

УДК 523.98-726

КАТАЛОГ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ ТЕКУЩЕГО 25-го СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА В СОВРЕМЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

© 2023 г. Л. П. Забаринская¹ *, В. Н. Ишков^{1, 2}, Н. А. Сергеева¹

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская обл., Россия

*mila@wdcb.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Для изучения происходящих на Солнце и в межпланетном пространстве явлений и их влияния на околоземное космическое пространство, на процессы во внешних и внутренних оболочках Земли наиболее ценными становятся результаты непрерывных многолетних наблюдений за солнечной активностью. Представительная коллекция таких длительных однородных рядов систематических наблюдений, полученных мировой сетью солнечных и астрономических обсерваторий, а также космическими аппаратами, собрана в Мировом центре данных по солнечно-земной физике в Москве. В статье приведено описание накопительного интерактивного каталога основных характеристик значимых солнечных вспышечных событий текущего 25-го цикла солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0023420623600095, EDN: CAENPE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время экспериментальные данные о солнечной активности (СА) находят самое широкое применение в области фундаментальных и прикладных научных исследований – изучении явлений происходящих на Солнце и в межпланетном пространстве, и их влияния на процессы во внешних и, возможно, внутренних оболочках Земли.

Одним из мощных проявлений СА, влияющих на Землю, стали геоэффективные вспышечные события – процессы в солнечной атмосфере (хромосфере и короне), вызванные взрывными выделениями энергии в активных областях Солнца как с пятнами, так и без них, что связано с взаимодействием новых всплывающих магнитных потоков с уже существующим магнитным полем активных областей.

Вспышки генерируют кратковременное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн от жесткого рентгеновского излучения ($\lambda \approx 10^{-9}$ см), а в очень редких случаях от гамма-излучения ($\lambda \approx 10^{-11}$ см), до километровых радиоволн (10^6 см). Частота и мощность солнечных вспышечных событий за какой-либо промежуток времени характеризуют уровень СА.

В зависимости от максимальной интенсивности рентгеновского всплеска в стандартном диапазоне длин волн (0.1–0.8 нм) или в диапазоне

энергий (12.5–1 кэВ), вспышке присваивается определенный класс, который обозначается буквами латинского алфавита: А, В, С, М и Х. Минимальный класс А1.0 соответствует мощности излучения на орбите Земли в 10^{-8} Вт/м² и при переходе в каждый следующий класс увеличивается в 10 раз. Для вспышек максимального класса Х этот поток равен или превышает 10^{-4} Вт/м². Надо отметить, что детекторы излучения, установленные на различных спутниках серии GOES (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite) для измерения потоков рентгеновского излучения в стандартном диапазоне, имеют различные пороги насыщения, что затрудняет прямое сравнение мощных вспышечных событий. До 1976 г. этот порог интенсивности потока составлял $X \geq 5.4$ (т.е. $5.4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²) и, таким образом, знаменитые, несомненно, экстремальные, вспышки 4 и 7 августа 1972 г. формально имели рентгеновский балл $X \geq 5.4$. Затем, вплоть до 1996 г. порог насыщения стал уже $X \geq 12.5$, а после 1996 г. и до настоящего времени – $X \geq 17.5$. Соответственно, для самых мощных вспышек, у которых интенсивность потока превышала указанный порог, рентгеновский балл определялся условно, пропорционально времени запираания прибора.

Прямые измерения потока рентгеновского излучения осуществляются высокотехнологичны-

ми телескопами, имеющими пространственное и спектральное разрешение, установленное на космических аппаратах (обсерваториях).

КАТАЛОГИ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Большой научный интерес представляет анализ поведения параметров значимых солнечных активных событий на протяжении 11-летних циклов СА. Особое значение имеет систематизация данных о вспышках и протонных событиях и представление информации в виде серии однотипных каталогов, охватывающих продолжительные временные интервалы. В Мировом центре данных по солнечно-земной физике в Москве (МЦД по СЗФ) в разделе “Солнечная активность” опубликованы (http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.ru.html) серии каталогов по солнечным активным явлениям и их воздействию на околоземное космическое пространство. В каталогах собрана достаточно полная информация о солнечных вспышечных событиях рентгеновского класса от M1 до $X \leq 17.5$ за 23-й и 24-й циклы СА (1996–2019) и солнечных протонных событий за 20–24-й солнечные циклы (1970–2019).

Такие каталоги позволяют сравнивать вспышечную активность и радиационную обстановку в межпланетном пространстве (в частности, вблизи Земли) разных солнечных циклов в разные эпохи СА: переходного временного интервала от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА 23-го солнечного цикла (1996–2008) и 24-го (2009–2019) – первого цикла второй эпохи пониженной СА [1, 2]. Для каталогов солнечных протонных событий временной интервал включает в себя эпохи повышенной (солнечные циклы 20–22), пониженной СА (24-й цикл) и переходного периода между эпохами 23-го солнечного цикла.

Каталог солнечных вспышечных событий содержит для каждого события дату (год, месяц и день) и время начала, максимума и конца *полного* вспышечного события: оптической вспышки в линии $H\alpha$ ($\lambda = 656.5$ нм) и всплеска в стандартном диапазоне мягкого рентгена (0.1–0.8 нм = 12.5–1.0 кэВ). Время начала вспышечного события определяется по первому проявлению вспышки либо в линии $H\alpha$, либо в рентгене, максимум – по максимальной интенсивности рентгеновского всплеска, а конец события – по последнему времени в обоих диапазонах. Это вызвано тем, что конец рентгеновского всплеска дается по времени, когда его интенсивность спадает до половинного значения.

Далее следует рентгеновский класс и оптический (в $H\alpha$ линии) балл, интегральный поток рентгеновского излучения, координаты (гелио-

графические широта и долгота, кэррингтоновская долгота), номер активной области по системе NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований) (Active Region – AR), пиковый радиопоток на выбранных частотах, динамические радиовсплески (тип II и тип IV), характеристики коронального выброса вещества, время и максимальная энергия жесткого рентгеновского излучения, максимальный поток солнечных протонов и сопутствующие динамические явления в оптическом диапазоне.

В каталогах МЦД по СЗФ для самых мощных рентгеновских всплесков условные баллы не используются, а приводится реальная интенсивность согласно порогу записи приборов.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КАТАЛОГА ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ 25-го ЦИКЛА СА

Для успешного исследования вспышечной активности Солнца и распределения значимых вспышечных событий в активных областях для текущего 25-го солнечного цикла формируется постоянно пополняющийся (по мере поступления наблюдательных данных) накопительный каталог значимых солнечных вспышечных событий по данным наблюдений в реальном времени [3]. Каталог опубликован на сайте МЦД по СЗФ (http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flare_events.ru.html).

При составлении каталога используются первичные открытые данные с сайтов нескольких центров и лабораторий. В их числе:

– Центр прогнозирования космической погоды Национального управления океанических и атмосферных исследований (*англ.* Space Weather Prediction Center NOAA). На сайте размещается в реальном времени информация о вспышечных событиях со спутников серии *GOES* (<https://www.swpc.noaa.gov/>).

– Солнечный монитор (*англ.* SolarMonitor) (<https://www.solarmonitor.org/>), организованный Группой физики Солнца Дублинского тринити-колледжа (*англ.* Solar Physics Group, Trinity College Dublin) и Дублинским институтом перспективных исследований (*англ.* Dublin Institute for Advanced Studies). Сайт содержит как актуальную (почти в реальном времени), так и архивную сводную информацию об активных областях, корональных дырах (областях в короне Солнца с открытым в межпланетное пространство магнитным полем, ответственных за высокоскоростные потоки солнечного ветра, в свою очередь ответственные за рекуррентные магнитные бури) и вспышечной активности.

– Солнечная и астрофизическая лаборатория Локхид Мартин (*англ.* Lockheed Martin Solar and As-

trophysics Laboratory, LMSAL). Это подразделение Центра передовых технологий (*англ.* Lockheed Martin Advanced Technology Center, ATC, Palo Alto) в Пало-Альто, Калифорния. Сайт содержит “последние события”, архив за более ранние даты и сводную информацию о солнечных активных областях (https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events/).

— Центр обработки данных NASA (CDAW Data Center — *англ.* Coordinated Data Analysis Workshop) вместе с Католическим университетом Америки (*англ.* The Catholic University of America) в сотрудничестве с Военно-морской исследовательской лабораторией (*англ.* Naval Research Laboratory) создали и поддерживают каталог данных “SOHO LASCO CME Catalog” о корональных выбросах вещества (*англ.* Coronal Mass Ejections — CMEs) (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). *SOHO* — проект международного сотрудничества между ESA и NASA — космический аппарат для наблюдения за Солнцем (*англ.* Solar and Heliospheric Observatory), *LASCO* — широкоугольный и спектрометрический коронограф (Large Angle and Spectrometric Coronagraph).

— Центр CACTUS (*англ.* Computer Aided CME Tracking) автономно обнаруживает корональные выбросы вещества (*англ.* Coronal mass ejections — CME) в последовательностях изображений от *LASCO*, с помощью специального программного обеспечения автоматически генерирует список CME в реальном времени и публикует на сайте (<http://sidc.be/cactus/>). Данные этого Центра используются как предварительные.

Также используются данные космических аппаратов *GOES*, *RHESSI* (*англ.* Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) и *FERMI* из Центра космических полетов имени Годдарда NASA (Goddard Space Flight Center NASA) (<https://umbra.nascom.nasa.gov/goes/>, <https://umbra.nascom.nasa.gov/goes/>, https://hesperia.gsfc.nasa.gov/fermi_solar/).

В отличие от каталогов 23-го и 24-го циклов СА, каталог, формируемый для текущего 25-го солнечного цикла, стал интерактивным. Для удобства работы он снабжен системой гиперссылок для активных областей (AR), позволяющих переходить на страницу сайта Лаборатории космических наук Малларда (*англ.* Mullard Space Science Laboratory) (http://helio.mssl.ucl.ac.uk/helio-vo/solar_activity/arstats/), где размещена подробная информация об эволюции активной области, в которой произошло выбранное вспышечное событие, с характеристиками группы пятен, и вспышечной активности за все время прохождения ее по видимому диску Солнца. В качестве примера на рис. 1 отмечено событие, произошедшее в 15 ч 17 мин 28 октября 2021 г. Это единственное вспышечное событие 25-го солнечного цикла, проявившееся на наземных нейтронных

мониторах Ground Level Event. Показан переход на страницу с информацией о соответствующей активной области, где справа приводится таблица с основными характеристиками группы пятен, количество вспышек по классам рентгеновского излучения на каждый день прохождения ею видимого диска Солнца. Под таблицей приведены адреса других активных явлений сопровождающих данное вспышечное событие. Слева приведены графики:

— верхний график: изменения площади пятен в миллионных долях полусферы (левая ось ординат) и сложности магнитной конфигурации (правая ось ординат);

— средний график: временное распределение вспышек по рентгеновским классам;

— нижний график: прямая запись рентгеновского излучения в диапазонах 0.1–0.8 нм (верхняя красная кривая) и 0.05–0.4 нм (нижняя синяя кривая) с рентгеновскими классами по оси ординат.

Такой способ представления данных был отрабатан на Каталогах солнечных протонных событий 23-го и 24-го циклов СА [4, 5], ресурс которых был намного сложнее, так как требовал перехода от содержания к году, когда произошло выбранное протонное событие, и затем к самому событию (рис. 2), включающему в себя:

— полные временные характеристики потока протонов всех доступных энергий от 5 МэВ до гигаэлектронвольт (наземные нейтронные мониторы),

— таблицы и графики интенсивности потоков солнечных протонов и электронов в разных диапазонах энергий со всех доступных космических аппаратов;

— основные характеристики источника частиц, солнечного вспышечного события в оптическом и рентгеновском (от мягкого до жесткого) диапазонах,

— основные параметры сопутствующего радиоизлучения (МГц и кГц) на принятых Службой Солнца частотах и его спектральные характеристики;

— основные характеристики динамических явлений в оптическом диапазоне, которые *генерируются во время и/или сопровождают процесс* энерговыделения вспышечного события, такие как корональные выбросы вещества, выбросы солнечных волокон, спреи, распространение ударных волн от места энерговыделения и т.д.

Все каталоги солнечных вспышечных событий с 23-го по 25-й циклы СА имеют одинаковую форму представления информации. В каждом каталоге перед данными дано подробное описание всех параметров вспышечного события, включенных в каждую строку каталога. Массив

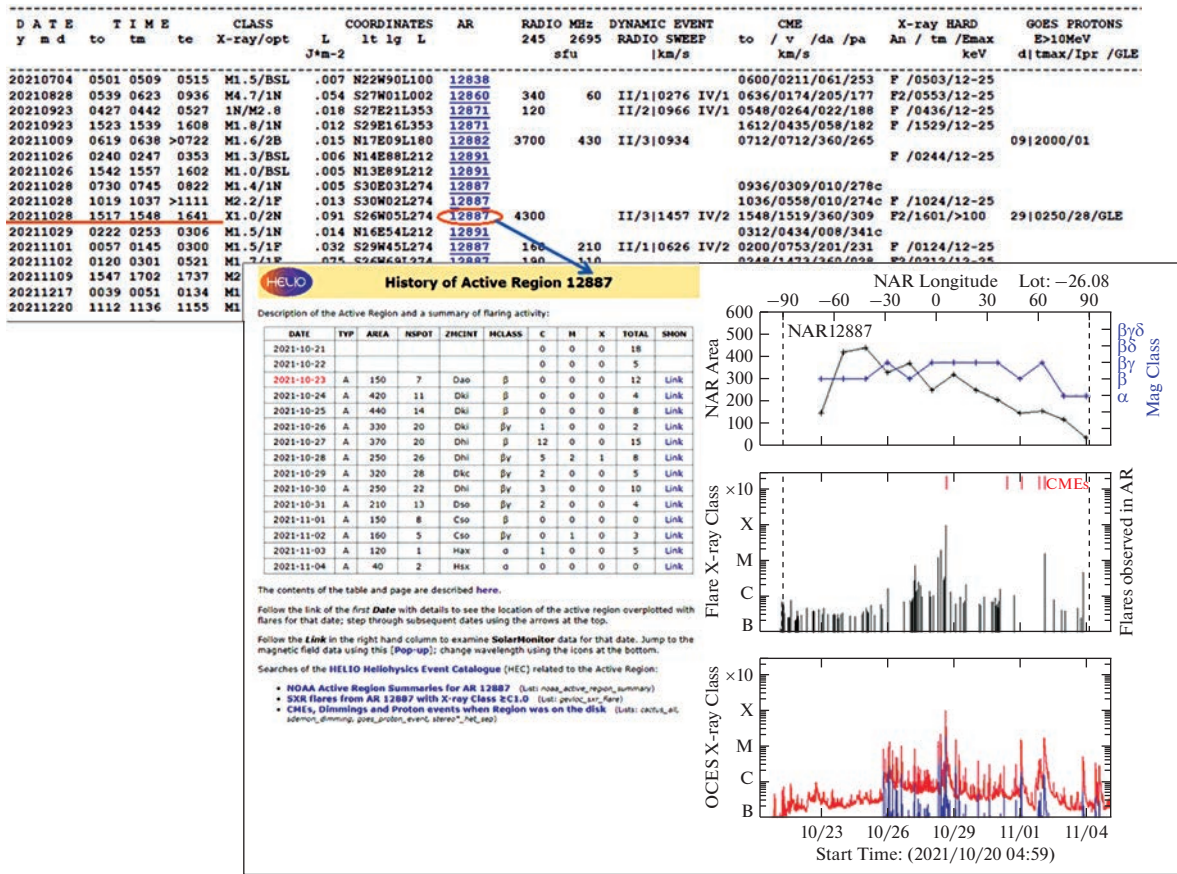


Рис. 1. Фрагмент каталога солнечных вспышечных событий 25-го цикла СА с активными ссылками для перехода на сайт Лаборатории космических наук Малларда [http://helio.mssl.ucl.ac.uk/helio-vo/solar_activity/arstats/] с подробной информацией об эволюции самой активной области с характеристиками группы пятен (таблица слева), ее развитии и вспышечной активности (графики справа).

данных разделен на части по годам. Каждый каталог представлен на сайте МЦД по СЗФ в двух видах: текстовом файле txt в кодах ASCII и файле в формате pdf. Перед публикацией проведена проверка всех строк каталогов на соответствие формату, соблюдение хронологии в последовательности строк, на отсутствие недопустимых символов.

Так как в каталоге приводятся все значимые (в рамках определения) вспышечные события выбранной активной области, появляется возможность быстро выделить в ней все периоды вспышечного энерговыделения и, соответственно, разделить вспышечные события по родительским новым всплывающим магнитным потокам. Обычно последние отделяются друг от друга временным интервалом ≥ 1 сут.

Используя информацию, содержащуюся в каталогах солнечных вспышечных событий, можно сопоставить пятнообразовательную и вспышечную активность Солнца на протяжении 11-летних циклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировой центр данных по СЗФ, публикуя на своем сайте новые базы или наборы данных, стремится применять современные информационные технологии и методы организации и представления данных, обеспечивающие пользователям свободный доступ к данным, удобную работу с ними и возможность цитирования данных.

Каждому каталогу солнечных вспышечных событий присвоен цифровой идентификатор объекта DOI (англ. Digital Object Identifier), зарегистрированный агентством Crossref, позволяющий легко находить их в сети Интернет, так как DOI – ссылка на постоянное местонахождение каталога и его описание, представленное в репозитории проекта “База данных по наукам о Земле” (англ. Earth Science Data Base) (http://esdb.wdcb.ru/) Геофизического центра РАН. При использовании данных из каталогов для исследований в публикациях необходимо ссылаться на них с указанием DOI так же, как и на другие научно-исследовательские источники информации.

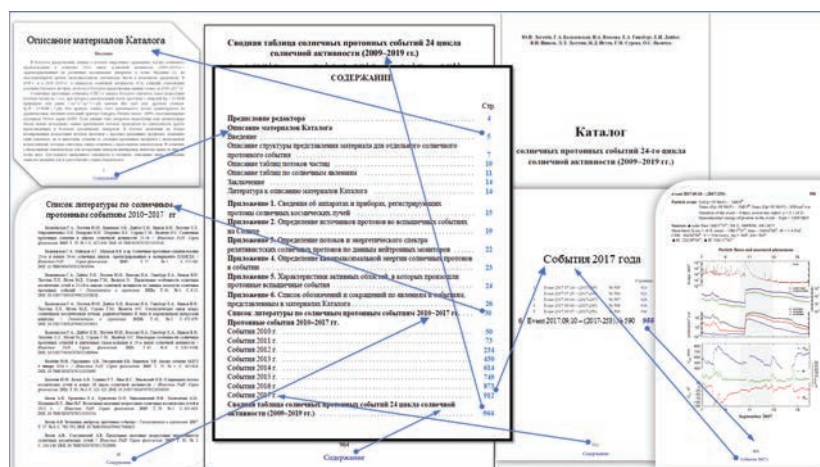


Рис. 2. Пример более сложного по структуре Каталога протонных событий за 24-й цикл солнечной активности и схема “линков”, обеспечивающих возможность перехода между отдельными частями Каталога и быстрый поиск нужных событий, их характеристик и библиографии.

Для каталогов солнечных вспышечных событий, как и для многих других данных, опубликованных на сайте МЦД по СЗФ, используется международная лицензия Creative Commons BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.ru>). Согласно этой лицензии, устанавливаются два условия использования данных: указывать автора данных и запрет на коммерческое использование данных в целях получения прибыли.

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России. В работе использовались оборудование и данные, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ishkov V.N.* The Catalog of Solar Flare Events with X-ray Class M1–X > 17.5 for XXIII cycle of Solar Activity (1996–2008) / Earth Science DataBase repository Geo-

physical Center RAS. 2008.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-01>

2. *Ishkov V.N.* Preliminary Current Catalog of Solar Flare Events with X-ray Classes M1–X > 17.5 XXIV Cycle of Solar Activity / Earth Science DataBase repository Geophysical Center RAS. 2018.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-02>
3. *Ишков В.Н.* Накопительный каталог солнечных вспышечных событий рентгеновского класса M1–X > 17.5 25-го цикла солнечной активности (1.2020–VI.2030) / Earth Science DataBase repository ГЦ РАН. 2023.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-03>
4. *Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др.* Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008) / Earth Science DataBase repository ГЦ РАН. 2016.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-001-RU>
5. *Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Дайбог Е.И. и др.* Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019) / Earth Science DataBase repository ГЦ РАН. 2022.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>