

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО  
СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

А.А.Вахрушева<sup>1,2,\*</sup>, Ю.С.Шугай<sup>1</sup>, К.Б. Капорцева<sup>1,2</sup>, В. Е. Еремеев<sup>1</sup>, В.В. Калегаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский  
государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический факультет Московского государственного университета им. М.В.  
Ломоносова, г. Москва, Россия

\* e-mail: [vakhr.anna@gmail.com](mailto:vakhr.anna@gmail.com)

Поступила в редакцию

Были проведены исследования параметров корональных диммингов за 24 солнечный цикл, с использованием базы данных Solar Demon, в которой содержатся данные по вспышкам и диммингам, полученные путем обработки изображений с космической обсерватории SDO/AIA. Было получено, что из всех проанализированных диммингов 51% ассоциированы со вспышками и 16% ассоциированы с корональными выбросами масс (КВМ) из базы данных SACTus по данным коронографа SOHO/LASCO. По распределению параметров установлено, что димминги, ассоциированные с КВМ, в среднем события с большими абсолютными величинами параметров. Для ассоциированных событий была найдена высокая корреляция между центральным углом димминга и центральным углом КВМ – коэффициент корреляции 0.96. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения вероятности прихода КВМ на околоземную орбиту.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Корональный димминг наблюдается как краткосрочное понижение интенсивности части изображения Солнца в жестком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении. [Hudson et al., 1996, Kraaikamp and Verbeec, 2015]. Физическая причина димминга – флуктуации плотности в нижней короне Солнца, вызванные выбросами плазмы из этой области [Gopalswamy et al., 1999, Harrison et al., 2003]. Существуют также предположения о том, что понижения интенсивности связаны с изменениями температуры [Kraaikamp and Verbeec, 2015]. Однако, в работах [Vanninathan et al., 2018, Reinard and Biesecker, 2008] было показано, что это не может являться основной причиной димминга. С 1996 года сообщалось [Hudson et al., 1996] о детектировании диммингов в связи с

наблюдением вспышек и корональных выбросов масс (КВМ). Анализ и расчет параметров диммингов были выполнены ранее в работах авторов Reinard and Biesecker [2008], Dissauer et al. [2018], [2019], Chikunova et al., [2020], López et al., [2019]. Исследования в разных длинах волн показали, что лучше всего димминги наблюдаются в фильтрах 211 Å и 193 Å [Dissauer et al., 2018]. В пространственной структуре димминга можно выделить два типа областей по данным статей Vanninathan et al., [2018]; Dissauer et al, [2018]:

1) Ядро димминга (core dimming) — область около основания магнитных петель. В этих областях содержится около 20% общего магнитного потока, но они покрывают лишь 5% площади димминга. Эти области темнее по сравнению со всем диммингом.

2) Вторичный (secondary) димминг — область пониженного излучения, вызванная расширением КВМ. Это более протяженная в пространстве часть димминга, являющаяся отпечатком КВМ в нижней короне.

Физическая природа димминга, а также наблюдения позволяют ассоциировать димминги с такими явлениями, как вспышки и КВМ. Общепринятое представление состоит в том, что вспышечные процессы или выбросы протуберанцев и КВМ представляют собой проявления на разных высотах в солнечной короне одного и того же физического процесса [Compagnino et al., 2017]. Существует предположение, что данные о диммингах могут предоставить нам информацию о ранней фазе развития КВМ. КВМ и димминги считаются событиями, связанными между собой во времени и пространстве, что подтверждается исследованиями [Dissauer et al., 2019]. Если КВМ связан с корональным источником на видимой нам стороне Солнца, то, возможно, будет наблюдаться димминг на фоне солнечного диска. Если же источник КВМ находится на обратной стороне Солнца, то димминг либо будет наблюдаться над лимбом Солнца, либо же мы не увидим димминг, который сможем сопоставить с КВМ во времени и пространстве.

В работах Dissauer et al., [2018], [2019] были исследованы корреляции между параметрами димминга и параметрами ассоциированных с ними вспышек и КВМ. Коэффициенты корреляции для зависимостей максимальной скорости КВМ от скорости изменения площади димминга, средней интенсивности димминга, скорости изменения магнитного потока в области димминга, были равны 0.6 – 0.7. Наблюдения выборки диммингов над лимбом с другого ракурса по данным Chikunova et al., [2020] (выборка пересекается с выборкой Dissauer et al., [2019]) дают такие же по порядку коэффициенты корреляции, но в этой работе показано, что максимальная скорость КВМ лучше коррелирует со скоростью изменения площади димминга и со скоростью изменения интенсивности димминга.

