

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.115-118

## ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В СОЛНЕЧНЫЙ МИНИМУМ ЗА 2015-2017 г.

А.В. Борисенко

Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия, e-mail: sunw77@mail.ru



Степанян Н.Н. (1931-2018)

Памяти известного советского и российского солнечного астронома, моего научного руководителя, давшей мне и многим коллегам дорогу в науку, **Степанян (Стефанович) Натальи Николаевны** посвящается эта работа.

**Аннотация.** Систематическое изучение корональных дыр началось в конце 1970-х годов с согласованной научной программы наблюдений орбитальной обсерватории SkyLab и наземных наблюдений в инфракрасной линии HeI 10830A (обсерватория Китт-Пик, США). Впервые в Советском Союзе начали изучать корональные дыры в Лаборатории физики Солнца Крымской астрофизической обсерватории с конца 80-х годов под руководством Н.Н. Степанян по спектрогелиограммам HeI 10830A полученными на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2. Анализ наблюдений, полученных по данным спутника ACE/SWEPAM, показал, что на "спокойном" Солнце корональные дыры являются единственными источниками быстрого солнечного ветра (> 450 км/с за период 2015-2017 гг.). Были подтверждены ранние научные результаты при исследовании корональных дыр [4, 5]. Возможно, корональные дыры являются единственным источником высокоскоростных потоков частиц солнечного ветра для спокойного Солнца, которые нарушают собственное магнитное поле Земли и влияют на атмосферные эффекты, вызывая полярные сияния, геомагнитные бури, а также не исключено их влияние на метеорологические и геофизические события. Была получена квазилинейная зависимость между изменением площади однополярной корональной дыры и скоростью солнечного ветра для всего видимого диска. С ростом площади корональной дыры скорость солнечного ветра увеличивается, и наоборот. Полученный коэффициент корреляции 0,74 между площадью корональной дыры, проходящей через центральный меридиан и скоростью солнечного ветра в точке Лагранжа L1 позволяет говорить о квазилинейной зависимости.

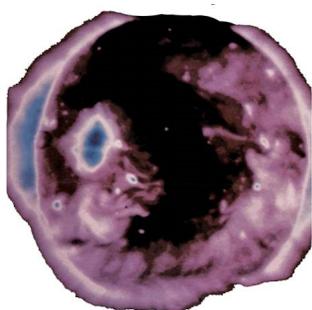


Рисунок 1. КД "Италия".

ASE rocket mission. Одно из первых изображений корональной дыры из космоса до полета SkyLab. Снимок был обработан и реконструирован в центре космических полетов (Хьюстон, США).

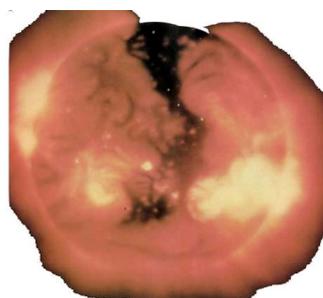
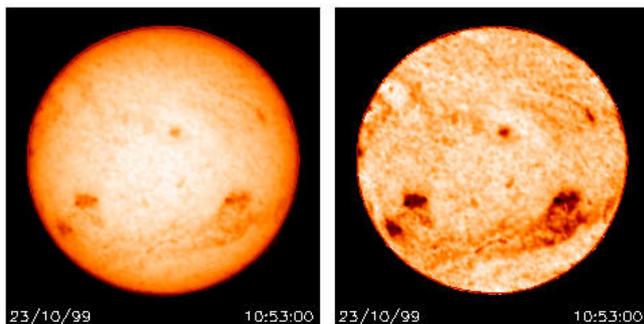


Рисунок 2. КД в рентгене. SkyLab mission.

## Введение

Общепризнано что корональные дыры (КД) – протяженные темные области в солнечной атмосфере с пониженной плотностью, преимущественно “открытыми” силовыми линиями магнитного поля, расходящимися все более радиально с высотой при переходе от хромосферы к короне.

Впервые корональные дыры были описаны известным швейцарским астрономом Максом Вальдмайером в 50-е годы 20 века [1, 2], когда он отметил на полученных с помощью коронографа изображениях солнечной короны в зеленой оптической линии 5303Å, протяженные области пониженной яркости, находясь в одной из высокогорных научных экспедиций по наблюдению солнечных затмений.



