

УДК 523.165

**А. И. Ключева**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## **ЭФФЕКТЫ Понижения Интенсивности Галактических Космических Лучей, Связанные С Высококоростными Потокaми От Корональных Дыр**

---

*Исследуется влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра от корональных дыр на интенсивность галактических космических лучей с использованием данных пяти нейтронных мониторов в течение 2000–2013 гг.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие и совершенствование космических технологий позволило выявить многочисленные факторы влияния солнечной активности и вызванных ею нестационарных процессов в гелиосфере на технические и биологические системы, в связи с чем актуальной научной задачей стало изучение всего комплекса нестационарных внешних космических факторов, оказывающих влияние на Землю, а также прогнозирование солнечной активности и магнитных бурь. Большое значение в этом аспекте имеют исследования вариаций галактических космических лучей (ГКЛ). Под влиянием различных солнечных, гелиосферных и геомагнитных процессов поток первичных космических лучей существенно искажается по сравнению с таковым за пределами гелиосферы. Это дает возможность исследовать природу вариаций ГКЛ гелиосферного и магнитосферного происхождения.

Многочисленные исследования показали, что межпланетное пространство заполнено плазмой солнечного ветра. Солнечный ветер (СВ) зарождается в верхних слоях атмосферы Солнца, и его основные параметры определяются соответствующими параметрами солнечной атмосферы. Однако физические характеристики солнечно-

го ветра вблизи орбиты Земли крайне сложно связаны с физическими явлениями в атмосфере Солнца, и к тому же сильно зависят от уровня солнечной активности. Поэтому для простоты описания предполагается, что наблюдаемый вблизи орбиты Земли солнечный ветер состоит из трех в первом приближении независимых компонентов [3]: спокойный солнечный ветер, квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, спорадические высокоскоростные потоки.

Солнечный ветер модулирует поток галактических космических лучей, и ярким тому свидетельством являются форбуш-эффекты, представляющие резкое понижение интенсивности космических лучей, вызванное отклонением заряженных частиц неоднородностями межпланетного магнитного поля и ударными волнами в солнечном ветре.

Наиболее сильные и продолжительные форбуш-эффекты обусловлены корональными выбросами массы. Однако не менее интересно изучить влияние рекуррентных высокоскоростных потоков (ВСП) солнечного ветра на галактические космические лучи вблизи орбиты Земли; в данной работе предпринята такая попытка.

В течение многих лет происхождение рекуррентных ВСП оставалось загадкой, поскольку им не соответствовали какие-либо видимые особенности на поверхности Солнца. В настоящее

время можно считать доказанным, что обсуждаемые потоки зарождаются на Солнце в области так называемых корональных дыр.

Корональные дыры (КД) — это крупномасштабные области солнечной атмосферы с пониженной плотностью вещества и температуры. Корональные дыры регистрируются как участки короны с пониженной эмиссией в мягком рентгене и одновременно проявляются в различных линиях излучения из других слоев солнечной атмосферы [6, 7].

Но далеко не все корональные дыры порождают квазистационарные высокоскоростные потоки солнечного ветра, поэтому в первую очередь нужно установить надежную связь корональной дыры с высокоскоростным потоком СВ, после чего можно приступить к изучению взаимодействия этих потоков с космическими лучами.

В настоящей работе на большом статистическом материале исследуется связь корональных дыр с высокоскоростными потоками СВ на орбите Земли и модуляция этими потоками галактических космических лучей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

**Подготовка выборки по корональным дырам.** В работе использовался большой массив наблюдательных данных за 2000—2013 гг.

В процессе анализа из рассмотрения исключались корональные дыры, высокоскоростные потоки из которых не могут пересечь плоскость эклиптики и быть зарегистрированными космическими аппаратами вблизи Земли. Такая ситуация возможна по следующим причинам:

1) высокоскоростной поток, расширяясь в межпланетное пространство, отклоняется от радиального направления;

2) полярные корональные дыры, границы которых удалены от экватора более чем на  $50\text{--}60^\circ$ , зачастую не могут быть источниками высокоскоростного потока квазистационарного СВ на орбите Земли [3];

3) если между корональной дырой и плоскостью эклиптики находится протяженный участок пояса или цепочки корональных стримеров, то в этом случае высокоскоростной поток не пере-

секает плоскость эклиптики, так как отклонение по широте участка пояса стримеров приводит к отклонению прилегающего к нему быстрого потока СВ.

Положения пояса и цепочек стримеров над видимым диском Солнца могут быть найдены с помощью расчетов магнитного поля в короне в потенциальном приближении [4, 5], или с использованием изображений короны, полученных коронографами LASCO C2 и C3 [2].

На основе вышеуказанных критериев было отобрано около 600 корональных дыр, прохождение которых через центральный меридиан Солнца могло бы быть источником высокоскоростных потоков СВ на орбите Земли. После этого мы провели анализ на соответствие выбранных корональных дыр высокоскоростным потокам рекуррентного СВ, зарегистрированным на орбите Земли.

**Анализ связи высокоскоростных потоков солнечного ветра на орбите Земли с выбранными корональными дырами.** Сведения о солнечном ветре на орбите Земли были получены по данным сайта OMNIweb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). К высокоскоростным потокам солнечного ветра мы относили участки квазистационарного СВ со скоростью  $V \geq 400$  км/с, исключая области СВ за фронтом ударной волны, магнитные облака и другие межпланетные корональные выбросы массы. Также учитывались такие свойства квазистационарного СВ, как пониженная плотность протонов, повышенная температура и др. Если рассматриваемый поток не соответствовал выбранным критериям, он не анализировался.

Для нахождения рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на орбите Земли, связанных с выделенными корональными дырами, можно использовать методику, детально описанную в работе [1]. Согласно этой методике с помощью соотношения

$$T_{V/2} = T_{\text{КД}} \pm dT + (4 \pm 1.5 \text{ сут}) \quad (1)$$

можно найти интервал времени, в пределах которого на орбите Земли должен регистрироваться фронт высокоскоростного потока СВ, источником которого является выделенная корональная дыра. Здесь  $T_{V/2}$  — момент времени, когда на

орбите Земли регистрируется середина фронта высокоскоростного потока,  $T_{\text{КД}}$  — момент регистрации корональной дыры,  $dT$  — интервал времени между моментом регистрации дыры и моментом, когда центр дыры оказывается на центральном меридиане. Если корональная дыра в момент  $T_{\text{КД}}$  зарегистрирована к востоку от центрального меридиана, то перед  $dT$  ставится знак «+», если к западу от центрального меридиана то знак «-». При этом

$$dT = |F_{\text{КД}}|/\Omega, \quad (2)$$

где  $F_{\text{КД}}$  — долгота центра КД, отсчитываемая от центрального меридиана (отрицательная к востоку, положительная к западу от центрального меридиана),  $\Omega$  — угловая скорость вращения Солнца, соответствующая длительности кэррингтоновского оборота.

Если фронт высокоскоростного потока квазистационарного СВ попадал в интервал времени, определяемый соотношением (1), то поток считался связанным с выделенной КД. При этом полярность магнитного поля на Солнце в КД и межпланетного магнитного поля в области высокоскоростного потока на орбите Земли должна совпадать.

**Критерий отбора понижений в потоке галактических космических лучей, источником которых являются высокоскоростные потоки солнечного ветра от выбранных корональных дыр.** Интенсивность космических лучей была исследована с использованием нейтронных мониторов по данным пяти станций (Moscow, Oulu, Climax, Kiel, Apatity). К каждой выбранной корональной дыре (соответственно к каждому высокоскоростному потоку СВ, связанному с ней) был построен график зависимости интенсивности потока галактических космических лучей от времени. В результате мы обнаружили, что многие высокоскоростные потоки очень слабо модулируют поток галактических космических лучей. Оставшиеся события, где эта модуляция была заметна (наблюдалось понижение потока ГКЛ), были отобраны для дальнейшего анализа.

Далее особое внимание было уделено форме профиля форбуш-понижения. Так, если был зарегистрирован предвестник форбуш-пониже-

ния или пост-форбуш снижение, если событие находилось в фазе восстановления или в нисходящей фазе, мы сразу исключали такие события из дальнейшего рассмотрения (поскольку зачастую такие особенности профиля форбуш-понижения говорят о модуляции ГКЛ *спорадическими* потоками СВ).

В итоге мы пришли к выводу, что понижения в потоке галактических космических лучей, вызванные *рекуррентными* высокоскоростными потоками СВ от выбранных КД, в графическом представлении должны иметь прямоугольную форму. Именно этот критерий (форма профиля понижения) стал одним из основных при подготовке выборки форбуш-понижений, вызванных прохождением по диску Солнца определенных корональных дыр.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

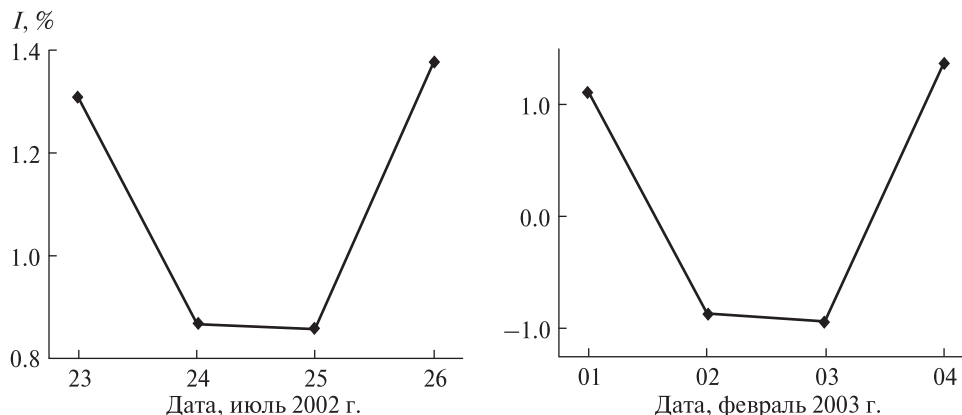
Каждая из отобранных корональных дыр была проанализирована с использованием методики, описанной выше, на предмет связи с высокоскоростным потоком рекуррентного СВ на орбите Земли. Те события, для которых эта связь была подтверждена, были отобраны для дальнейшего анализа.

Следующим этапом был поиск форбуш-понижений определенного типа, возникших в результате модуляции потока галактических космических лучей высокоскоростными потоками рекуррентного солнечного ветра. Такие понижения действительно были найдены (по данным пяти использованных нейтронных мониторов), и графики некоторых из них представлены на рис. 1.

В результате было отобрано больше 50 подобных событий, 25 из которых, на наш взгляд, наилучшим образом демонстрируют прямую связь корональной дыры, высокоскоростного потока рекуррентного СВ и «форбуш-понижение».

В таблице даны итоговые статистические сведения, относящиеся к выбранным корональным дырам, высокоскоростным потокам рекуррентного СВ и связанным с ними понижениям интенсивности ГКЛ.

В результате можно выделить следующие особенности исследованных понижений интенсивности ГКЛ вследствие модуляции рекуррентны-

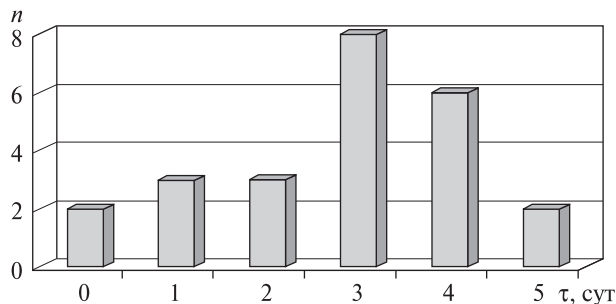


**Рис. 1.** Понижение интенсивности  $I$  потока галактических космических лучей вследствие модуляции высокоскоростных потоков рекуррентного СВ, зарегистрированное 23 июня 2002 г. и 1 февраля 2003 г. Московским НМ

**Физические параметры корональных дыр, высокоскоростных потоков солнечного ветра и связанных с ними понижений интенсивности галактических космических лучей**

Дата наблюдения корональных дыр	Положение корональных дыр на диске Солнца	Дата пересечения Землей середины фронта высокоскоростных потоков	$V_{СВ}^{max}$ , км/с	Начало понижения	Продолжительность понижения, сут
23.06.2002	З*	24.06.2002	505	23.06.2002	4
04.09.2002	Ц	08.09.2002	549	07.09.2002	4
28.09.2002	Ц/Ю	02—03.10.2002	516	02.10.2002	5
13—14.11.2002	Ц/Ю	16.11.2002	510	16.11.2002	6
04.12.2002	Ц	08.12.2002	707	07.12.2002	5
01—03.02.2003	Ц/С	03.02.2003	684	01.02.2003	4
25.05.2003	Ю	29.05.2003	716	29.05.2003	6
28.01.—02.02.2004	С	03—04.02.2004	852	02.02.2004	4
27—29.04.2005	С	01.05.2005	705	01.05.2005	4
22.06.2005	Ц	24.06.2005	566	23.06.2005	6
04.08.2005	Ц	07.08.2005	907	05.08.2005	5
10—12.10.2006	Ц	13.10.2006	607	12.10.2006	4
09—11.03.2007	Ц/Ю	13—14.03.2007	710	11.03.2007	5
27—28.05.2008	Ц	31.05.2008	710	28.05.2008	8
19—20.12.2008	Ц	23.12.2008	573	22.12.2008	5
10—11.02.2009	Ц	15.02.2009	570	13.02.2009	5
05—07.04.2009	Ц	10—11.04.2009	560	08.04.2009	7
09—10.09.2009	С	14.09.2009	388	13.09.2009	5
16.01.2010	С	21.01.2010	575	20.01.2010	5
11—12.11.2010	Ц	15—16.11.2010	828	14.11.2010	5
07—09.12.2010	Ц	13.12.2010	757	12.12.2010	6
18.03.2011	Ц	22.03.2011	483	20.03.2011	4
14—19.07.2012	С	18—24.07.2012	565	18.07.2012	9
	Ю		555		
15—16.08.2012	Ю	19.08.2012	572	18.08.2012	6

*Примечание:* Ц — корональная дыра проходила через экватор, Ю — положение центра корональной дыры было смещено к югу от экватора, С — положение центра корональной дыры было смещено к северу относительно экватора, З, В — центры корональных дыр расположены к востоку или к западу от центрального меридиана



**Рис. 2.** Распределение числа событий  $n$  по величине запаздывания  $\tau$  понижений интенсивности галактических космических лучей относительно регистрации высокоскоростных потоков рекуррентного СВ на орбите Земли

ми высокоскоростными потоками СВ от корональных дыр:

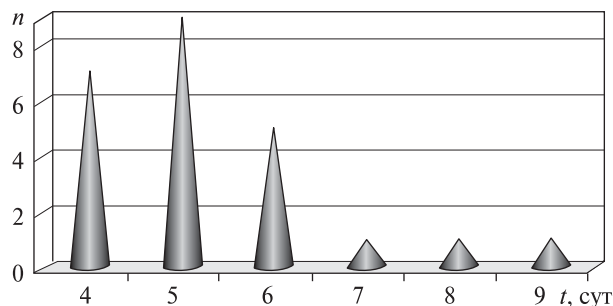
- коэффициент корреляции понижений интенсивности ГКЛ с рекуррентными высокоскоростными потоками СВ от выбранных 25 корональных дыр достаточно высок, и в среднем составляет  $-0.89$ ;

- величина понижений, вызванных модуляцией потока ГКЛ рекуррентными высокоскоростными потоками СВ, была значительно меньше обычных форбуш-понижений от корональных выбросов массы и составляла всего 1–2.5 %, в то время как понижения в потоке ГКЛ от корональных выбросов массы и других межпланетных ударных волн могут достигать 18–25 %;

- наиболее часто понижение в потоке интенсивности ГКЛ регистрировалось на 3–4 сут после регистрации высокоскоростного потока солнечного ветра от корональной дыры (гистограмма на рис. 2). Здесь под  $\tau = 0$  подразумевается, что понижение в потоке ГКЛ наблюдалось в те же сутки, что и регистрация корональной дыры, вызвавшей его;

- длительность  $t$  понижений интенсивности ГКЛ (от начала спада до полного восстановления интенсивности) чаще всего составляла 5 сут (гистограмма на рис. 3).

Данный результат говорит о том, что длительность исследованных понижений (4–6 сут) согласуется с временем жизни соответствующих высокоскоростных потоков в окрестностях Земли, а это, в свою очередь, согласуется со временем прохождения корональной дыры через цен-



**Рис. 3.** Частотное распределение длительности  $t$  исследованных понижений интенсивности галактических космических лучей

тральный меридиан Солнца (при протяженности корональных дыр по долготе 30–90°) [3].

## ВЫВОДЫ

В результате статистического анализа многолетних наблюдений мы можем сделать вывод, что не только корональные выбросы массы и другие спорадические потоки СВ могут быть причиной возникновения понижений интенсивности ГКЛ (в том числе и форбуш-понижений), но и корональные дыры, порождающие высокоскоростные потоки рекуррентного солнечного ветра, могут модулировать поток галактических космических лучей в окрестностях Земли.

Для объяснения этих эффектов требуется построение теоретической модели высокоскоростных потоков, которая будет развита нами в дальнейшем.

*Автор признателен создателям аппарата SOHO за использованные данные с сайта <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>, научным группам, работающим над сайтами [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html) (“Coronal hole history (since late October 2002)”), <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>, <http://www.lmsal.com/isolsearch> и <http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/main.htm> за свободный доступ к данным.*

1. Житник И. А., Жигалкин Р. К., Игнатьев А. П. и др. Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф: IV. Корональные дыры, открытые магнитные трубки и их связь с высокоскоростными потоками солнечного ветра // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2005. — **101**. — С. 128–145.

2. Файнштейн В. Г., Манженко А. А. Конфигурация пояса корональных стримеров по данным LASCO/SOHO и расчетам магнитного поля в короне: сравнительный анализ // Солнечно-земная физика. — 2004. — Вып. 4. — С. 33.
3. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976. — 302 с.
4. Eselevich V. G., Fainshtein V. G., Rudenko G. V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona // Solar Phys. — 1999. — **188**. — P. 277.
5. Eselevich V. G., Kaigorodov A. P., Fainshtein V. G. Some peculiarities of solar plasma flows from coronal holes // Planet Space Sci. — 1990. — **38**. — P. 459.
6. Zirin H. The Sun. — New York: Cambridge University Press, 1988. — 259 p.
7. Zirker J. (ed.) Coronal Holes and High-Speed Wind Streams. — Boulder: Colorado Associated University Press, 1977. — 454 p.

*Стаття надійшла до редакції 13.02.14*

А. И. Ключева

#### ЕФЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ПОТОКАМИ ВІД КОРОНАЛЬНИХ ДІР

Досліджується вплив високошвидкісних потоків сонячного вітру від корональних дір на інтенсивність галактичних космічних променів з використанням даних п'яти нейтронних моніторів впродовж 2000—2013 рр.

А. И. Ключева

#### SOME EFFECTS OF DECREASE IN THE INTENSITY OF GALACTIC COSMIC RAYS WHICH ARE CAUSED BY CORONAL HOLE STREAMS

We investigate the influence of high-speed solar wind streams from coronal holes on cosmic-ray intensity on the basis of neutron monitor data of five stations from 2000 to 2013.