В своей работе мы использовали существующие базы данных, пополняемые в режиме близком к реальному времени, чтобы анализировать параметры диммингов за 24-й солнечный цикл и исследовать возможность применения данных о диммингах для моделирования вероятности и времени прихода КВМ на околоземную орбиту.

## 2. ДАННЫЕ

В нашем исследовании мы использовали данные из базы Solar Demon [Kraaikamp and Verbeeck, 2015], в которой рассчитываются и сохраняются параметры вспышек и диммингов с мая 2010 года и до настоящего времени [<https://www.sidc.be/solardemon/>]. Обновление каталога происходит в режиме, близком к режиму реального времени (с задержкой в 15 минут). Детектирование диммингов происходит при обработке изображений Солнца, получаемых с космической обсерватории SDO/AIA [Hurlburt et al., 2012] на длине волны 211 Å, а солнечных вспышек – на длине волны 94 Å. Параметры событий рассчитываются с частотой раз в 2 минуты. Для анализа были выбраны следующие параметры диммингов: продолжительность димминга (разность времени окончания и времени начала димминга), минимум полной интенсивности в  $DN/c \cdot 10^3$  (где  $DN/c$  – цифровые отсчеты в секунду), максимальный скачок интенсивности за минуту в  $DN/c^2$ , координаты геометрического центра димминга на диске Солнца, широта и долгота центра димминга, максимальная площадь в  $км^2 \cdot 10^9$ , скорость роста площади в  $км^2/c \cdot 10^9$ . Мы провели сравнение каталога вспышек Solar Demon с каталогом GOES [<https://data.nas.nasa.gov/helio/portals/solarflares/>] для классов C, M, X.

Данные о КВМ были получены из базы данных системы автоматического детектирования CACTus [<https://www.sidc.be/cactus/>, Robbrecht and Berghmans, 2004]. В системе рассчитаны следующие параметры КВМ: время начала, центральный угол, угол раствора конуса, средняя скорость выброса в плоскости изображения с коронографа. Центральный угол рассчитывается как угол между основным направлением распространения КВМ (середины углового профиля) и направлением на север против часовой стрелки.

События из база данных CACTus нами дополнительно обрабатывались [Shugay et al., 2022]. Чтобы снизить вероятность детектирования одного и того же КВМ как нескольких, все события, начинающиеся в одно и то же время в пределах 50 минут и с перекрывающимися углами, объединяются. Затем, если один из этих КВМ является гало или частичным гало, мы выбираем его параметры как основные. Если нет, то параметры рассчитываются, исходя из параметров всех слитых КВМ. После слияния, из анализа исключаются узкие события: экваториальные КВМ с углом раствора меньше  $30^\circ$  и полярные

КВМ с углом раствора меньше  $60^\circ$ . Событие считается экваториальным, если центральный угол КВМ находится в промежутке от  $60^\circ$  до  $120^\circ$  или от  $240^\circ$  до  $300^\circ$ , если нет, то полярным.

КВМ считался соответствующим диммингу, если он произошел позже него, но не позднее 2-х часов. Так же была проведена проверка по направлению локализации КВМ и димминга. КВМ сопоставлялся с диммингом, если они наблюдались в пределах одной четверти диска Солнца; проверка не проводилась, если угловой раствор КВМ больше  $180^\circ$ , либо димминг находился близко к центру диска [Shugay et al., 2022].

Для исследования были выбраны данные за 2010-2018 годы. Из анализа нами были исключены димминги с нулевой площадью в пересчете на поверхность Солнца, а также слабые события, то есть димминги с интенсивностью менее  $0.5 DN/c$ , с медленно меняющимися интенсивностью и площадью (нулевыми производными), и продолжительностью меньше 10 минут. Всего было отобрано 3696 диммингов, из них 1890 (51%) сопоставлены со вспышками (согласно информации из каталога Solar Demon), 605 (16%) сопоставлены с отобранными КВМ (по описанному выше алгоритму), и 364 (10%) сопоставлены и со вспышками, и с КВМ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы провели сравнение каталога вспышек Solar Demon с каталогом GOES (табл.1). Есть различия в детектировании: в Solar Demon зарегистрировано на 41% меньше вспышек класса C, чем в GOES, и даже вспышки класса X зарегистрированы не все. В каталоге Solar Demon вспышка автоматически сопоставляется с диммингом и в том случае, если вспышка произошла раньше димминга, и в том, если димминг произошел раньше вспышки. За 2010-2018 гг. максимальная разность по времени составляет 5 часов. Анализ сопоставления показал, что 98% вспышек класса X, 70% класса M и 33% класса C ассоциировано с диммингами. Таким образом, большинство самых мощных вспышек ассоциируются с диммингами. Однако диммингов, связанных со вспышками класса C, в 3.4 раза больше.