**Рисунок 3.** Солнце в линии HeI 10830Å. КРАО/БСТ2. Слева - “сырое” изображение. Справа – обработанное изображение группой НН. Степанян с учетом исправлений ненужных оптических эффектов, присущих наземным наблюдениям.

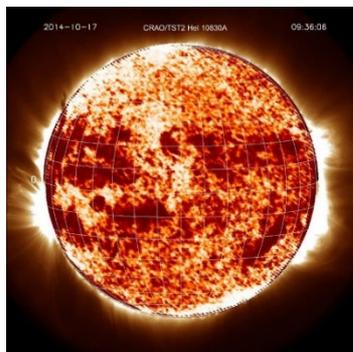
В 60-х годах с началом космической эры начались первые внеатмосферные наблюдения, а позже первые космические наблюдения корональных дыр с ракет, космических аппаратов в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазоне длин волн (Рис. 1).

Но только в 70-е годы началось систематическое изучение корональных дыр с координированной научной программы наблюдений орбитальной обсерватории SkyLab (Рис. 2) и наземными хромосферными наблюдениями в инфракрасной линии HeI 10830Å (обсерватория Китт-Пик, США).

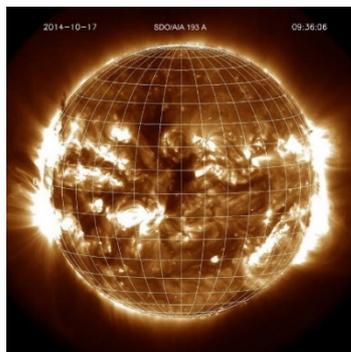
Впервые в нашей стране корональные дыры начали изучать в 80-е годы сотрудники лаборатории физики Солнца КРАО под руководством известного солнечного астронома Н.Н. Степанян по полученным в инфракрасной линии HeI 10830Å хромосферным

спектрогелиограммам на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2 (Рис. 3). Как видно на том же рисунке справа после дополнительной программной обработки становится видна “невидимая” еще слева корональная дыра в южном полушарии.

При сравнении наблюдений корональных дыр в хромосферных и корональных линиях надо помнить, в инфракрасной линии гелия (Рис. 4) корональные дыры ярче(светлее) окружающих “спокойных” областей, а в ультрафиолетовых (Рис. 5), рентгеновских спектральных линиях темнее “спокойной” окружающей короны.



**Рисунок 4.** Солнечная хромосфера. CRAO/TST2 HeI 10830Å.



**Рисунок 5.** Солнечная корона. SDO/AIA 193Å.

## Солнечный ветер и ACE спутник

По существу, солнечный ветер (поток ионизованных частиц) представляет собой непрерывно расширяющуюся солнечную корону, где давление нагретого газа (плазмы) вызывает ее стационарное гидродинамическое течение [3]. Спутник ACE (Advanced Composition Explorer) запущен в августе 1997 года, находится на околоземной орбите в точке Лагранжа L1. ACE несет на борту 9 инструментов, которые могут собирать и измерять частицы, изотопы в десятки и более раз лучше (быстрее), чем предыдущие космические аппараты.

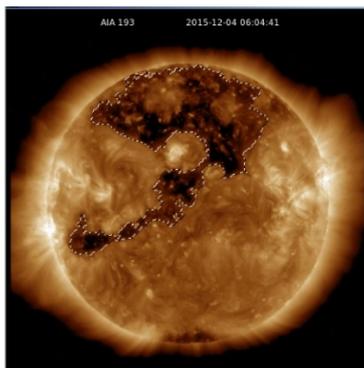
ACE/SWEPAM –Solar Wind Proton Alpha Monitor измеряет физические

параметры частиц в составе солнечного ветра. В отличие от спутника предыдущего поколения Ulysses, поле зрения прибора ACE/SWEPAM просматривается во всех направлениях солнечного ветра, путем вращения спутника ACE.

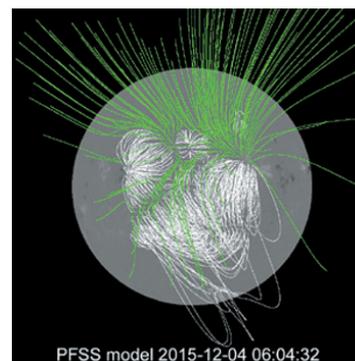
Ulysses/SWOOPS –Solar Wind Over the Poles of the Sun измерял преимущественно направления солнечного ветра в основном от полюсов Солнца.

Данные измерений ACE/SWEPAM по скоростям солнечного ветра, предназначенные для научного анализа брались с сайта NASA/GSFC-SPDF-OmniWeb <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> Данные представляют собой результаты обработки ежесуточных отсчетов (каждые 4 мин) измерений Bulk speed (объемной гидродинамической скорости) солнечного ветра, регистрируемой инструментом ACE/SWEPAM в точке L1.

Для каждого момента времени вычисляемая объемная скорость представляет собой результат сложных вычислений, учитывающий среднюю скорость потока частиц в определенном объеме, внутри которого учитываются траектории “тепловых” колебаний частиц с множеством физических параметров (по простому сказать решают задачу нерелятивистской магнитогидродинамики), модель которой учитывает механизмы ускорения солнечного ветра от Солнца до Земли.



**Рисунок 6.**  
Определение границ КД.

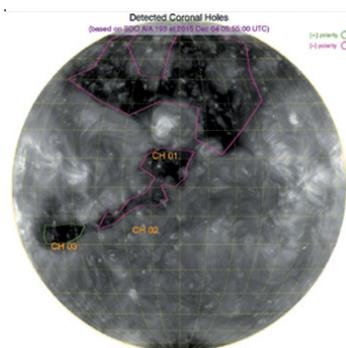


**Рисунок 7.** PFSS модель для уточнения границ КД.

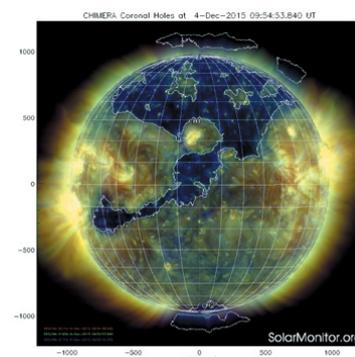
### Корональные дыры и солнечный ветер

Один из первых полученных “фундаментальных” научных результатов по корональным дырам тот, что корональные дыры являются источниками высокоскоростного солнечного ветра [5].

С июня 2015 г по сентябрь 2017 г на протяжении 31 кэррингтоновского оборота на Солнце в северном полушарии изучалась эволюция гигантской корональной дыры. Это событие было уникально тем, что подобных долгоживущих событий на “спокойном” Солнце не наблюдалось много лет.



**Рисунок 8.**  
ASSA алгоритм.



**Рисунок 9.**  
CHIMERA алгоритм.

### Данные. Метод обработки

Определение площадей корональных дыр проводилось “ручным способом” (для большей точности расчетов) по полученным из FITS файлов SDO/AIA 193A изображениям с использованием математических, тригонометрических вычислений, вспомогательных программ (Рис. 6). Данные SDO брались с сайта VSO виртуальной солнечной обсерватории <https://virtualsolar.org>. В сложных случаях определения границ корональных дыр, а также для проверки правильности “ручного способа” использовались модели PFSS – экстраполяции фотосферного магнитного поля SDO/HMI магнитограммы в линии 6173A (SolarSoft IDL) (Рис. 7), результаты полученные с помощью машинных алгоритмов ASSA (Рис. 8), CHIMERA (Рис. 9) <https://solarmonitor.org>. Bulk speed – скорость солнечного ветра за рассматриваемый период 31 кэррингтоновский оборот менялась в среднем от 300 до 700 км/с. Вычисленное среднее время запаздывания солнечного ветра от Солнца до L1 точки от момента прохождения КД вдоль центрального меридиана составило 3-4 суток.

### Корональные дыры и геомагнитные бури

Сильные возмущения земной магнитосферы из космоса могут быть вызваны в результате “бомбардирования” частиц, входящих в состав высокоскоростного солнечного ветра. По данным лаборатории рентгеновской астрономии ФИАН <https://tesis.lebedev.ru> и сервиса Helioviewer <https://helioviewer.org> был проведен анализ связи планетарного геомагнитного индекса Kp со средней скоростью солнечного ветра ACE/SWEPAM. (Рис. 10).

### Заключение

1. Полученный высокий коэфф. корреляции 0.74 свидетельствует о квазилинейной прямой зависимости между площадью КД и скоростью солнечного ветра (Рис. 11). Самый высокий коэфф. корреляции 0.96 между площадью КД и скоростью солнечного ветра в истории был получен [4] для 10 кэррингтоновских оборотов в эпоху SkyLab –солнечный минимум.

Средняя величина запаздывания солнечного ветра около 3-4 суток, что соответствует для рассм. периода 31 кэррингтоновского оборота средней скорости 505-506 км/с –высокоскоростному ветру преимущественно от КД на “спокойном” Солнце.

2. Анализ геомагнитных данных показал, что на “спокойном” Солнце источником высокоскоростного солнечного ветра преимущественно являются большие КД, проходящие через центральный меридиан.

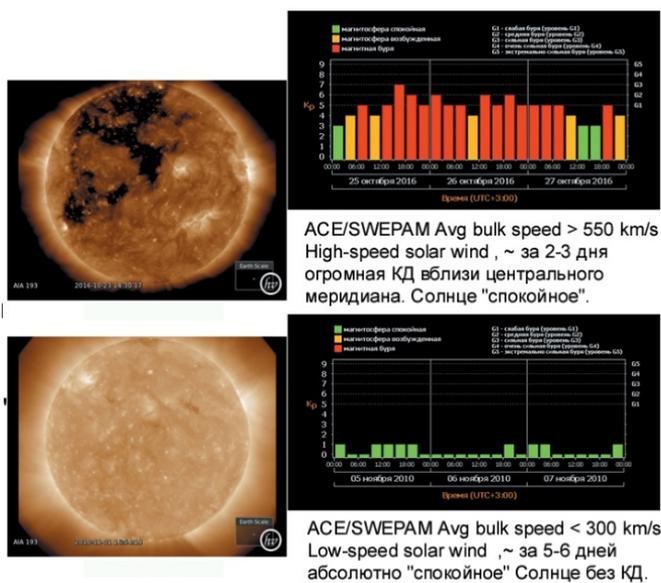


Рисунок 10. КД и геомагнитные бури.

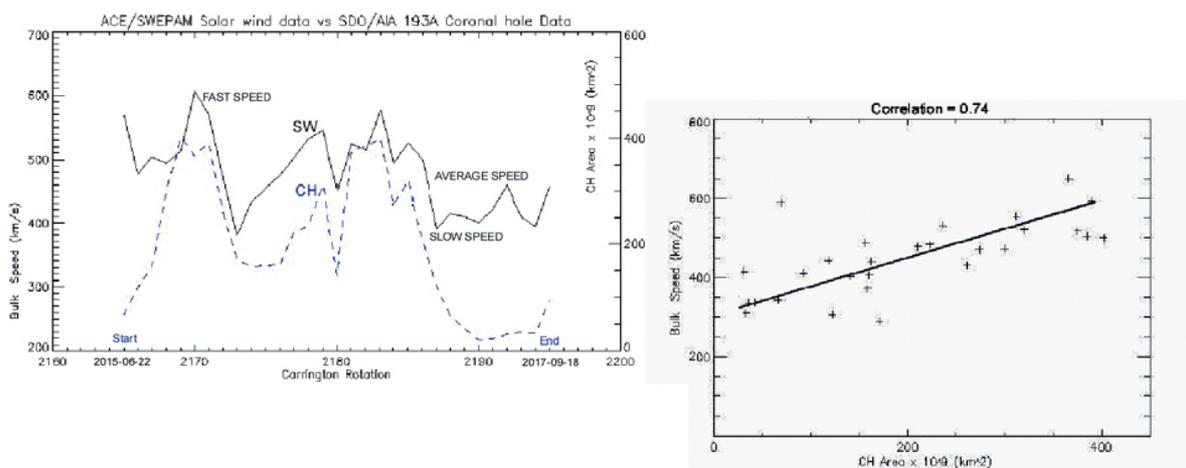


Рисунок 11. Корональные дыры и солнечный ветер.

### Литература

1. Waldmeier M. // Z. Astrophys. 1956. V. 38. P. 219.
2. Waldmeier M. // Die Sonnenkorona. Birkh` auser. Basel. 1957. V. 2.
3. Parker, E.N., Extension of the solar corona into interplanetary space, J. Geophys. Res., 1959, vol. 64, pp. 1675–1681.
4. Nolte, J.T., Krieger, A.S., Timothy, A.F., Gold, R.E., Roelof, E.C., Vaiana, G., Lazarus, A.J., Sullivan, J.D. and McIntosh, P.S., Coronal holes as sources of solar wind, Solar Phys., 1976,46, 303–322. [ADS] (Cited on pages 14 and 21.)
5. Zirker, J. B.: (ed.) 1977, Coronal Holes and High-speed Wind Streams, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder