. 4. Вариации среднегодовых дифференциальных потоков протонов галактических космических лучей для 6 энергетических каналов (300 – 1600 МэВ) с 1995 по 2015 гг. для 23-го и 24-го циклов

Таблица 3

Энергия, МэВ	$J_{\min}(23)$ 1997	$J_{\max}(23)$ 2001 – 2003	$J_{\min}(23)/$ $J_{\max}(23)$	$J_{\min}(24)$ 2009	$J_{\max}(24)$ 2012 – 2014	$J_{\min}(24)/$ $J_{\max}(24)$	$J_{\min}(23)/$ $J_{\min}(24)$	$J_{\max}(23)/$ $J_{\max}(24)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
292	0,212	0,057	73%	0,227	0,078	66%	7%	37%
513	0,183	0,056	69%	0,191	0,075	61%	4,4%	34%
681	0,143	0,050	65%	0,147	0,065	56%	2,7%	30%
1040	0,105	0,043	54%	0,106	0,056	47%	1%	30%

С учетом изменения всех параметров коэффициент диффузии потоков частиц в минимуме 23/24-го цикла оказался на ~44% больше по сравнению с минимумом 22/23-го цикла, кроме того, уменьшение магнитного поля увеличивает скорость дрейфа частиц, что позволяет космическим лучам более легко проникать во внутреннюю гелиосферу. Соотношение между средними величинами параметров потоков СВ для фазы возрастания 23-го (1996 – 2000 гг.) и 24-го (2009 – 2014 гг.) солнечных циклов представлено в работе [17]. Динамика параметров СВ для фаз возрастания 23-го и 24-го циклов фактически повторяет динамику параметров для минимумов солнечных циклов: магнитное поле, плотность и температура в 24-м цикле меньше на ~20%. Динамика потоков ГКЛ для фазы возрастания 23-го и 24-го циклов фактически повторяет динамику потоков для минимумов циклов: потоки увеличиваются (табл. 3). Таким образом, низкая «производительность» слабого 24-го солнечного цикла (уменьшение на ~30% основных параметров солнечного ветра) сопровождается общим повышением в межпланетном пространстве фона ГКЛ в течение всего цикла в 2008 – 2019 гг. С увеличением интенсивности ГКЛ связано значительное увеличение в 2009 г. радиационных дозовых нагрузок для космических аппаратов (увеличение на ~14% по сравнению 2007 г.) [16, 18]. Потоки ГКЛ являются основным постоянным источником радиационной опасности для полетов в межпланетном пространстве. Долговременная динамика потоков ГКЛ и, соответственно, прогноз динамики солнечной активности определяют длительность и время реализации космических миссий.

Реконструкция динамики солнечной и геомагнитной активности

Целый ряд вопросов о динамике солнечной активности, ее прошлом и о дальнейшем развитии возник в связи с солнечной активностью 24-го цикла. Можно ли рассматривать резкое уменьшение суммарного числа солнечных пятен в 24-м цикле (на 50% относительно среднего за 17 – 23 циклы) как возможное начало длительного периода снижения солнечной активности и наблюдались ли подобные события в прошлом. Реконструкция динамики числа солнечных пятен и параметров СВ (скорости, плотности и температуры плазмы, межпланетного магнитного поля, мощности открытых магнитных потоков) за ~400-летний период солнечной активности проведена в работах [19 – 22]. В качестве исходного материала для реконструкции привлекается историческая серия пяти типов данных: солнечные пятна, геомагнитные индексы (*aa*- и *Ap*-индексы), магнитограммы солнечных магнитных полей, относительная

распространенность космогенных изотопов Be^{10} и C^{14} и результаты измерений на космических аппаратах за последние 60 лет. На рис. 5 для периода 1612 – 2015 гг. показаны результаты реконструкции – годовые числа солнечных пятен (R) и параметры солнечного ветра вблизи Земли: межпланетное магнитное поле (B_{IMF} , нТл), скорость (V_{sw} , км/с) и плотность (N_{sw} , $10^6/m^3$) солнечного ветра [21]. На нижней панели показана реконструированная динамика магнитного дипольного момента Земли (M_E , $10^{22} A/m^2$).

Динамика среднегодовых величин *Ap*-индекса геомагнитной активности для периода 1613 – 2013 гг. показана на рис. 6 [22].

Динамика числа солнечных пятен с 1700 по 2018 гг. показана на рис. 7, с 1700 по 1750 гг. – это среднегодовые величины, далее даны 13-месячные сглаженные значения (данные с сайта <http://sidc.be/silso>).

Можно выделить три длительных периода чрезвычайно низкой солнечной и геомагнитной активности: ~1635 – 1715 гг. (Maunder minimum – MM), ~7 циклов солнечной активности; ~1785 – 1830 гг. (Dalton minimum – DM) ~3 цикла солнечной активности; ~1880 – 1910 гг. (Gleissberg minimum – GM) ~3 цикла. 24-й солнечный цикл оказался достаточно ординарным событием за почти 400-летнюю историю солнечной активности, подобная низкая солнечная активность (число солнечных пятен <100) наблюдалась в периоды MM и DM. На рис. 6 периоды MM и DM выделены голубым цветом, розовым отмечен период значительного усиления солнечной активности 1940 – 2000 гг. (Modern Grand Maximum – MGM). На рис. 8 представлена динамика гелиосферного магнитного поля (HMF) вблизи Земли за период 1428 – 2005 гг. [23].

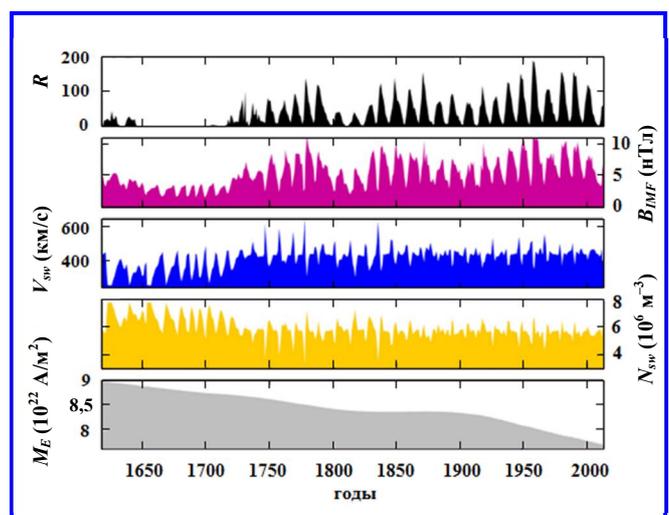


Рис. 5. Для периода 1612 – 2015 гг. показаны годовые числа солнечных пятен (R) и параметры солнечного ветра вблизи Земли

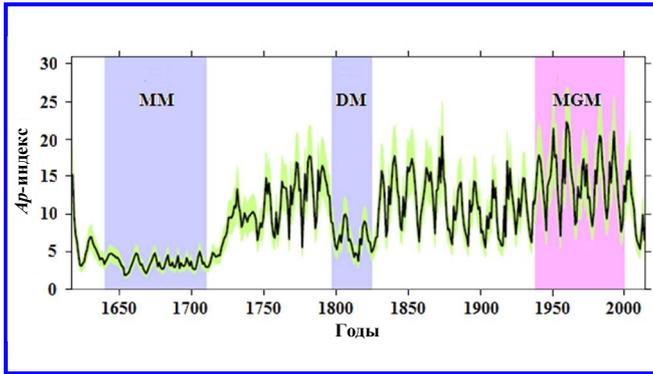


Рис. 6. Динамика среднегодовых величин A_p -индекса геомагнитной активности (реконструкция) для периода 1613 – 2013 гг.

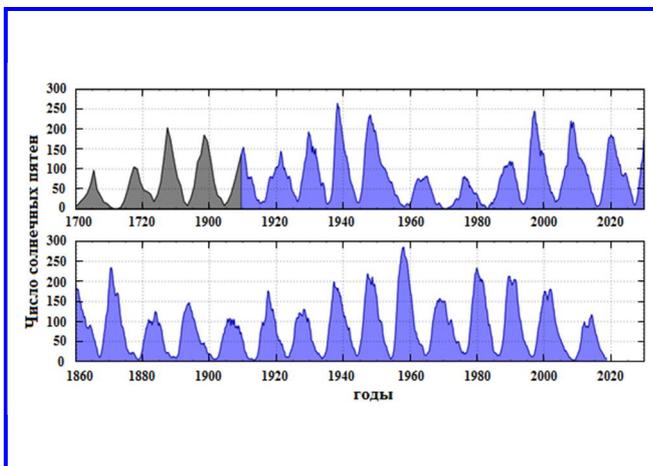


Рис. 7. Динамика числа солнечных пятен с 1700 по 2018 гг.: с 1700 по 1750 гг. – среднегодовые величины, далее даны 13-месячные сглаженные значения

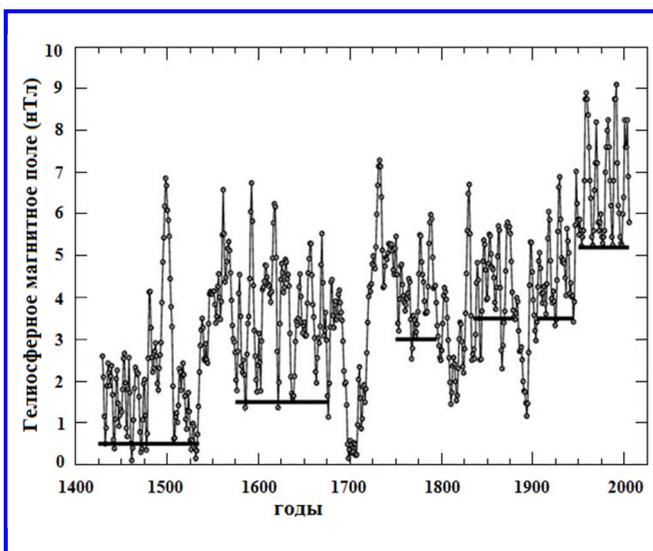


Рис. 8. Динамика гелиосферного магнитного поля вблизи Земли за период 1428 – 2005 гг.

Следует отметить две очень важных особенности в динамике НМФ. В течение приблизительно 6 столетий регистрируется устойчивый рост среднего за цикл магнитного поля, от 1,5 нТл в 1450 – 1550 гг. (Spoerer Minimum – SpM) до ~7 нТл после 1954 г. (период MGM). Средние для выделенных периодов минимальные величины показаны на рис. 8 прямыми линиями. Эти величины отражают динамику средней минимальной магнитной производительности солнечной активности. Для солнечных минимумов минимальные значения НМФ увеличиваются в ~3 раза между SpM и MM (1,5/0,5 нТл), в ~2 раза между MM и DM, в ~3,5 раза между MM и современной эпохой (5,2/1,5 нТл) и в ~1,73 раза между DM и современной эпохой (5,2/3 нТл). В течение 600 лет наблюдается постепенное увеличение средних минимальных величин для солнечных минимумов. Уменьшение средней интенсивности ГКЛ в течение 6 столетий является прямым следствием увеличения среднего НМФ. Увеличение среднего НМФ связано с увеличением в течение 6 столетий полного магнитного потока солнечных магнитных полей. Динамика солнечных магнитных полей фактически определяет динамику солнечной активности. Гелиосферное магнитное поле как часть коронального магнитного поля, которая вытягивается в гелиосферу солнечным ветром, отражает динамику открытых солнечных магнитных потоков – OSF (Open Solar Flux). Реконструкция динамики OSF (OSF – это компонента коронального магнитного поля, которая вытягивается в гелиосферу солнечным ветром) для периода 1612 – 2013 гг. представлена на рис. 9 [24].

На рис. 9 разными цветами отмечена динамика OSF, полученная при использовании разных исходных данных. Темная площадь показывает среднегодовые величины OSF, когда при реконструкции предполагалось, что источник OSF пропорционален числу солнечных пятен. Зеленым цветом отмечены среднегодовые величины OSF, полученные при использовании геомагнитных данных и данных измерений параметров СВ на спутниках. Значения OSF, полученные при использовании 10-летних средних по интенсивности космогенных изотопов выделены голубым (для ^{14}C) и красным (для ^{10}Be). Следует отметить близкое подобие динамики OSF, полученной при использовании разных исходных данных. В периоды Maunder, Dalton и Gleissberg минимумов наблюдалось значительное снижение солнечных магнитных потоков, это периоды низкой солнечной активности [24]. По данным измерений на спутниках (данные с ~1965 г.) значительное снижение OSF зарегистрировано для периода минимума 23/24-го циклов и на фазе роста 24-го цикла (данные на рис. 9 до ~2013 года).

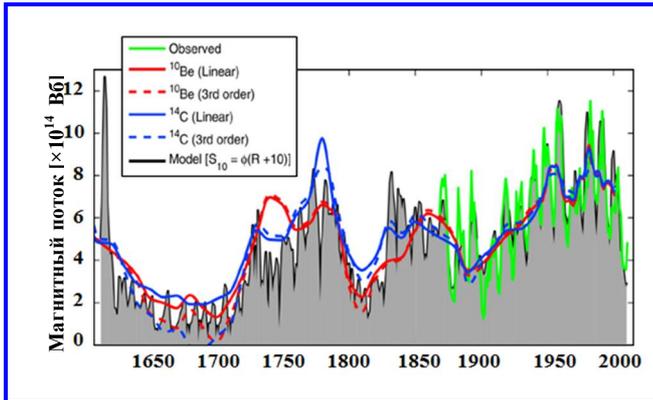


Рис. 9. Реконструкция динамики открытых солнечных магнитных потоков для периода 1612 – 2013 гг.

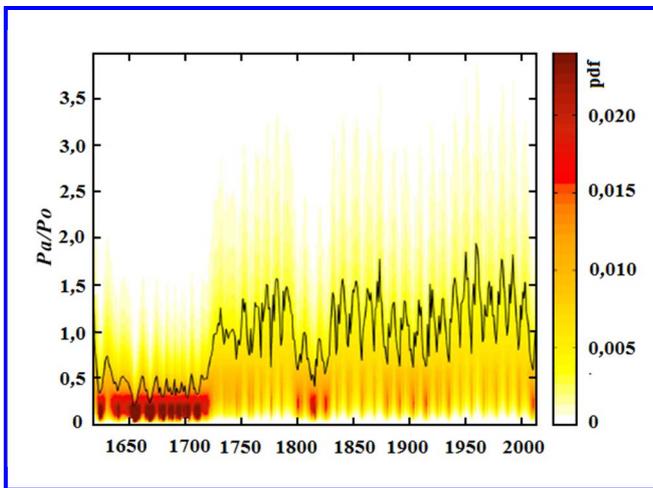


Рис. 10. Динамика (реконструкция) годовых величин мощности P_a , вкладываемой в магнитосферу потоками СВ для периода 1612 – 2013 гг. Шкала распределения вероятности величин $(P_a)_{\text{сут}}/P_o$ показана справа цветными контурами

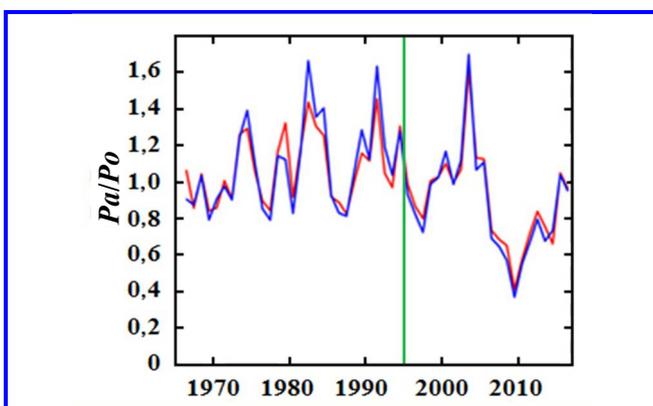


Рис. 11. Динамика годовых величин P_a мощности, вкладываемой в магнитосферу Земли потоками солнечного ветра в период с 1965 по 2015 гг. (экспериментальные величины)

Величина OSF для минимума 23/24-го циклов близка к средним значениям OSF для Dalton и Gleissberg минимумов (разброс величин OSF для этих периодов достаточно большой). При низкой солнечной активности уменьшается вклад энергии СВ в магнитосферу Земли. Динамика мощности, вкладываемой в магнитосферу потоками СВ, отражает динамику открытых солнечных магнитных потоков – OSF. На рис. 10 для периода 1612 – 2013 гг. показана динамика (реконструкция) годовых величин мощности P_a , вкладываемой в магнитосферу потоками СВ [21].

Мощность P_a нормирована на величину средней мощности P_o ($P_o \approx 5,7 \cdot 10^{18}$ Вт), вычисленной по измерениям на спутниках в 1964 – 2016 гг. Цветные контуры дают распределение вероятности среднесуточных величин нормированной мощности в ячейках при $(P_a)_{\text{сут}}/P_o = 0,01$. Минимальная мощность регистрируется вблизи минимумов солнечной активности. На рис. 11 более подробно показана динамика годовых величин P_a/P_o для периода с 1965 по 2015 гг. [25].

Разными цветами отмечены P_a/P_o , полученные с использованием разных способов усреднения данных (коэффициент корреляции $>0,96$). Зеленой вертикальной линией отмечено начало использования непрерывного потока данных со спутников ACE и WIND (когда нет необходимости аппроксимации данных при наличии пропусков). Следует отметить, что мощность $P_a/P_o \approx 0,4$, вкладываемая в магнитосферу в 2009 – 2010 гг. (минимум 23/24-го циклов) близка к средним значениям мощности, характерной для минимумов солнечных циклов для Maunder минимума. Мощность $P_a/P_o \approx 1$, вкладываемая в магнитосферу в 2014 г. (максимум 24 цикла), близка к средним значениям мощности, характерной для максимумов солнечных циклов для Dalton минимума. Динамика вкладываемой в магнитосферу мощности стала основой для реконструкции динамики геомагнитной активности. Оценка средних величин A_p - и AE -индексов геомагнитной активности для Maunder, Dalton минимумов и периода Modern Grand Maximum (1940 – 2000 гг.) проведена в работе [22]. По сравнению с периодом MGM для периода Dalton минимума среднегодовые величины A_p - и AE -индексов меньше в $\sim 2,2$ раза, для периода Maunder минимума меньше в $\sim 4,5$ раза. Значительно меньше по сравнению с периодом MGM среднегодовое число дней с сильной A_p ($A_p > 38$ нТл) и AE ($AE_0 > 650$) активностью: для AE -индекса падение в $\sim 3,7$ раза и в ~ 18 раз соответственно для Dalton и Maunder минимумов; для A_p -индекса падение в $\sim 12,5$ раз для Dalton минимума, в период Maunder минимума дни высокой AE -активности не наблюдались. При снижении солнечной активности

уменьшается число рекуррентных высокоскоростных потоков и число достаточно мощных СМЕ и, соответственно, число CIR-бурь и СМЕ-бурь, значительно снижается общая геомагнитная активность (рис. 6). В случае реализации условий солнечной активности, характерных для Maunder минимума значительно изменится форма и размер магнитосферы Земли. При уменьшении динамического давления до $\sim 1,4$ нПа [20] магнитопауза в период ММ будет расположена на расстоянии ~ 11 радиусов Земли. Ширина хвоста магнитосферы в основном формируется статическим давлением СВ. Увеличение статического давления за счет увеличения плотности СВ (уменьшение магнитного поля влияет меньше, см. рис. 5) в период ММ приводит к уменьшению поперечных размеров хвоста магнитосферы. СВ фактически будет обтекать препятствие с меньшей поперечной площадью. Это одновременно с уменьшением солнечного электрического поля (в связи с уменьшением скорости СВ и магнитного поля) может привести к уменьшению потенциала и площади полярной шапки. Сравнение результатов реконструкции числа солнечных пятен и НМФ с параметрами СВ для 24-го цикла солнечной активности показало возможность реализации с некоторой вероятностью вблизи Земли условий Dalton, Gleissberg и даже Maunder минимумов. Значительное снижение динамического давления СВ, скорости СВ, силы и уровня турбулентности НМФ (рис. 5, табл. 2) приводят к увеличению параллельного коэффициента диффузии частиц и дрейфовой скорости частиц ГКЛ. При этих условиях поток ГКЛ вблизи Земли должен значительно увеличиться. На рис. 12 представлены реконструированные дифференциальные спектры протонов для энергий 100 МэВ – 10 ГэВ в предположении реализации трех минимумов ММ, DM и GM, там же для сравнения представлен средний дифференциальный спектр протонов для солнечных минимумов 1965 и 1996 гг. (Solar Min) [26].

В среднем с увеличением солнечной активности (при увеличении НМФ) потоки ГКЛ вблизи Земли уменьшаются. Следует отметить, что для периодов минимумов Maunder, Dalton и Solar Min вариации дифференциальных потоков протонов 500 МэВ (рис. 12) обратно пропорциональны (с точностью $\sim 15\%$) вариациям минимальных средних величин магнитного поля (рис. 8). Обозначим FMM – поток протонов 500 МэВ для ММ, НМФММ – величина среднего минимального магнитного поля для ММ, остальные обозначения формируются аналогичным образом: FDM и FSM – потоки протонов 500 МэВ для DM и SM, НМФDM и НМФSM – значения среднего минимального магнитного поля для DM и SM. По данным рис. 6 и 10 получены следующие соотношения: FMM/FSM $\approx 3,5$, НМФSM/НМФММ $\approx 3,5$; FMM/FDM $\approx 1,75$, НМФDM/НМФММ ≈ 2 ; FDM/FSM ≈ 2 , НМФSM/НМФDM $\approx 1,73$. Подобные соотношения регистрируются и для протонов 1 ГэВ.

Таким образом, в среднем долговременные вариации потоков ГКЛ ≥ 500 МэВ формируются вариациями средних минимальных величин магнитного поля для минимумов солнечной активности. Эмпирическая модель долговременных вариаций потоков ГКЛ предложена в работе [27]. В работе рассмотрена динамика потоков ГКЛ (протоны 100 и 500 МэВ) в связи с динамикой числа солнечных пятен для 21 – 26 солнечных циклов (для 25-го и 26-го циклов используются реконструируемые величины числа солнечных пятен, для 21 – 24 циклов до 2014 г. – экспериментальные значения). В соответствии с предполагаемой динамикой числа солнечных пятен в 25-м и 24-м солнечных циклах (постепенное уменьшение числа солнечных пятен и в максимумах и в минимумах циклов) с 2013 по 2042 гг. должно происходить постепенное увеличение потоков ГКЛ как в периоды максимумов циклов, так и в периоды минимумов солнечной активности. После 21-го цикла постепенно уменьшается соотношение между числом солнечных пятен в максимуме и минимуме солнечного цикла (за счет более значительного снижения числа солнечных пятен для солнечных максимумов), поэтому постепенно уменьшается разница между потоками ГКЛ для минимумов и максимумов солнечных циклов. По сравнению с максимумом 23-го цикла в максимуме 25-го цикла потоки протонов 500 МэВ могут увеличиться в $\sim 1,5$ раза. 24-й солнечный цикл показал, что при снижении солнечной активности увеличивается вероятность возникновения целого ряда опасных явлений, формируемых в магнитосфере Земли и в целом в гелиосфере.

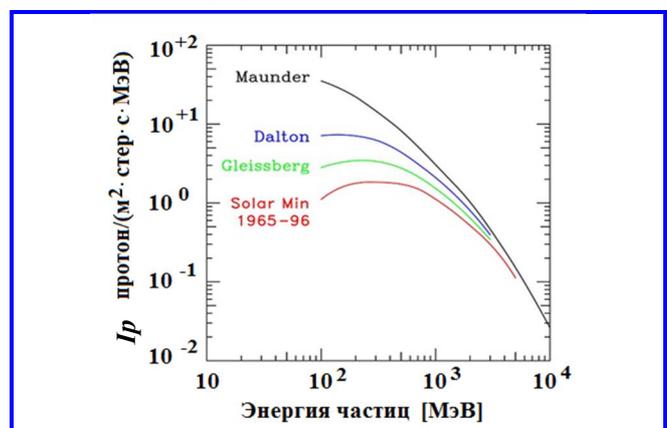


Рис. 12. Реконструированные дифференциальные спектры протонов для энергий 100 МэВ – 10 ГэВ в предположении реализации минимумов

Но как показала реконструкция (за ~600 лет) общей динамики солнечной активности, подобные понижения солнечной активности наблюдались неоднократно в периоды Dalton, Gleissberg и Maunder минимумов. По какому сценарию будет развиваться солнечная активность после 24-го солнечного цикла и насколько вероятно повторение Dalton и Gleissberg или даже Maunder минимумов? В настоящее время в связи с широким использованием околоземного пространства, а в недалеком будущем и межпланетного пространства предсказания динамики солнечной активности оказались чрезвычайно актуальными и фактически показывают возможности эксплуатации космического пространства. Для предсказания динамики солнечной активности после 24-го солнечного цикла, как правило, используются временные ряды (имеющиеся или реконструированные) данных для отдельных параметров солнечной активности (число солнечных пятен, площадь солнечных пятен, солнечные магнитные поля) и проводится анализ корреляционных связей между солнечными параметрами для отдельных циклов или для группы циклов. Динамика средних 13-месячных сглаженных величин площади групп солнечных пятен для 12 – 24 солнечных циклов анализируется в работе [28]. Результаты показывают, что существует значительная корреляция величин площади для последовательности трех циклов: солнечное динамо сохраняет память по крайней мере о трех циклах. Были получены следующие данные. Длина (протяженность) 24-го, 25-го и 26-го циклов равна соответственно $11,5 \pm 0,15$ лет, $11,2 \pm 0,2$ года и $11,45 \pm 0,3$ года, максимумы солнечной активности будут достигнуты в мае 2025 г. для 25-го цикла и в марте 2036 г. для 26-го цикла. В работе [29] на примере событий 23-го и 24-го солнечных циклов проведен анализ стохастических вариаций параметров активных областей, возникающих в новом цикле. Предполагается, что максимум 25-го цикла будет достигнут в $2025,3^{+0,85}_{-1,05}$ году, в максимуме число солнечных пятен равно $\sim 89^{+29}_{-14}$ (среднемесячная сглаженная величина). Предсказание динамики солнечной активности в работе [30] основано на анализе динамики 13-месячных сглаженных величин солнечных пятен для 1 – 24 циклов (при этом из временного ряда удалены низкочастотные составляющие). Предлагается некоторая качественная картина динамики солнечной активности для 25 – 30 солнечных циклов: 25-й цикл будет слабее 24-го цикла; 25-й и 26-й циклы по мощности прибли-

зительно одинаковы, 27-й цикл будет сильнее 26-го цикла и слабее 28-го; 29-й цикл будет сильнее 28-го и 30-го циклов и покажет максимальную для этого периода активность. Минимальная солнечная активность будет наблюдаться для периодов 25-го и 26-го солнечных циклов. Методика вычисления вероятности распределения солнечных и геомагнитных параметров при реконструкции динамики солнечной активности разработана в [21, 24, 31]. На рис. 13 [24] для периода 1870 – 2060 гг. представлены наблюдаемые в прошлом и предсказанные будущие вариации солнечной и геомагнитной активности: число солнечных пятен, R (а); величина межпланетного магнитного поля, B , нТл (б); скорость счета нейтронного монитора Oulu (Oulu neutron monitor, O_{nm}) (в); значение aa -индекса геомагнитной активности (г). Черные линии для величин R , aa -индекса и после 1963 г. для B и O_{nm} – среднемесячные экспериментальные значения. Лиловыми линиями показаны реконструированные среднегодовые значения B и O_{nm} . Отметим близкое подобие реконструированных и экспериментальных величин B и O_{nm} .

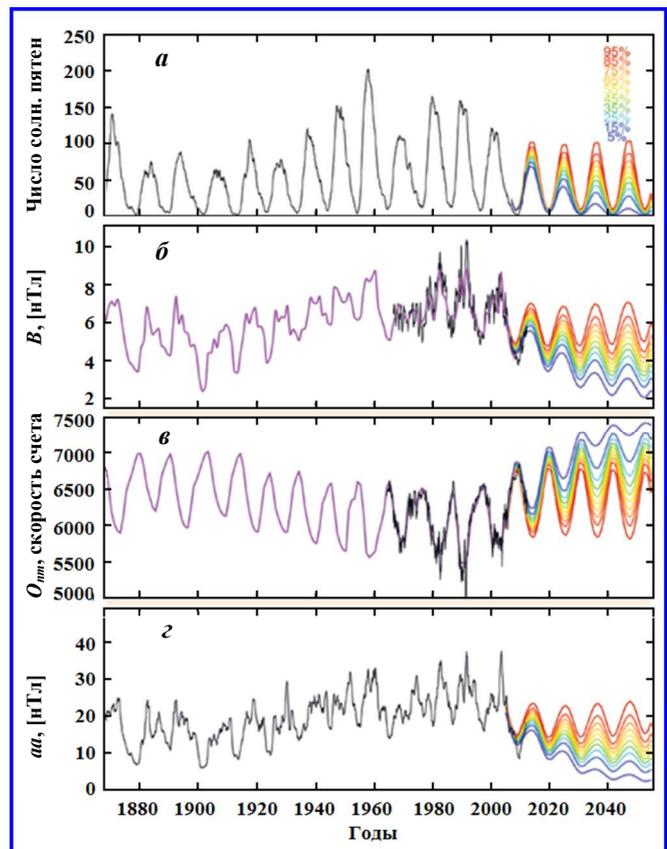


Рис. 13. Наблюдаемые в прошлом и предсказанные будущие вариации солнечной и геомагнитной активности (1870 – 2060 гг.)

В работе использованы экспериментальные данные до августа 2013 г. Палитрой цветных линий от красных до голубых показаны реконструированные величины всех параметров, цветом обозначена предсказанная вероятность P реализации заданной величины. Например, для числа солнечных пятен R вероятность $P[<R] = [5\%, 10\%, 95\%]$ означает, что с заданной вероятностью число солнечных пятен будет ниже указанной величины (аналогично для B и aa -индекса). Для скорости счета нейтронного монитора $P[>O_{nm}]$ означает, что O_{nm} будет больше указанной величины (O_{nm} увеличивается с увеличением солнечной активности). Следует отметить, что экспериментальные данные о параметрах СВ для 24-го солнечного цикла близки к значениям параметров, предсказанным в работе [24] при вероятности $\sim 55 - 65\%$. Это может служить некоторым тестом для представленной на рис. 13 возможной динамики солнечной активности и геомагнитной активности. Реконструированная динамика солнечной активности предполагает с вероятностью $\sim 65 - 45\%$ постепенное понижение солнечной активности в течение последующих 50 лет. С 5% вероятностью могут произойти некоторые экстремальные явления: последующий цикл может быть равен или больше предыдущего или солнечная активность может упасть до Maunder минимума. Наиболее вероятный сценарий (между желтыми и зелеными линиями) предполагает реализацию следующего Maunder минимума после 2060 г.

В заключение отметим ряд особенностей развития динамики солнечной и геомагнитной активности для 24-го солнечного цикла.

1. Параметры солнечной и геомагнитной активности в 24-м солнечном цикле значительно отличаются от средних значений 17 – 23 циклов: на $\sim 50\%$ уменьшается суммарное число солнечных пятен, полная геомагнитная активность в цикле и максимальная геомагнитная активность уменьшаются на $\sim 30\%$.

2. В 24-м цикле зарегистрирован самый «слабый» солнечный ветер. Основные параметры СВ (плотность, температура, магнитное поле) в 24-м цикле на $\sim 30\%$ меньше средних величин 21/22-го циклов, динамическое давление и поток энергии меньше на $\sim 40\%$. Вклад энергии СВ в магнитосферу в 24-м цикле уменьшился по сравнению с 23-м циклом на $\sim 45\%$.

3. В 2009 г. на геостационарной орбите зарегистрированы минимальные величины (с 1986 г.) потоков электронов >2 МэВ (данные GOES).

4. Низкая «производительность» слабого 24-го солнечного цикла (уменьшение на $\sim 30\%$ основных параметров солнечного ветра) сопровождается

общим повышением в межпланетном пространстве в 2008 – 2019 гг. потоков ГКЛ. Потоки ГКЛ с энергией <1 ГэВ/нуклон в 2008 – 2009 гг. были самыми высокими по сравнению с минимумами пяти предыдущих солнечных циклов (потоки протонов с энергией >120 МэВ увеличились на $\sim 13,7\%$).

5. Результаты реконструкции динамики параметров солнечной и геомагнитной активности за ~ 190 -летний период (1870 – 2060 гг.) предполагают, что с вероятностью $\sim 65 - 45\%$ в течение последующих 50 лет может произойти постепенное снижение солнечной активности. 24-й цикл представил реальную картину возможной динамики процессов в гео- и гелиопространстве при снижении солнечной активности.

Литература

1. Динамика солнечной и геомагнитной активности. I. Источники геомагнитной активности, корональная масс-эжекция, высокоскоростные потоки солнечного ветра / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2019. – Т. 170. – № 3. – С. 13 – 27.
2. Динамика солнечной и геомагнитной активности. II. Периодические вариации солнечной и геомагнитной активности / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2019. – Т. 171. – № 4. – С. 24 – 38.
3. Weakest solar wind of the space age and the current «mini» solar maximum / D. J. McComas, N. Angold, H. A. Elliott [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2013. – Vol. 779. – № 2. – P. 1 – 10.
4. Geomagnetic activity during the rising phase of solar cycle 24 / I. G. Richardson // J. Space Weather Space Clim. – 2013. – Vol. 3. – № A08. – DOI : 10.1051/swsc/2013031.
5. On the reduced geoeffectiveness of solar cycle 24: A moderate storm perspective / R. Selvakumaran, B. Veenadhari, S. Akiyama [et al.] // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – DOI : 10.1002/2016JA022885.
6. Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications / N. Gopalswamy, S. Akiyama, S. Yashiro [et al.] // Geophysical research letters. – 2014. – Vol. 41. – № 8. – P. 2673. – DOI : 10.1002/2014GL059858.
7. Nature's Grand Experiment: Linkage between magnetospheric convection and the radiation belts / C. J. Rodger, K. Cresswell-Moorcock, M. A. Clilverd // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – P. 171 – 189. – DOI : 10.1002/2015JA021537.
8. Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006 – 2010 гг. / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] //

- Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2015. – Т. 145. – № 2. – С. 27 – 41.
9. Long-term determination of energetic electron precipitation into the atmosphere from AARDDVARK Lower Band Chorus subionospheric VLF observations / J. J. Neal, C. J. Rodger, M. A. Clilverd [et al.] // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2015. – Vol. 120. – P. 2194 – 2211. – DOI : 10.1002/2014JA020689.
10. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? / R. Kataoka, Y. Miyoshi // *Space weather*. – 2010. – Vol. 8. – № S08002. – P. 1 – 6.
11. Влияние рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на формирование структуры энергетических спектров электронов на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 33– 49.*
12. Влияние скорости и плотности рекуррентных потоков солнечного ветра и индексов геомагнитной активности (Kp- и Dst-индексов) на формирование структуры потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2018. – Т. 164. – № 3. – С. 3 – 18.*
13. Multiyear measurements of radiation belt electrons: Acceleration, transport, and loss / D. N. Baker, V. Hoxie, H. Zhao [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 24. – № 4. – P. 2588 – 2602. – DOI : 10.1029/2018JA026259.
14. The Effects of Geomagnetic Storms and Solar Wind Conditions on the Ultrarelativistic Electron Flux Enhancements / H. Zhao, D. N. Baker, X. Li [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124. – № 3. – P. 1948 – 1965. – DOI : 10.1029/2018JA026257.
15. Annual Cosmic Ray Spectra from 250 MeV up to 1.6 GeV from 1995 – 2014 Measured with the Electron Proton Helium Instrument onboard SOHO / P. Köhl, R. Gómez-Herrero, B. Heber // *Solar Phys.* – 2016. – Vol. 291. – P. 965 – 974. – DOI : 10.1007/s11207-016-0879-0.
16. Record-setting cosmic-ray intensities in 2009 and 2010 / R. A. Mewaldt, A. J. Davis, K. A. Lave [et al.] // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2010. – Vol. 723. – P. L1 – L6. – DOI : 10.1088/2041-8205/723/1/L1.
17. Intense Geomagnetic Storms Associated with Coronal Holes Under the Weak Solar-Wind Conditions of Cycle 24 / S. Watari // *Solar Phys.* – 2018. – Vol. 293. – P. 23. – DOI : 10.1007/s11207-018-1248-y.
18. Galactic cosmic ray hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycle 23 and 24 / N. A. Schwadron, A. J. Boyd, K. Kozarev [et al.] // *Space Weather* 2010. – Vol. 8. – № 5. – DOI : 10.1029/2010SW000567.
19. Near-Earth heliospheric magnetic field intensity since 1750: 1. Sunspot and geomagnetic reconstructions / M. J. Owens, E. Cliver, K. G. McCracken // *J. Geophys. Res. SpacePhysics*. – 2016. – Vol. 121. – P. 6048 – 6063. – DOI : 10.1002/2016JA02.
20. Global solar wind variations over the last four centuries / M. J. Owens, M. Lockwood, P. Riley // *Nat. Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 41548. – DOI : 10.1038/srep41548.
21. Space climate and space weather over the past 400 years: 1. The power input to the magnetosphere / M. Lockwood, M. J. Owens, L. A. Barnard [et al.] // *J. Space Weather Space Clim.* – 2017. – Vol. 7. – P. A25.
22. Space climate and space weather over the past 400 years: 2 Proxy indicators of geomagnetic storm and sub-storm occurrence / M. Lockwood, M. J. Owens, L. A. Barnard [et al.] // *J. Space Weather Space Clim.* – 2018. – Vol. 8. – P. A12.
23. Heliomagnetic field near Earth, 1428 – 2005 / K. G. McCracken // *Journal of geophysical research*. – Vol. 112. – P. A09106. – DOI : 10.1029/2006JA012119.
24. Reconstruction and Prediction of Variations in the Open Solar Magnetic Flux and Interplanetary Conditions / Mike Lockwood // *Living Rev. Solar Phys.* – 2013. – Vol. 10. – P. 4. – DOI : 10.12942/lrsp-2013-4.
25. The Development of a Space Climatology: 1. Solar Wind Magnetosphere Coupling as a Function of Timescale and the Effect of Data Gaps / M. Lockwood, S. N. Bentley, M. J. Owens // *Space Weather*. – Vol. 17. – № 1. – P. 97.
26. The heliospheric magnetic flux, solar wind proton flux, and cosmic ray intensity during the coming solar minimum / C. W. Smith, K. G. McCracken, N. A. Schwadron [et al.] // *Space Weather*. – 2014. – Vol. 12. – № 7. – P. 499 – 507. – DOI : 10.1002/2014SW001067.
27. Empirical model of long-time variations of galactic cosmicray particle fluxes / N. V. Kuznetsov, H. Popova, M. I. Panasyuk // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2017. – Vol. 122. – P. 1463 – 1472. – DOI : 10.1002/2016JA0229.
28. North – South Asymmetry in Solar Activity and Solar Cycle Prediction, IV: Prediction for Lengths of Upcoming Solar Cycles / J. Javaraiah // *Solar Physics*. – 2019. – Vol. 294. – P. 64.
29. A Dynamo-based Forecast of Solar Cycle 25 / F. Labonville, P. Charbonneau, A. Lemerle [et al.] // *Solar Physics*. – 2019. – Vol. 294. – P. 82.
30. Will Solar Cycles 25 and 26 Be Weaker than Cycle 24? / J. Javaraiah // *Solar Phys.* – 2017. – Vol. 292. – P. 172. – DOI : 10.1007/s11207-017-1197-x.
31. Predicting space climate change / L. Barnard, M. Lockwood, M. A. Hapgood [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2011. – Vol. 38. – P. L16103. – DOI : 10.1029/2011GL048489.

Поступила в редакцию 11.10.2019

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.
Анатолий Алексеевич Петрукович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru. (ИКИ РАН).

Максим Владимирович Кожухов, кандидат технических наук, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DYNAMICS OF SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY

III. SOLAR ACTIVITIES AND GEOMAGNETIC ACTIVITY OF THE 24TH CICLE. RECONSTRUCTION OF SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY DYNAMICS

**I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova,
A. A. Petrukovich, M. V. Kozhukhov**

The structure of solar and geomagnetic activity of 24 solar cycles is analyzed. The parameters of solar and geomagnetic activity in 24 solar cycles differ significantly from the average values of 17 – 23 cycles: the total number of sunspots decreases by ~50%, the total geomagnetic activity in the cycle and the maximum geomagnetic activity decreases by ~30%. The effect of the solar activity decrease on the processes in geo-and helio-space is shown: a significant decrease in the 24th cycle of electron fluxes of the Earth's outer radiation belt and an increase in galactic cosmic ray fluxes in interplanetary space. In 2009 minimum values (since 1986) of electron fluxes >2 MeV have been recorded in the geostationary orbit (GOES data). The fluxes of galactic cosmic rays with energy <1 GeV / nucleon in 2008 – 2009 were the highest compared to the minima of the five previous solar cycles. The results of the reconstruction of the dynamics of solar and geomagnetic activity parameters (1870 – 2015) suggest that a gradual decrease in solar activity may occur with a probability of ~65 – 45 % over the next 50 years. 24 cycle presented a real picture of the possible dynamics of processes in geo-and helio-space with a decrease in solar activity.

Keywords: sunspots, cycles of solar and geomagnetic activity, outer radiation belt of the Earth, galactic cosmic rays.

References

1. Dynamic of Solar and Geomagnetic activity. I. Sources of geomagnities activities, coronal mass-ejection, high-speed solar Wind Flows / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2019. – Vol. 170. – № 3. – P. 13 – 27.
2. Dynamic of Solar and Geomagnetic activity. II. Periodical variations of solar and geomagnetic activities / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2019. – Vol. 171. – № 4. – P. 24 – 38.
3. Weakest solar wind of the space age and the current «mini» solar maximum / D. J. McComas, N. Angold, H. A. Elliott [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2013. – Vol. 779. – № 2. – P. 1 – 10.
4. Geomagnetic activity during the rising phase of solar cycle 24 / I. G. Richardson // J. Space Weather Space Clim. – 2013. – Vol. 3. – № A08. – DOI : 10.1051/swsc/2013031.
5. On the reduced geoeffectiveness of solar cycle 24: A moderate storm perspective / R. Selvakumaran, B. Veenadhari, S. Akiyama [et al.] // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – DOI : 10.1002/2016JA022885.
6. Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications / Nat Gopalswamy, Sachiko Akiyama, Seiji Yashiro [et al.] // Geophysical research letters. – 2014. – Vol. 41. – № 8. – P. 2673. – DOI : 10.1002/2014GL059858.
7. Nature's Grand Experiment: Linkage between magnetospheric convection and the radiation belts / C. J. Rodger, K. Cresswell-Moorcock, M. A. Clilverd // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – P. 171 – 189. – DOI : 10.1002/2015JA021537.
8. Generation of periodic structures in the solar-wind flux of earth's magnetosphere during the minimal solar activity period in 2006 – 2010 / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2015. – Vol. 145. – № 2. – P. 27 – 41.
9. Long-term determination of energetic electron precipitation into the atmosphere from AARDDVARK Lower Band Chorus subionospheric VLF observations / J. J. Neal, C. J. Rodger, M. A. Clilverd [et al.] // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2015. – Vol. 120. – P. 2194 – 2211. – DOI : 10.1002/2014JA020689.
10. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? / R. Kataoka, Y. Miyoshi // Space weather. – 2010. – Vol. 8. – № S08002. – P. 1 – 6.
11. Evaluation of high-speed recurrent solar wind fluxes effect on energy spectra structure of energetic electrons on a geostationary orbit / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2017. – Vol. 156. – № 1. – P. 33 – 49.
12. Influence of rate and density of recurrent solar wind flows and geomagnetic activity indices (kp and dst) on the structure of electron flows generated in the earths outer radiation belt at geostationary orbit / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova,

- A. A. Petrukovich // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2018. – Vol. 164. – № 3. – P. 3 – 18.
13. Multiyear measurements of radiation belt electrons: Acceleration, transport, and loss / D. N. Baker, V. Hoxie, H. Zhao [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 24. – № 4. – P. 2588 – 2602. – DOI : 10.1029/2018JA026259.
14. The Effects of Geomagnetic Storms and Solar Wind Conditions on the Ultrarelativistic Electron Flux Enhancements / H. Zhao, D. N. Baker, X. Li [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124. – № 3. – P. 1948 – 1965. – DOI : 10.1029/2018JA026257.
15. Annual Cosmic Ray Spectra from 250 MeV up to 1.6 GeV from 1995 – 2014 Measured with the Electron Proton Helium Instrument onboard SOHO / P. Kùhl, R. Gómez-Herrero, B. Heber // Solar Phys. – 2016. – Vol. 291. – P. 965 – 974. – DOI : 10.1007/s11207-016-0879-0.
16. Record-setting cosmic-ray intensities in 2009 and 2010 / R. A. Mewaldt, A. J. Davis, K. A. Lave [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2010. – Vol. 723. – P. L1 – L6. – DOI : 10.1088/2041-8205/723/1/L1.
17. Intense Geomagnetic Storms Associated with Coronal Holes Under the Weak Solar-Wind Conditions of Cycle 24 / S. Watari // Solar Phys. – 2018. – Vol. 293. – P. 23. – DOI : 10.1007/s11207-018-1248-y.
18. Galactic cosmic ray hazard in the unusual extended solar minimum between solar cycle 23 and 24 / N. A. Schwadron, A. J. Boyd, K. Kozarev [et al.] // Space Weather 2010. – Vol. 8. – № 5. – DOI : 10.1029/2010SW000567.
19. Near-Earth heliospheric magnetic field intensity since 1750: 1. Sunspot and geomagnetic reconstructions / M. J. Owens, E. Cliver, K. G. McCracken // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – P. 6048 – 6063. – DOI : 10.1002/2016JA02.
20. Global solar wind variations over the last four centuries / M. J. Owens, M. Lockwood, P. Riley // Nat. Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – P. 41548. – DOI : 10.1038/srep41548.
21. Space climate and space weather over the past 400 years: 1. The power input to the magnetosphere / M. Lockwood, M. J. Owens, L. A. Barnard [et al.] // J. Space Weather Space Clim. – 2017. – Vol. 7. – P. A25.
22. Space climate and space weather over the past 400 years: 2 Proxy indicators of geomagnetic storm and substorm occurrence / M. Lockwood, M. J. Owens, L. A. Barnard [et al.] // J. Space Weather Space Clim. – 2018. – Vol. 8. – P. A12.
23. Heliomagnetic field near Earth, 1428 – 2005 / K. G. McCracken // Journal of geophysical research. – Vol. 112. – P. A09106. – DOI : 10.1029/2006JA012119.
24. Reconstruction and Prediction of Variations in the Open Solar Magnetic Flux and Interplanetary Conditions / M. Lockwood // Living Rev. Solar Phys. – 2013. – Vol. 10. – P. 4. – DOI : 10.12942/lrsp-2013-4.
25. The Development of a Space Climatology: 1. Solar Wind Magnetosphere Coupling as a Function of Timescale and the Effect of Data Gaps / M. Lockwood, S. N. Bentley, M. J. Owens // Space Weather. – Vol. 17. – № 1. – P. 97.
26. The heliospheric magnetic flux, solar wind proton flux, and cosmic ray intensity during the coming solar minimum / C. W. Smith, K. G. McCracken, N. A. Schwadron [et al.] // Space Weather. – 2014. – Vol. 12. – № 7. – P. 499 – 507. – DOI : 10.1002/2014SW001067.
27. Empirical model of long-time variations of galactic cosmicray particle fluxes / N. V. Kuznetsov, H. Popova, M. I. Panasyuk // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2017. – Vol. 122. – P. 1463 – 1472. – DOI : 10.1002/2016JA0229.
28. North – South Asymmetry in Solar Activity and Solar Cycle Prediction, IV: Prediction for Lengths of Upcoming Solar Cycles / J. Javaraiah // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 64.
29. A Dynamo-based Forecast of Solar Cycle 25 / F. Labonville, P. Charbonneau, A. Lemerle [et al.] // Solar Physics. – 2019. – Vol. 294. – P. 82.
30. Will Solar Cycles 25 and 26 Be Weaker than Cycle 24? / J. Javaraiah // Solar Phys. – 2017. – Vol. 292. – P. 172. – DOI : 10.1007/s11207-017-1197-x.
31. Predicting space climate change / L. Barnard, M. Lockwood, M. A. Hapgood [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2011. – Vol. 38. – P. L16103. – DOI : 10.1029/2011GL048489.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).
(JC «VNIIEEM Corporation»).

Evgeniia Ivanovna Morozova, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Anatolii Alexeevich Petrukovich, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
Deputy Director General of IKI RAN, tel.: + 7 (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).

Maxim Vladimirovich Kozhukhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,
tel.: (495)366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.

(JC «VNIIEEM Corporation»).