Были проанализированы статистические распределения параметров диммингов. Распределения интенсивности и параметров, связанных с производной интенсивности, площади и ее производной, продолжительности димминга хорошо аппроксимируются плотностью логнормального распределения  $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\mu$  и  $\sigma^2$ , величины, характеризующие среднее и стандартное отклонение, выражаются следующими формулами:

$$\mu = \ln \frac{\overline{X_n^2}}{\sqrt{\overline{X_n^2} + s_n^2}}, \quad \sigma^2 = \ln \left( \frac{s_n^2}{\overline{X_n^2}} + 1 \right),$$

и получены из оценок среднего значения  $\overline{X_n}$  и исправленной дисперсии  $s_n^2$ .

Почти для всех логнормально распределенных параметров значения максимумов распределения для диммингов, ассоциированных с КВМ, сдвинуты в сторону больших абсолютных значений, чем для всей выборки за эти же годы (рис. 1). В среднем КВМ соответствуют более мощным диммингам по совокупности всех параметров. В максимуме солнечной активности наблюдается больше событий, чем в минимуме. За 2012–2014 годы зарегистрировано 2309 диммингов (62% от общего числа), за 2017–2018 годы всего 47 диммингов (чуть больше 1%). Количество диммингов резко падает на спаде солнечной активности, причем количество вспышек падает так же быстро, тогда как количество КВМ падает более медленно (рис. 2). Этот факт следует учитывать при прогнозе КВМ, если они отбираются по диммингам. В максимуме солнечной активности значительно сильнее разброс параметров; в максимуме цикла димминги могут достигать значений интенсивности порядка  $-7000 \text{ DN/c} \cdot 10^3$  (в минимуме цикла минимальное достигнутое значение порядка  $-300 \text{ DN/c} \cdot 10^3$ ) и площади  $700 \text{ км}^2 \cdot 10^9$ , продолжительности до 8 часов. За исследуемый период 25% событий происходит над лимбом Солнца. Сопоставление распределения широты диммингов и вспышек показало, что эти события происходят примерно в одних и тех же областях активных широт, причем разброс у диммингов больше, так как это более протяженные в пространстве события. В течение цикла области диммингов сдвигаются ближе к экватору.

Чтобы понять, можно ли рассматривать разные параметры димминга как независимые, мы исследовали корреляционные зависимости между ними. Так как параметры распределены логнормально, были исследованы линейные зависимости в логарифмическом пространстве:  $\lg y = k \lg x + m$ . Многие параметры димминга оказались связаны между собой: производная площади и максимальная площадь, максимальный скачок интенсивности и полная интенсивность, производная площади и максимальный скачок интенсивности, продолжительность и полная интенсивность, продолжительность и максимальная площадь.

Найдены также умеренные корреляции между параметрами димминга и параметрами ассоциированной вспышки: коэффициент корреляции максимального скачка интенсивности димминга и яркости вспышки составляет 0.5 – чем ярче вспышка, тем более мощный димминг наблюдается (рис. 3).

Исходя из предположений о связи диммингов и КВМ, мы провели сопоставление скорости КВМ и параметров димминга, с целью обнаружения корреляционных зависимостей. В качестве параметра скорости было выбрано значение средней скорости, определяемое в коронографе по данным SACTus. Построены зависимости скорости КВМ от максимальной площади димминга, полной интенсивности димминга, максимального скачка интенсивности и т.д. Однако не было обнаружено значимой корреляции между исследуемыми параметрами из выбранных баз данных (коэффициенты корреляции достигают лишь 0.25). Приведенные в работах Dissauer et al., [2019], Chikunova et al., [2020] корреляции были получены на других данных. В работе Dissauer et al. [2019] авторы использовали наблюдения из двух точек за период времени с мая 2010 года до сентября 2012 года: данные SDO для анализа диммингов на диске Солнца и данные STEREO для анализа КВМ. В работе Chikunova et al., [2020] данные STEREO за тот же период времени используются для анализа и диммингов, и КВМ. Также авторы использовали собственные методы обработки изображений и расчета параметров. В работе Dissauer et al. [2018] описан более жесткий алгоритм отбора: в выборку попадают только димминги, сопоставленные с КВМ типа гало и EUV-волнами, лежащие в пределах  $40^\circ$  от центрального меридиана.

Для исследования пространственной связи димминга и КВМ были выбраны такие параметры, как угол направления на центр димминга и центральный угол КВМ (рис. 4). Для КВМ угол рассчитывается автоматически системой SACTus. Для димминга угол рассчитывается между радиус-вектором из центра Солнца к геометрическому центру димминга на диске Солнца и направлением на север против часовой стрелки. Коэффициент корреляции между углами димминга и КВМ составляет 0.96 (рис. 5). Полученный результат связан с алгоритмом отбора — при сопоставлении событий КВМ и диммингов проводится проверка по углу, разность должна быть не больше  $90^\circ$ . Следует отметить, что при этом у большинства событий (72%) разница углов лежит в пределах  $45^\circ$ .

#### 4. ВЫВОДЫ

Исследована динамика количества и параметров диммингов в 24 цикле солнечной активности. Была установлена пространственная взаимосвязь между КВМ и диммингами, для 605 событий с 2010 по 2018 годы, что составляет 16% случаев КВМ. Следует заметить, что на фазе спада солнечного цикла в 2016–2018 годах наблюдается значительное сокращение диммингов, тогда как количество КВМ уменьшается не так быстро. Поэтому к сопоставлению КВМ и диммингов для выявления направленных в сторону Земли КВМ надо подходить аккуратно в минимуме солнечной активности.

По распределению параметров установлено, что димминги, ассоциированные с КВМ, в среднем являются событиями с большими абсолютными значениями параметров, т.е. более мощными. Однако проведенные корреляционные исследования не выявили параметров диммингов из базы данных Solar Demon, которые имеют значимую корреляцию со скоростью КВМ из базы данных SACTus.

Метод ассоциации диммингов и КВМ по их угловому местоположению на диске и в короне Солнца позволяет достичь того, что для большинства событий (72%) разница углов лежит в пределах  $45^\circ$ . Этот результат планируется использовать для уточнения направления распространения КВМ в гелиосфере при прогнозировании вероятности и времени прихода КВМ к Земле.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективам проектов SDO/AIA, SOHO/LASCO, а также коллективам каталогов Solar Demon и SACTus (SIDC, Royal Observatory of Belgium) за предоставление доступа к данным.

## 6. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-62-00048.

## 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Chikunova G., Dissauer K., Podladchikova T., Veronig A. M.* Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections on the Solar Limb // *ApJ*. V. 896. P. 17–33. 2020. doi 10.3847/1538-4357/ab9105
- *Compagnino A., Romano P., Zucarello F.* A Statistical Study of CME properties and of the Correlation Between Flares and CMEs over Solar Cycles 23 and 24 // *Sol. Phys.* V. 292. A5. 2017. doi 10.1007/s11207-016-1029-4
- *Dissauer K., Veronig A. M., Temmer M., Podladchikova T., Vanninathan K.* Statistics of Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections. I. Characteristic Dimming Properties and Flare Association // *ApJ*. V. 863 P. 169–188. 2018. doi 10.3847/1538-4357/aad3c6
- *Dissauer K., Veronig A. M., Temmer M., Podladchikova T.* Statistics of Coronal Dimmings Associated with Coronal Mass Ejections. II. Relationship between Coronal Dimmings and Their Associated CMEs // *ApJ*. V. 874. P. 123–137. 2019. doi 10.3847/1538-4357/ab0962
- *Gopalswamy N., Kaiser M. L., MacDowall R. J., Reiner M. J., Thompson B. J., St. Cyr O. C.* Dynamical Phenomena Associated with a Coronal Mass Ejection // *AIP Conference Proceedings*. V. 471. P. 641–644. 1999.
- *Harrison R. A., Bryans P., Simnett G. M., Lyons M.* Coronal dimming and the coronal mass ejection onset // *A&A* V. 400 P. 1071–1083. 2003. doi 10.1051/0004-6361:20030088

- *Hudson H.S., Acton L. W., Freeland S.L.* A Long–Duration Solar Flare with Mass Ejection and Global Consequences // *ApJ*. V. 470 P. 629–635. 1996.
- *Hurlburt N., Cheung M., Schrijver C. et al.* Heliophysics Event Knowledgebase for the Solar Dynamics Observatory (SDO) and Beyond // *Sol. Phys.* V. 275 P. 67–78. doi 10.1007/s11207-010-9624-2
- *Kraaikamp E., Verbeeck C.* Solar Demon – an approach to detecting flares, dimmings and EUV waves on SDO/AIA images // *J. Space Weather Space Clim.* V. 5 A18. 2015. doi 10.1051/swsc/2015019
- *López F. M., Cremades H., Balmaceda L. A., Nuevo F. A., Vásquez A. M.* Estimating the mass of CMEs from the analysis of EUV dimmings // *A&A* V. 627 A8. 2019. doi 10.1051/0004-6361/201834163
- *NASA Interactive Multi-Instrument Database of Solar Flares*  
<https://data.nas.nasa.gov/helio/portals/solarflares/>
- *Reinard A. A., Biesecker D. A.* Coronal Mass Ejection – Associated Coronal Dimmings // *ApJ*. V. 674. P. 576–585. 2008
- *Shugay Y., Kalegaev V., Kaportseva K., Slemzin V., Rodkin D., Ereemeev V.* Modeling of Solar Wind Disturbances Associated with Coronal Mass Ejections and Verification of the Forecast Results // *Universe* V. 8 № 11. P. 565. doi 10.3390/universe8110565
- *Solar Influences Data Analysis Center (Royal Observatory of Belgium)* Solar Demon – Flares, Dimmings and EUV waves event detection <https://www.sidc.be/solardemon/>
- *Solar Influences Data Analysis Center (Royal Observatory of Belgium)* CACTus CME Homepage <https://www.sidc.be/cactus/>
- *Vanninathan K., Veronig A. M., Dissauer K., Temmer M.* Plasma Diagnostics of Coronal Dimming Events // *ApJ*. V. 857. P. 62–83. 2018. doi 10.3847/1538-4357/aab09a

**Таблица 1.** Сравнение каталогов вспышек GOES и Solar Demon и сопоставление вспышек с диммингами

Разбиение по классам	GOES	Solar Demon	Ассоциировано с диммингами по Solar Demon
Всего	8582	5174	1936 (37%)
Класс C	7787	4561	1496 (33%)
Класс M	746	569	397 (70%)
Класс X	49	44	43 (98%)

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегает ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

## Подписи к рисункам

Рис. 1. Гистограммы распределения модуля полной интенсивности димминга. По оси  $Y$  слева отложено количество событий для всех диммингов, справа количество событий для диммингов, ассоциированных с КВМ.

Рис. 2. Динамика количества диммингов, вспышек и КВМ по годам (данные после обработки). По оси  $Y$  отложено количество событий, деленное на максимальное количество событий за год.

Рис. 3. Зависимость максимального скачка интенсивности (за минуту)  $maxdrop$  димминга от яркости вспышки  $I_{flare}$ .

Рис. 4. Расчет центрального угла для димминга (слева) и КВМ (справа).

Рис. 5. Зависимость центрального угла КВМ  $pa_{cme}$  от центрального угла димминга  $pa_{dim}$ . Так как угол периодичен, некоторые точки сдвинуты на  $360^\circ$ .

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегаяев ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

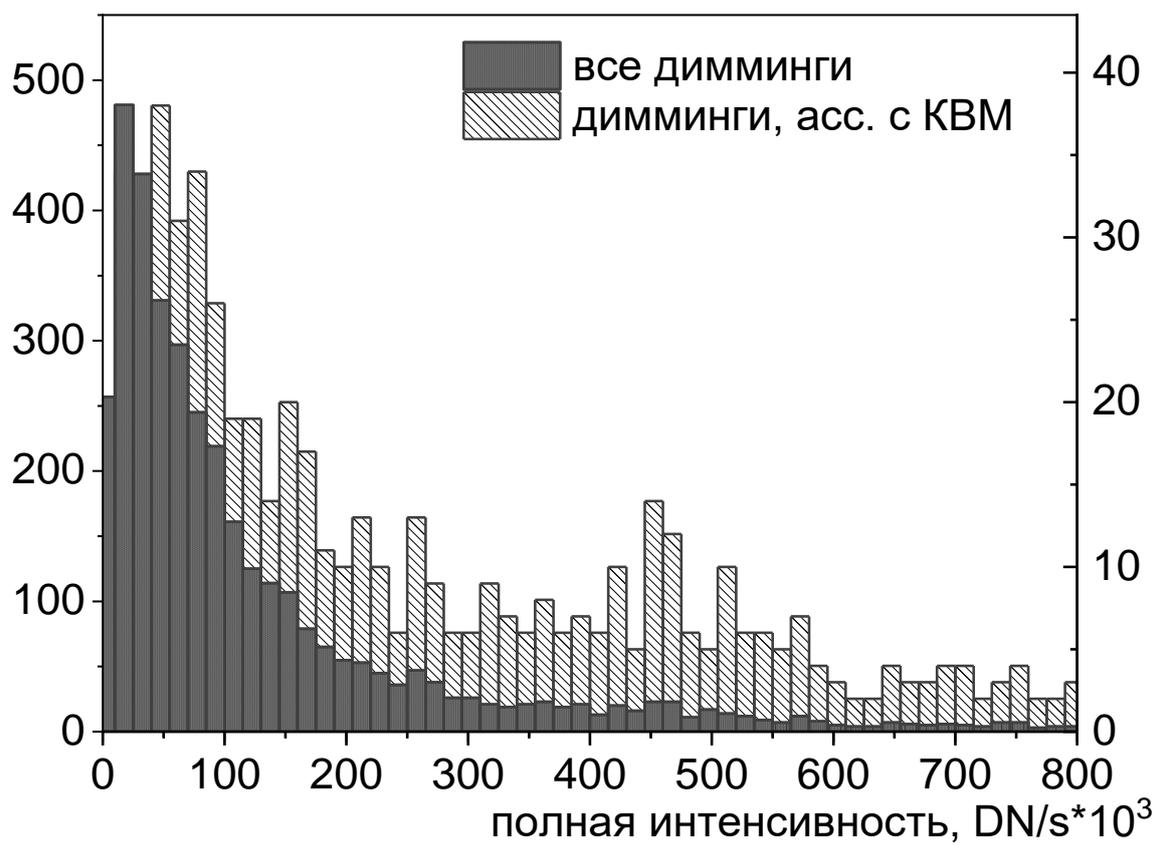


Рис. 1

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегает ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

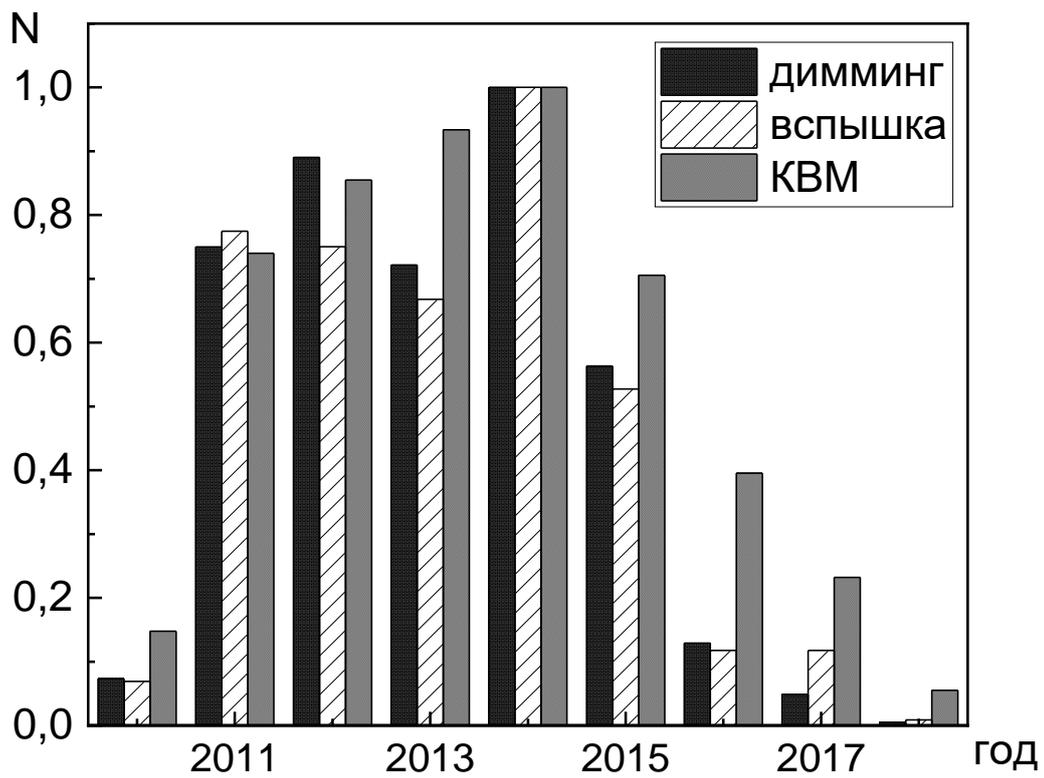


Рис. 2

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегает ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

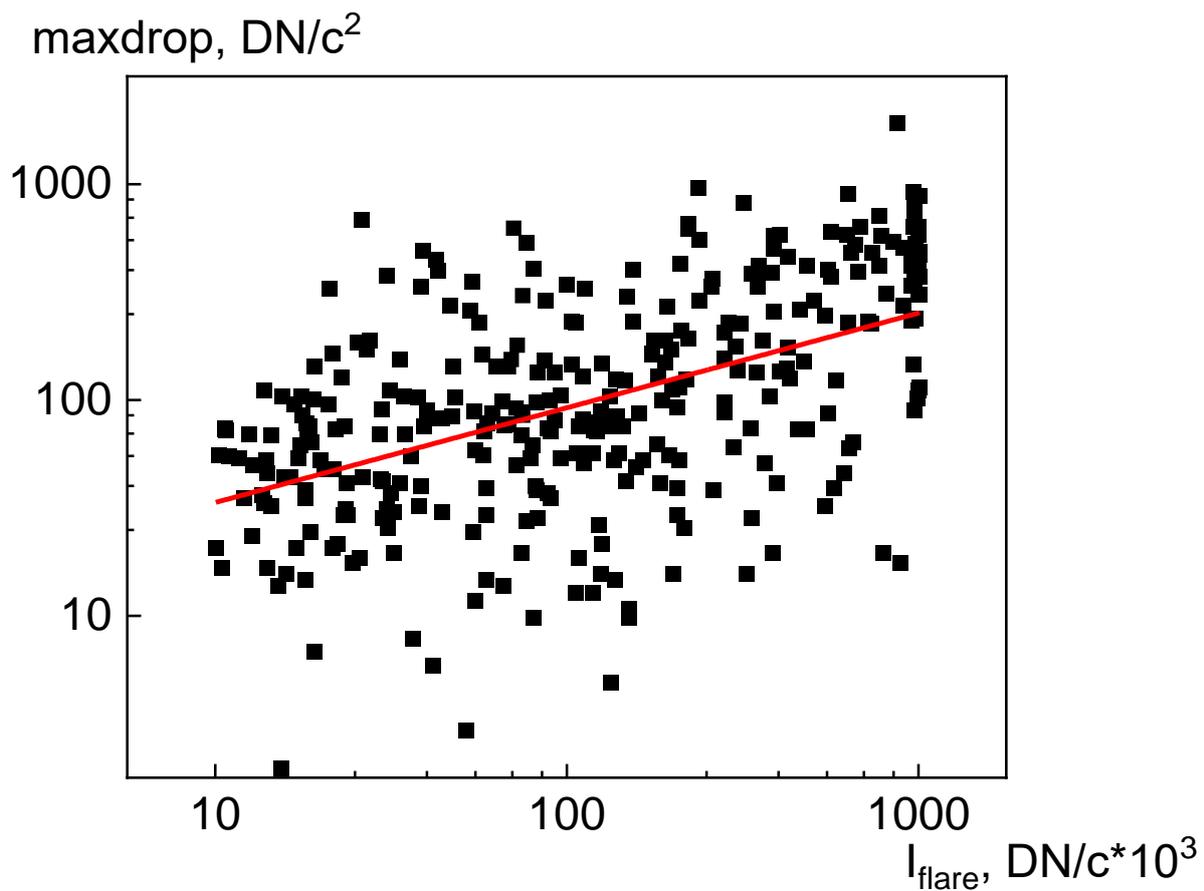


Рис. 3

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегаяев ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

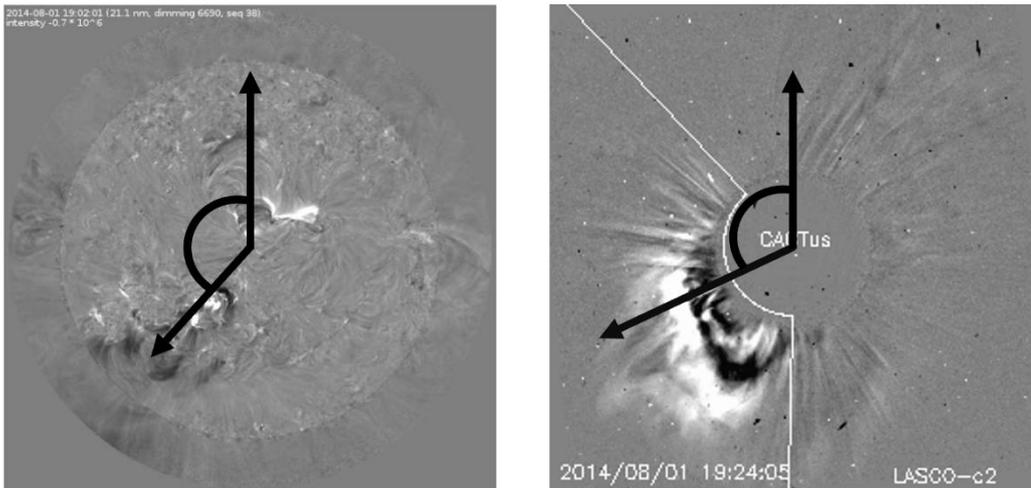


Рис. 4

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегаяев ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

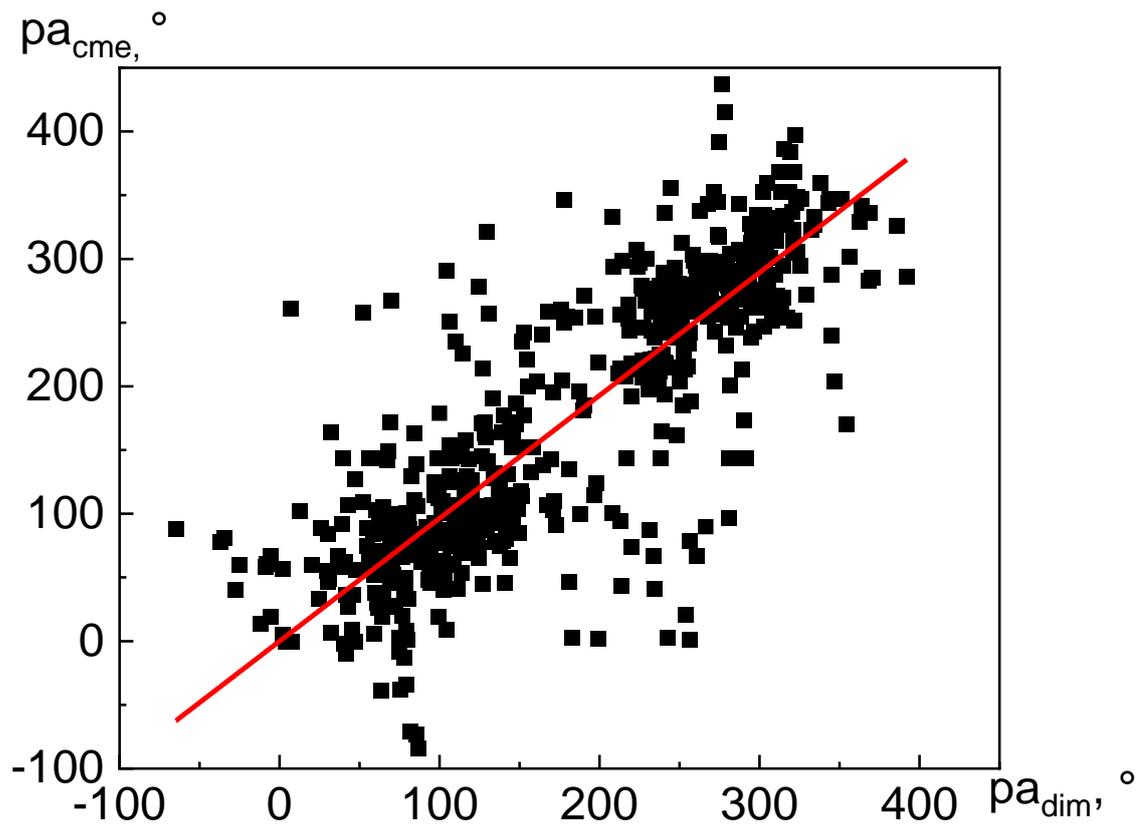


Рис. 5

К ст. А.А.Вахрушева, Ю.С.Шугай, К.Б. Капорцева, В. Е. Еремеев, В.В. Калегает ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА