

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, СОЛНЦЕ И ГЕЛИОСФЕРА В ПЕРИОД МЕЖДУНАРОДНОГО ПОЛЯРНОГО ГОДА 2007/08 гг.

Н.С.СВИРЖЕВСКИЙ, Ю.И.СТОЖКОВ (ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н.ЛЕБЕДЕВА РАН)

Экспедиционные работы по мониторингу космических лучей в полярной атмосфере. Регулярные измерения потоков заряженных частиц в атмосфере на высотах от уровня земли до (30-35) км проводятся Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН в северных и южных полярных широтах, а также в районе средних широт, начиная со второй половины пятидесятых годов прошлого века до настоящего времени. Используется стандартная аппаратура - радиозонды космических лучей. В полярных районах в период 2007-2008 гг. выполнено ~ 600 запусков радиозондов.

Период МПГ пришелся на минимум солнечной активности начинающегося 24-го солнечного цикла. Этот минимум имеет очень низкий уровень по числу солнечных пятен R_z , сравнимый с уровнем, наблюдавшимся в 1913-1914 гг. Кроме того, он является самым низким из минимумов 1964, 1976, 1986 и 1996 гг., для которых существуют данные не только по R_z , но и данные по гелиосферной плазме и межпланетному магнитному полю. Особенностью экспериментальных данных о потоках космических лучей в земной атмосфере в 2007-2009 гг. является самый высокий уровень этих потоков за весь период 50-летних наблюдений в полярной атмосфере.

Ниже обсуждаются особенности поведения потоков космических лучей, солнечной активности и характеристик межпланетной среды в период МПГ 2007-2009 гг.

Данные о потоках космических лучей. Галактические космические лучи, падающие на границу атмосферы, образуют вторичное заряженное излучение, так что полный поток частиц сначала увеличивается, достигает максимума, а затем, по мере продвижения вглубь атмосферы, уменьшается. В данной работе анализируются данные о потоках космических лучей, полученные в максимуме их высотной зависимости в атмосфере N_{max} . Для полярных широт этот максимум, положение которого изменяется в течение 11-летнего солнечного цикла, находится на высотах 20-25 км.

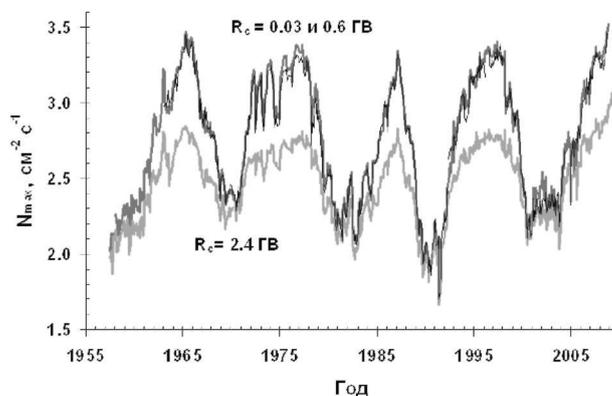


Рис. 1. Временной ход среднемесячных значений потока космических лучей в максимуме высотной кривой N_{max} в атмосфере, полученных в северных полярных широтах с геомагнитной жесткостью обрезания $R_c = 0,6$ ГВ, в Антарктиде в обсерватории Мирный, $R_c = 0,03$ ГВ и на средних широтах Северного полушария, $R_c = 2,4$ ГВ

На рис. 1 приведен временной ход среднемесячных значений потока космических лучей N_{max} в максимуме высотной кривой в атмосфере начиная с июня 1957 г. по март 2009 г.

Из данных рис. 1 и таблицы, приведенной ниже, видно, что начиная с ноября 2008 г. по настоящее время наблюдается самый высокий поток космических лучей за всю историю их наблюдений (~ 50 лет). В таблице приведены значения N_{max} , измеренные в предыдущих и настоящем минимумах солнечной активности. По сравнению с 1965 г. увеличение составляет $(2,74 \pm 0,55) \%$.

Известно, что поток галактических космических лучей зависит не только от уровня солнечной активности (значения R_z), но и от знака межпланетного магнитного поля. В настоящее время минимум солнечной активности приходится на отрицательную фазу 22-летнего солнечного магнитного цикла (в отрицательные фазы магнитные силовые линии выходят из южной полярной шапки Солнца и входят в северную; в положительные фазы наблюдается обратная картина). Минимумы солнечной активности 1965 и 1987 гг. так же имели место в

Таблица 1. Максимальные среднемесячные значения потоков галактических космических лучей в северной полярной атмосфере N_{max} в минимумах солнечной активности.

Номер солнечного цикла (месяц, год)	20 (5,1965)	21 (5,1977)	22 (2,1987)	23 (5,1997)	24 (3,2009)
$N_{max}, \text{см}^2 \text{с}^{-1}$	$3,474 \pm 0,006$	$3,383 \pm 0,008$	$3,346 \pm 0,015$	$3,405 \pm 0,013$	$3,569 \pm 0,018$

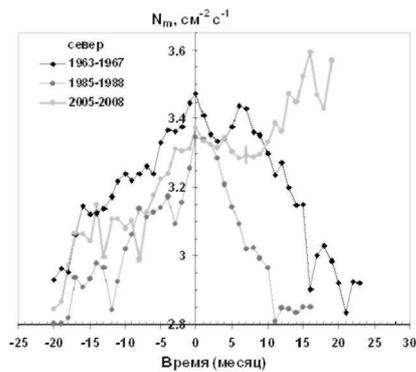


Рис. 2. Сравнение временных зависимостей среднемесячных значений потоков космических лучей N_{max} на высокоширотных станциях в Северном полушарии в периоды 1963-1967 гг., 1985-1988 гг. и 2005-2009 гг. Вертикальный отрезок на красной кривой справа от вертикальной оси показывает типичную среднеквадратичную ошибку данных

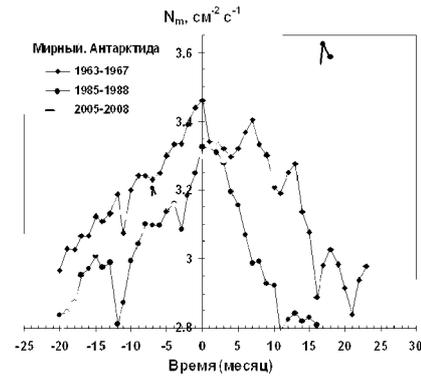


Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, по данным о потоках космических лучей N_{max} , полученным в измерениях в атмосфере в обсерватории Мирный, Антарктида

отрицательные фазы солнечного магнитного цикла. Поэтому целесообразно сравнить потоки галактических космических лучей N_{max} в настоящее время и в 1965, 1987 гг. Такое сравнение приведено на рис. 2 и 3. За нулевое время приняты май 1965 г., февраль 1987 г. и август 2007 г. Эти периоды относятся к отрицательным фазам 22-летнего солнечного магнитного цикла и включают в себя минимумы солнечной активности 20-го, 22-го и 24-го солнечных циклов.

Из рис. 1, 2 и 3 следует, что временной ход величины N_{max} является необычным в текущий период минимума солнечной активности. Максимум потока превышает значения, измеренные в 4-х предыдущих минимумах солнечной активности, в том числе в 2-х минимумах, относящихся к отрицательным фазам солнечного магнитного цикла. Значения N_{max} после 08.2007 г. сначала несколько уменьшались, а затем стали расти. Высокий поток галактических космических лучей наблюдается почти 2 года, т.е. является сильно затянутым во времени.

Можно ожидать, что высокие значения N_{max} будут наблюдаться, как минимум, еще 6 месяцев, так как изменения потока космических лучей запаздывают относительно изменений солнечной активности на время ~ 6-12 месяцев.

Наблюдаемые на орбите Земли потоки космических лучей модулируются солнечной активнос-

тью, поэтому обнаруженные явления в космических лучах, безусловно, связаны с ее необычным поведением в последние годы.

Солнечная активность и гелиосфера в 2007-2009 гг. Предыдущий 23-й цикл солнечной активности, максимум которого наблюдался в 2000-м году, был весьма средним по числу солнечных пятен R_z (см. рис. 4). Особенностью нового 24-го цикла, начало которого можно условно отнести к первым месяцам 2008 г., является практически полное отсутствие солнечных пятен в 2008-2009 гг. В 2007 г. среднегодовое значение $R_z = 8$ и все пятна были пятнами старого цикла. С начала 2008 г. по март 2009 г. среднегодовое значение $R_z = 3$, причем большинство пятен тоже было пятнами старого цикла. За последние сто с лишним лет 2008 г. занимает второе место по числу дней без солнечных пятен (после 1913 г.). Отличительным признаком текущего минимума является также большая его продолжительность. По числу пятен весь период с начала 2007 г. по март 2009 г. можно отнести к минимуму солнечной активности, так что продолжительность минимума составляет более 2 лет.

В период минимума 2007-2009 гг. значительно уменьшилась величина межпланетного магнитного поля (ММП) около Земли (рис. 5). В начале 2007 г. ММП достигло уровня, характерного для предыдущих минимумов солнечной активности, и можно было ожидать, что начнется его рост. Однако ослабление поля

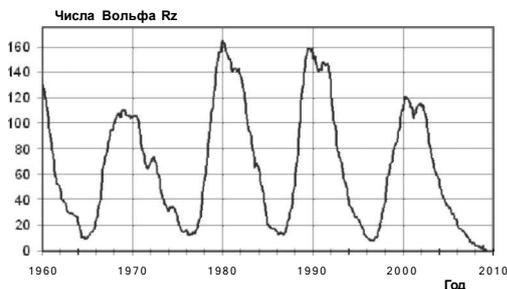


Рис. 4. Среднемесячные значения числа солнечных пятен (числа Вольфа) в зависимости от времени в 1960-2009 гг.

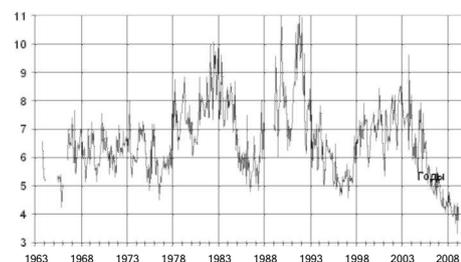


Рис. 5. Межпланетное магнитное поле около Земли в 1963-2009 гг.

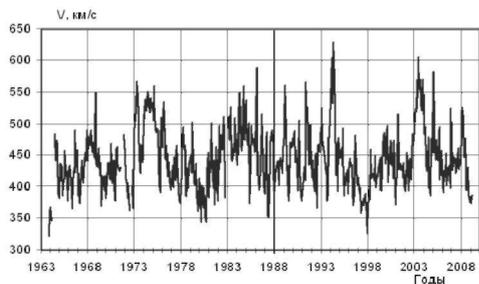


Рис. 6. Среднемесячные значения скорости солнечного ветра V около Земли в 1963–2009 гг.

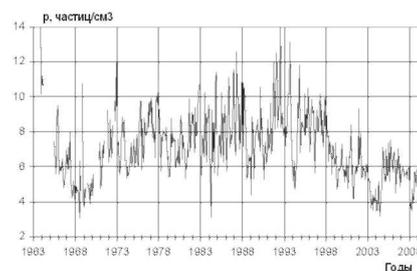


Рис. 7. Среднемесячные значения плотности протонов в гелиосферной плазме около Земли в 1963–2009 гг.

продолжилось, и в настоящее время (март 2009 г.) величина V на 20-25 % меньше, чем в годы предыдущих минимумов. Такое изменение ММП наблюдается впервые с начала регулярных измерений магнитного поля, начатых в 1963 г. По современным представлениям межпланетное магнитное поле представляет из себя фотосферное фоновое поле Солнца (порядка $1 \text{ Гс} = \text{нТ}$), вынесенное высокопроводящей солнечной плазмой за пределы короны в гелиосферу. Уменьшение величины ММП в гелиосфере и около Земли должно быть следствием ослабления фотосферного магнитного поля, которое, в свою очередь, происходит от подфотосферного магнитного поля Солнца.

Межпланетное магнитное поле является одним из факторов, обеспечивающих модуляцию ГКЛ. Оно определяет коэффициент диффузии ГКЛ, величина которого обратно пропорциональна напряженности поля V . При малых значениях V диффузия ГКЛ из межпланетного пространства обеспечивает более высокие потоки частиц в гелиосфере, что и наблюдается в настоящее время.

На рис. 6. показана скорость солнечного ветра V около Земли в 1963-2009 гг. Средняя величина V за весь период 2000-2009 гг не отличалась от значений V за предыдущие десятилетние периоды. Величины скорости V были 443, 448, 439 и 453 км/с за периоды 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999 и 2000-2009 гг. соответственно. Период времени с 2007 г по март 2009 г. характеризуется устойчивыми вариациями скорости солнечного ветра, типичными для 2-секторной структуры межпланетного магнитного поля. Начиная с 2008 г. средняя скорость падала, и в первые месяцы 2009 г. она была примерно 380 км/с.

На рис. 7. приведены среднемесячные значения плотности солнечного ветра за период 1963 г. - настоящее время. Видно, что в 2008-2009 гг. плотность солнечного ветра имела низкие значения.

Заключение. Международный полярный год пришелся на период минимума солнечной активности в 11-летнем цикле. Минимум солнечной активности оказался не совсем обычным - затянувшимся (продолжается больше 2 лет), с низким средним значением числа солнечных пятен и с продолжительными периодами времени, когда пятен на Солнце не было совсем. Необычным является и продолжительное ослабление межпланетного магнитного поля, величина которого в настоящее время (март 2009 г.) на 20-25 % меньше значений поля, характерных для предыдущих минимумов солнечной активности. Среди других характеристик солнечного ветра следует отметить продолжительную (около 10 лет) низкую величину плотности солнечной плазмы. Средняя скорость солнечного ветра около Земли на больших (десятилетних) интервалах времени не проявила никаких особенностей и оставалась равной 440 - 450 км/с. Можно отметить уменьшение скорости с начала 2008 г., совпадающее по времени с уменьшением плотности плазмы.

С ослаблением магнитного поля связан дополнительный рост потоков галактических космических лучей, наблюдающийся с середины 2008 г. по настоящее время на высоких широтах на севере и в Антарктиде. Наблюдается рост потока космических лучей на ~ 10 % и на среднеширотной станции Москва.

Высокие значения потока космических лучей будут наблюдаться в последующие ~6 месяцев, так как изменения потока космических лучей запаздывают относительно изменений солнечной активности на время ~ 6-12 месяцев.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ (09-02-10018к) и Программы Президиума РАН «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика».