

## ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 523.165

## ГЛОБАЛЬНЫЕ И ГЕЛИОШИРОТНЫЕ ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И МОДУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В. П. Охлопков

(НИИЯФ)

E-mail: okhlopkov@tasped.sinp.msu.ru

Для описания временного хода галактических космических лучей (ГКЛ) (1958–2006 гг.) использованы индексы солнечной активности в виде  $Z^\alpha$ ,  $Z^\alpha \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$ , где  $Z$  и  $\varphi$  — какой-либо индекс солнечной активности и гелиоширота солнечных пятен,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi_0$  — оптимальные параметры, найденные методом наименьших квадратов. Удовлетворительно описан временной ход потока ГКЛ, выявлена роль гелиошироты активных областей в индексе по отношению к модуляции космических лучей.

## Введение

К настоящему времени накоплен большой массив данных по измерениям различных характеристик солнечной активности (в частности, числа групп солнечных пятен  $\eta$ ). Во многих работах [1–11] были проведены сопоставления временного хода космических лучей и солнечной активности (СА). Исследования 11-летней модуляции ГКЛ в стратосфере показали, что интенсивность ГКЛ зависит не только от числа активных областей (АО) на Солнце, но и от их гелиографической широты  $\varphi$ . Для фазы спада солнечной активности в 19-м цикле была установлена эмпирическая зависимость ГКЛ от  $\eta$  и  $\varphi$  [1, 3, 4]

$$J = J_0 \exp(-A\eta^{0.8}\varphi^{-1.2}),$$

где  $J_0$  — поток ГКЛ при отсутствии АО или групп пятен на Солнце. Учет изменений гелиографической широты Земли не привел к заметной вариации в космических лучах [5]. Поэтому была использована средняя (относительно солнечного экватора) гелиоширота АО.

В работе [6] для периода с 1959 по 1969 г. эмпирическая зависимость ГКЛ от  $\eta$  и  $\varphi$  была найдена для гелиоширотного индекса  $\eta^{0.8} \exp[-(\varphi/18)^2]$ .

В работах [7, 8] был рассчитан гелиоширотный индекс для площадей солнечных пятен и чисел Вольфа с экспоненциальной функцией эффективности активных областей. Этот индекс был использован для исследования годовых и 11-летних вариаций ГКЛ.

В последние годы была разработана многопараметрическая модель [9–11] с использованием данных по углу наклона гелиосферного токового слоя, средней напряженности магнитного поля на поверхности источника, полярного поля и вспыхивающего ин-

декса. Модель хорошо выявляет особенности поведения модуляции в различные периоды циклов СА.

## Экспериментальные данные и их обработка

В настоящей работе использовались солнечные данные Пулковской [12] и Гринвичской [13] астрономических обсерваторий, по которым были рассчитаны среднемесячные значения  $\eta$  и  $\varphi$  (рис. 1), данные по радиоизлучению Солнца  $F$  на частоте 2800 МГц, площади пятен  $S$ , числа солнечных пятен  $Rz$  [14], общее магнитное поле Солнца (ОМПС)  $B$ , угол наклона гелиосферного токового слоя (УГТС)  $\Psi$  [15] и данные по космическим лучам в максимуме  $N_{\max}$  их высотного хода в полярной атмосфере (Мурманск, геомагнитная жесткость обрезания  $R_c = 0.5$  ГВ) [16]. С 1995 г. пулковский ряд по числу групп солнечных пятен был продолжен гринвичскими данными с коэффициентом нормировки 0.85.

## Анализ данных

Индексы солнечной активности, используемые для описания временного хода космических лучей, выбирались как в виде  $Z^\alpha$  для глобальных, так и в виде  $Z^\alpha \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$  и  $Z^\alpha/(k+\varphi^\beta)$  для гелиоширотных (поскольку оба индекса с гелиоширотой дают одинаковые результаты, далее будут приведены данные только для индекса с экспонентой). Здесь  $Z$  и  $\varphi$  — какой-либо индекс солнечной активности и широта солнечных пятен. Константы  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi_0$  были рассчитаны для периодов между инверсиями полярного магнитного поля Солнца (положительная фаза — когда ОМПС в Северном полушарии направлено от Солнца, отрицательная фаза — когда ОМПС в Северном полушарии направлено к Солнцу). В табл. 1 приведены эти периоды.

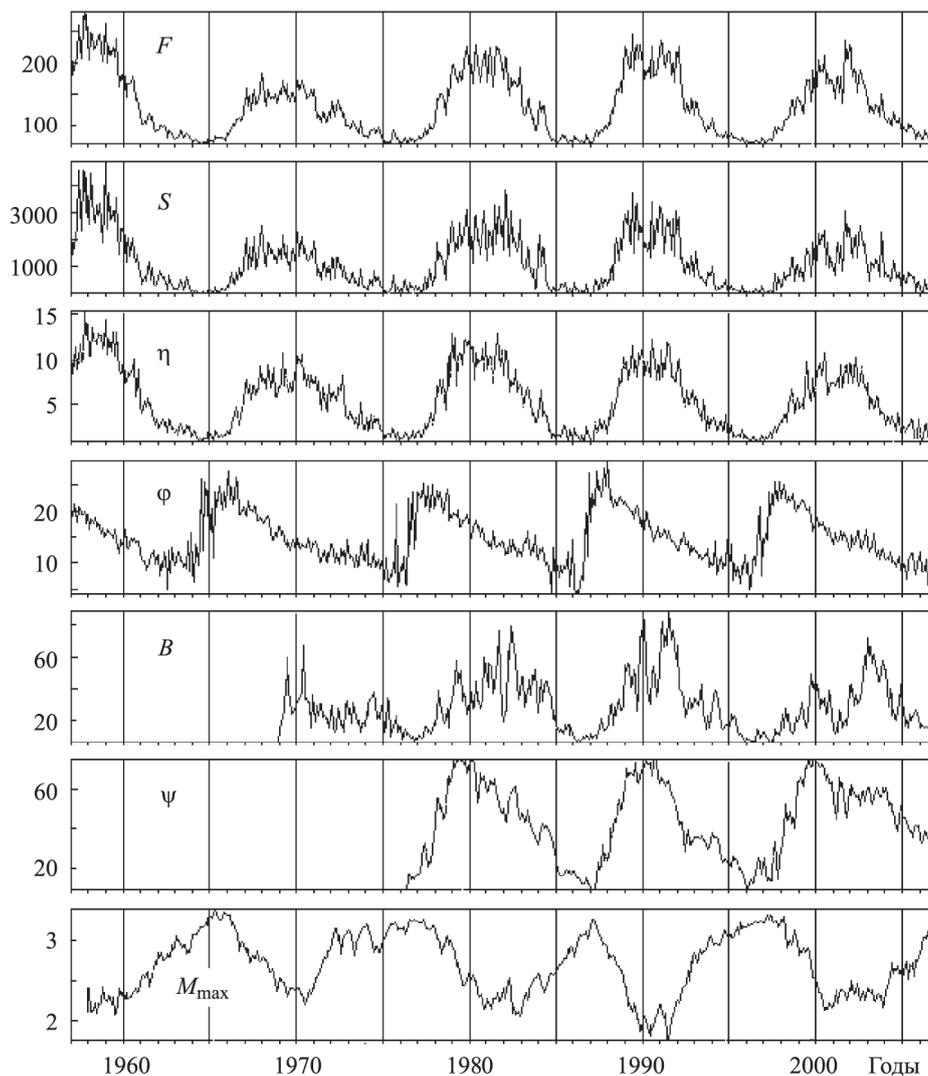


Рис. 1. Среднемесячные данные по радиоизлучению Солнца на частоте 2800 МГц  $F$ , площади пятен  $S$ , числу групп пятен  $\eta$  и их средней гелиошироте  $\varphi$ , общему магнитному полю Солнца как звезды  $B$ , углу наклона гелиосферного токового слоя  $\Psi$ , потоку галактических космических лучей по данным в стратосфере, Мурманск, геомагнитная жесткость обрезания  $R_c = 0.5$  ГВ ( $N_{\max}$ )

Таблица 1  
Периоды между инверсиями полярного магнитного поля Солнца

1-й период	7.1959–10.1969	отрицательная фаза 22-летнего солнечного магнитного цикла
2-й период	1.1971–12.1979	положительная фаза
3-й период	1.1981–12.1989	отрицательная фаза
4-й период	6.1991–12.1999	положительная фаза
5-й период	1.2001–9.2005	отрицательная фаза

Для каждого из этих периодов методом наименьших квадратов путем перебора значений  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi_0$  при различных временных сдвигах  $\tau$  интенсивности ГКЛ относительно солнечного индекса находилось наилучшее описание экспериментальных данных (среднеквадратичное отклонение между экспериментальными и расчетными данными  $\sigma$  имело

минимум; связь КЛ с индексом бралась в виде  $J = J_0 \exp(-AZ)$ .

В табл. 2 приведены оптимальные параметры для индекса с числом групп пятен  $\eta^\alpha$  и для других индексов, в частности для комбинированного индекса из суммы УГТС и ОМПС (в табл. 2 интервал времени 1977–1980 гг. дан для индексов с участием  $\Psi$ ). Из табл. 2 видно, что в периоды положительного магнитного поля Солнца показатель  $\alpha$  резко возрастает для всех глобальных параметров солнечной активности.

На рис. 2 приведен временной ход измеренных значений потока ГКЛ (Мурманск, стратосфера) и рассчитанных значений ГКЛ по индексам  $\eta^\alpha$ ,  $(\Psi + kB)^\alpha$  и  $(\Psi + kF)^\alpha$  (параметры взяты из табл. 2). Экспериментальные и рассчитанные данные хорошо согласуются между собой. Из расчетов следует, что параметр индексов  $\alpha$  не остается постоянными при переходах от одной фазы магнитного цикла

Таблица 2  
**Рассчитанные оптимальные параметры различных индексов солнечной активности для периодов между инверсиями полярного магнитного поля Солнца**

Интервал времени, годы	$\eta^\alpha$		$F^\alpha$		$\Psi^\alpha$		$(\Psi + kB)^\alpha$			$(\Psi + kF)^\alpha$		
	$\tau$	$\alpha$	$\tau$	$\alpha$	$\tau$	$\alpha$	$\tau$	$k$	$\alpha$	$\tau$	$k$	$\alpha$
1959–1969 (–)	10	0.41	11	0.02								
1971–1979 (+) (1977–1980)	1	1.39	6	2.0	4	4.29	4	0.1	3.5	4	0.06	4.50
1981–1989 (–)	9	0.18	9	0.02	3	0.97	3	0.26	0.9	3	0.00	0.95
1991–1999 (+)	4	1.46	5	1.69	11	2.32	9	0.17	2.2	9	0.17	2.70
2001–2006 (–)	11	0.25	10	0.01	0	0.03	0	0	0.1	0	0.15	0.05

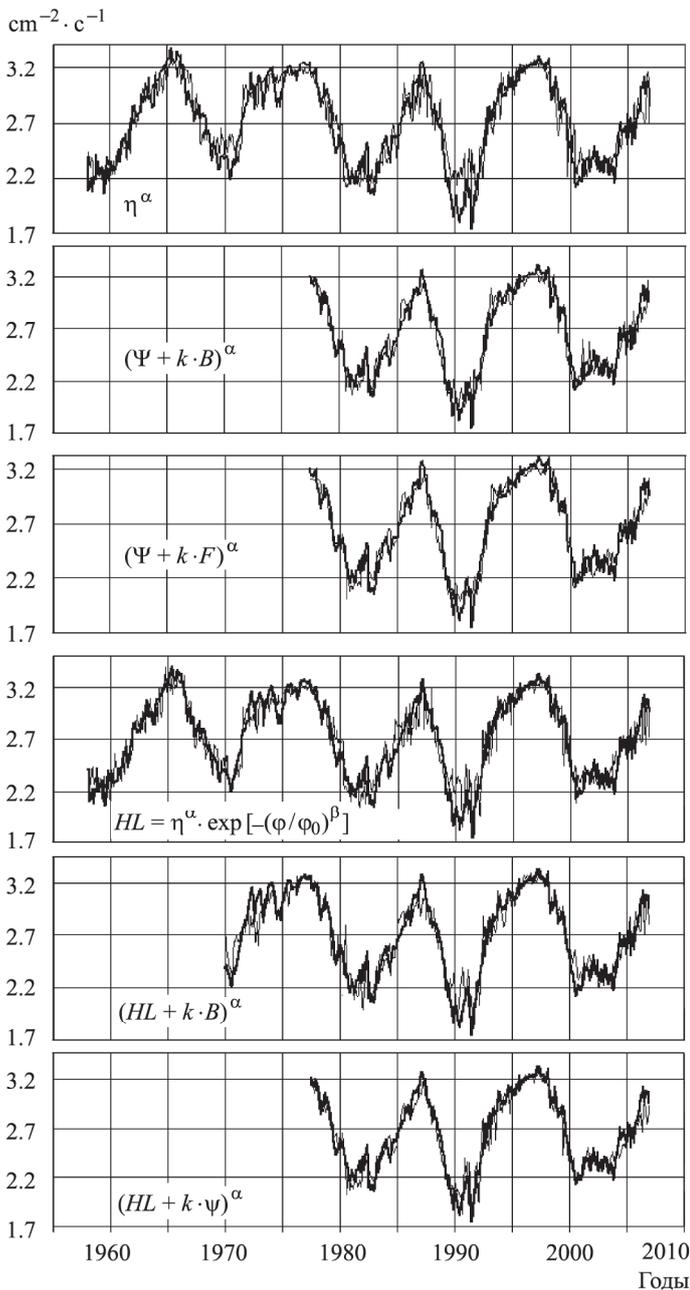


Рис. 2. Временной ход измеренных значений потока ГКЛ (стратосфера, широкая линия) и рассчитанных значений (тонкие линии) по индексам  $\eta^\alpha$  (верхняя панель),  $(\Psi + kB)^\alpha$  (2-я сверху панель),  $(\Psi + kF)^\alpha$  (3-я сверху панель),  $HL(\eta, \varphi) = \eta^\alpha \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$  (4-я сверху панель),  $(HL + kB)^\alpha$  (5-я сверху панель),  $(HL + k\Psi)^\alpha$  (нижняя панель)

к другой. В периоды положительной полярности наблюдается более сильная зависимость потока ГКЛ от числа групп пятен по сравнению с периодами отрицательной полярности.

Для гелиоширотного индекса  $HL(\eta, \varphi) = \eta^\alpha \times \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$  отдельно проведены расчеты на восходящих и нисходящих ветвях циклов СА (оптимальные параметры приведены в табл. 3). Из таблицы видно, что сильная зависимость гелиоширотного индекса от широты проявляется на восходящих ветвях (параметры  $\varphi_0$  и  $\beta$  малы), на нисходящих ветвях эта зависимость очень слабая (здесь широта изменяется в небольшом интервале 10–15 град).

Таблица 3  
**Рассчитанные оптимальные параметры гелиоширотного индекса солнечной активности с числом групп пятен HL для периодов восходящих и нисходящих ветвей циклов солнечной активности (в скобках указаны фазы магнитного цикла)**

Интервал времени	$\tau$	$\alpha$	$\beta$	$\varphi_0$
Спад СА 1959–1964 (–)	1	0.4	2.0	60
Подъем 1965–1969 (–)	3	0.6	1.0	20
Спад СА 1971–1975 (+)	8	1.8	2.0	60
Подъем 1976–1979 (+)	1	0.9	1.9	24
Спад СА 1981–1985 (–)	10	0.6	2.0	60
Подъем 1988–1990 (–)	6	0.8	1.0	28
Спад СА 1991–1995 (+)	0	1.3	2.0	60
Подъем 1997–5.2000 (+)	0	0.7	1.9	22
Спад СА 2001–2005 (–)	10	0.6	2.0	60

Теперь рассмотрим поведение индекса  $HL(\eta, \varphi)$  в ранее обозначенных периодах, связанных со знаком магнитного поля Солнца. На рис. 2 приведен временной ход измеренных значений потока ГКЛ (Мурманск, стратосфера) и рассчитанных значений ГКЛ (параметры взяты из табл. 4). Рассчитанные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Из расчетов следует, что параметры гелиоширотных индексов не остаются постоянными при переходах от одной фазы магнитного цикла к другой. В периоды положительной полярности параметр  $\alpha$  резко возрастает, подчеркивая более сильную зависимость потока ГКЛ от числа групп пятен по сравнению с периодами отрицательной полярности.

Таблица 4

**Рассчитанные оптимальные параметры гелиоширотного индекса солнечной активности с числом групп пятен HL для периодов между инверсиями полярного магнитного поля Солнца**

Интервал времени, годы	$\eta^\alpha \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$			
	$\tau$	$\alpha$	$\beta$	$\varphi_0$
1959–1969 (–)	3	0.6	1.5	30
1971–1979 (+)	1	1.0	2.0	34
1981–1989 (–)	0	0.3	2.0	46
1991–1999 (+)	0	1.4	2.0	22
1901–1905 (–)	7	0.4	2.0	60

Также был проведен расчет оптимальных параметров гелиоширотного индекса для потока ГКЛ в стратосфере как с учетом общего магнитного поля Солнца  $(HL + kB)^\alpha$ , так и с учетом УГТС  $(HL + k\Psi)^\alpha$ . При этом выявлено (так же как и для других индексов), что в периоды положительной полярности магнитного поля Солнца параметр  $\alpha$  в числе групп пятен СА резко возрастает, и в эти же периоды зависимость от гелиошироты тоже усилена.

Среднеквадратичные отклонения между экспериментальными и расчетными данными  $\sigma$  приведены в табл. 5 и на рис. 3. Видно, что наилучшее описание КЛ дают комбинированные индексы с участием УГТС, и УГТС играет определяющую роль в этих индексах.

Таблица 5

**Среднеквадратичные отклонения между экспериментальными данными по космическим лучам (Мурманск, стратосфера) и расчетными данными  $\sigma$  (%) для глобальных и гелиоширотных индексов солнечной активности, полученные при использовании оптимальных параметров индексов**

Глобальные индексы		Гелиоширотные индексы	
Индекс	$\sigma$ , %	Индекс	$\sigma$ , %
$S$	5.94	$HL = \eta^\alpha \exp[-(\varphi/\varphi_0)^\beta]$	5.19
$\eta$	5.47	$HL + kB$	5.07
$Rz$	5.23	$HL + k\Psi$	4.42
$F$	5.00		
$\Psi$	4.61		
$\Psi + kB$	4.44		
$\Psi + kF$	4.25		

В долговременной модуляции ГКЛ помимо диффузии и конвекции большая роль отводится градиентному и центробежному дрейфам частиц, а также движению частиц вдоль нейтрального токового слоя в гелиосфере. Когда ОМПС в Северном полушарии направлено от Солнца (положительная фаза), положительно заряженные частицы дрейфуют из полярных областей гелиосферы к экватору и выносятся вдоль нейтрального слоя наружу. При противоположном направлении ОМПС (отрицательная фаза) положительно заряженные частицы дрейфуют вдоль границы

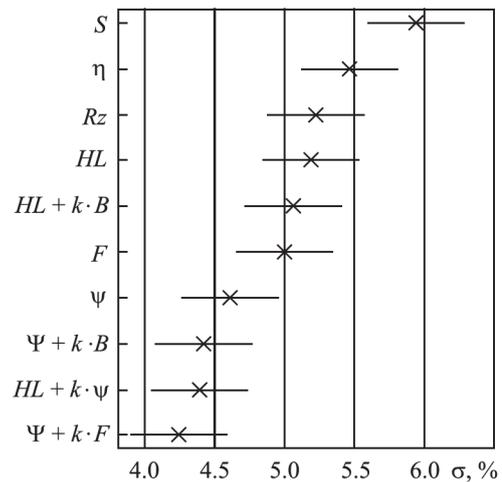


Рис. 3. Среднеквадратичные отклонения между экспериментальными данными по космическим лучам (Мурманск, стратосфера) и расчетными данными  $\sigma$  (%) для глобальных и гелиоширотных индексов солнечной активности, полученные при использовании оптимальных параметров индексов, и 90% доверительные интервалы  $\sigma$  (полоски слева и справа от точек), рассчитанные с помощью распределения  $\chi^2$

гелиосферы до экватора и входят внутрь, двигаясь вдоль волнистого токового слоя. В этом случае волнистость токового слоя, выраженная углом наклона слоя  $\alpha$ , хорошо коррелирует с интенсивностью КЛ, так как с увеличением  $\alpha$  увеличивается время пребывания частиц в модулирующем объеме и возрастает адиабатическое охлаждение частиц. Лучшее соответствие рассчитанной и наблюдаемой интенсивности КЛ наблюдается при отрицательной фазе, чем при положительной.

## Заключение

1. Параметры как по глобальным, так и по гелиоширотным индексам не остаются постоянными при переходах от цикла к циклу.

2. Параметры, характеризующие эффективность активных областей на разных широтах, проявляют более резкую зависимость для положительной фазы солнечного магнитного цикла.

3. Наиболее сильно гелиоширотная зависимость проявляется на фазе роста цикла солнечной активности. На фазе спада солнечной активности гелиоширотная зависимость заметно ослабевает.

4. Из глобальных параметров солнечной активности наилучшее описание космических лучей дают радиоизлучение  $F$  на частоте 2800 МГц ( $\sigma = 5\%$ ), угол наклона гелиосферного токового слоя  $\Psi$  ( $\sigma = 4.61\%$ ), сумма угла наклона и общего магнитного поля Солнца  $B$  (с коэффициентом) ( $\sigma = 4.44\%$ ), сумма угла наклона  $\Psi$  и радиоизлучение Солнца  $F$  (с коэффициентом) ( $\sigma = 4.25\%$ ).

5. Гелиоширотный индекс с числом групп пятен  $\eta$  лучше описывает космические лучи, лучше, чем отдельно индекс из числа групп пятен. Однако среднеквадратичные отклонения в этом случае такие же, как с учетом параметров  $F$  и  $Rz$ , и это указывает на небольшую роль гелиошироты АО в гелиоширотном индексе по отношению к модуляции космических лучей, когда сопоставление ведется по циклам в целом. Добавление к HL-индексу общего магнитного поля Солнца  $B$  или угла наклона гелиосферного токового слоя  $\Psi$  улучшает качество индекса (особенно  $\Psi$ ).

6. Наилучшее описание галактических космических лучей дает угол наклона гелиосферного токового слоя  $\Psi$  в сумме с общим магнитным полем Солнца  $B$  или с радиоизлучением Солнца  $F$ , или с гелиоширотным индексом HL.

### Литература

1. Чарахчьян А.Н., Чарахчьян Т.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1966. **6**. С. 486.
2. Стожков Ю.И., Чарахчьян Т.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. **34**. С. 2439.
3. Чарахчьян А.Н., Чарахчьян Т.Н. // Тр. ФИАН. 1973. **64**. С. 3.
4. Стожков Ю.И., Чарахчьян Т.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1969. **9**. С. 803.
5. Стожков Ю.И. // Тр. 6-й Всесоюз. школы по космофизике. Апатиты, 1969. Ч. 2. С. 68.
6. Charakhchyan T.N., Okhlopkov V.P., Okhlopkova L.S. // Proc. 16<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Kyoto, 1979. **3**. P. 302.
7. Гущина Р.Т., Дорман И.В., Дорман Л.И., Пименов И.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. **34**. С. 2424.
8. Гущина Р.Т., Дорман Л.И., Илгащ С.Ф. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. **34**. С. 2434.
9. Белов А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. **42**, № 6. С. 727.
10. Belov A.V., Gushina R.T., Eroshenko E. et al. // Proc. 29<sup>th</sup> ICRC. 2005. **2**. P. 239.
11. Белов А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 2007. **71**. С. 1006.
12. Солнечные данные: Бюлл. АН СССР, 1957–1994.
13. <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
14. [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/)
15. <http://wso.stanford.edu/>
16. Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. Data on galactic cosmic ray fluxes according to the measurement in the atmosphere (1957–2007). Preprint of Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences. М., 2007.

Поступила в редакцию  
30.05.2007