

УДК 524.1-52:523.9

ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ: СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ

© 2023 г. В. Н. Ишков*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: ishkov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

С современных позиций рассматриваются вопросы прогноза солнечных вспышечных событий — единственного источника высокоэнергичных протонов, как от самого процесса энерговыделения, так и от сопровождающих его динамических явлений: ударных волн и корональных выбросов вещества, распространяющихся от места выделения энергии. Возможность прогноза самих вспышечных событий обеспечивает взаимодействие новых всплывающих магнитных потоков с магнитными полями активных областей и вне их, но всегда на линии раздела полярностей. Появление солнечных протонов во вспышечном событии определяется характеристиками во всем спектре его излучения, локализацией его на Солнце и параметрами его коронального выброса вещества.

DOI: 10.31857/S0367676523701788, EDN: OSEKDF

ВВЕДЕНИЕ

Большие солнечные вспышечные события (СВС) со всем спектром сопровождающих их динамических возмущений — ударных волн, поверхностных волн в крайнем ультрафиолете, волн Мортон (солнечное цунами), плазменных структур (вспышечные арочные системы, возвратные выбросы), в том числе и корональных выбросов вещества (КВВ), которые происходят в активных областях (АО), как с пятнами, так и без них, в основном определяют состояние околоземного космического пространства: геомагнитные возмущения, состояние ионосферы и степень радиационной опасности при полетах на высоких широтах в атмосфере Земли и в космическом пространстве.

Наблюдения показали, что все эволюционное многообразие магнитных образований от эфемерных АО до комплексов активности можно рассматривать как следствие всплывания магнитных потоков [1, 2], от величины и скорости всплывания которых зависят размеры и времена существования магнитных структур и их вспышечная активность (рис. 1). Само явление АО на Солнце, можно рассматривать как эволюцию одного или нескольких магнитных потоков ($\sim 10^{13}$ Вб), одновременно или последовательно всплывающих в атмосферу Солнца с малой или средней скоростью (10^7 – 10^8 Вб/с — масштаб времени из-

менений больше суток). Это обеспечивает их внедрение в систему существующих магнитных полей (МП) в виде достаточно медленного образования новых пятен и роста площади всей АО (рис. 1). Эволюция таких АО, проходит путь от появления флоккула, через стадию образования, развития и распада группы пятен, до их полного исчезновения [3]. Однако взаимодействие новых магнитных потоков с большой скоростью всплывания [4] носит совершенно другой характер — они быстро (масштаб времени десятки минут — часы) усложняют магнитную структуру АО и увеличивают запасенную в ней магнитную энергию. Целью статьи дать реальное состояние прогноза СВС и связанным с ним прогноз солнечных протонных событий на данном этапе исследования солнечных активных явлений, его возможности и ограничения.

ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ

Физические и наблюдательные принципы прогноза СВС вытекают из динамических процессов всплывания именно быстрых магнитных потоков и их взаимодействия с существующим МП [1, 2]. Такой магнитный поток быстро образует новые пятна и поры, усложняя магнитную конфигурацию АО, и создает условия осуществления ограниченного по времени периода вспышечного

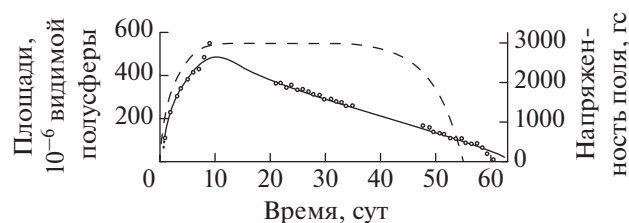


Рис. 1. Изменение со временем площади и величины магнитного поля группы пятен (по Каулингу из [3]). Сплошная кривая — площадь группы пятен, штриховая кривая — максимальная напряженность магнитного поля.

энерговыведения. За этот интервал времени в данной АО реализуется практически вся последовательность СВС больших и средних рентгеновских классов соответственно количеству привнесённой энергии. После осуществления периода вспышечного энерговыведения АО часто приходит в соответствие с начальной конфигурацией, что позволяет рассматривать процесс реализации

больших СВС, как самостоятельный физический процесс внутри общей эволюции АО, который имеет конкретное начало — всплытие нового магнитного потока, максимум — период вспышечного энерговыведения и конец — полная реализация энергии нового магнитного потока. Ограниченный по времени, такой процесс может повлиять на эволюцию АО, но, в общем случае, такое влияние можно считать не существенным. Таблица 1 представляет характеристики СВС в зависимости от локализации появления магнитных потоков относительно МП, в которых они всплывают. В пределах развитой АО СВС — это солнечные вспышки всех классов, в беспятенных АО со слабыми магнитными полями — низкоэнергичные (хайдеровские) вспышки, с очень большими площадями эмиссии в оптике ($\text{H}\alpha$, HeII , D_3), но очень слабой энергетикой в других диапазонах электромагнитного спектра. В фоновых полях (вне АО — <50 Гс) — это вспышечные уярчения и выбросы солнечных волокон или их каналов. Возможность классификации СВС в зависимости от их локализации в существующих МП объеди-

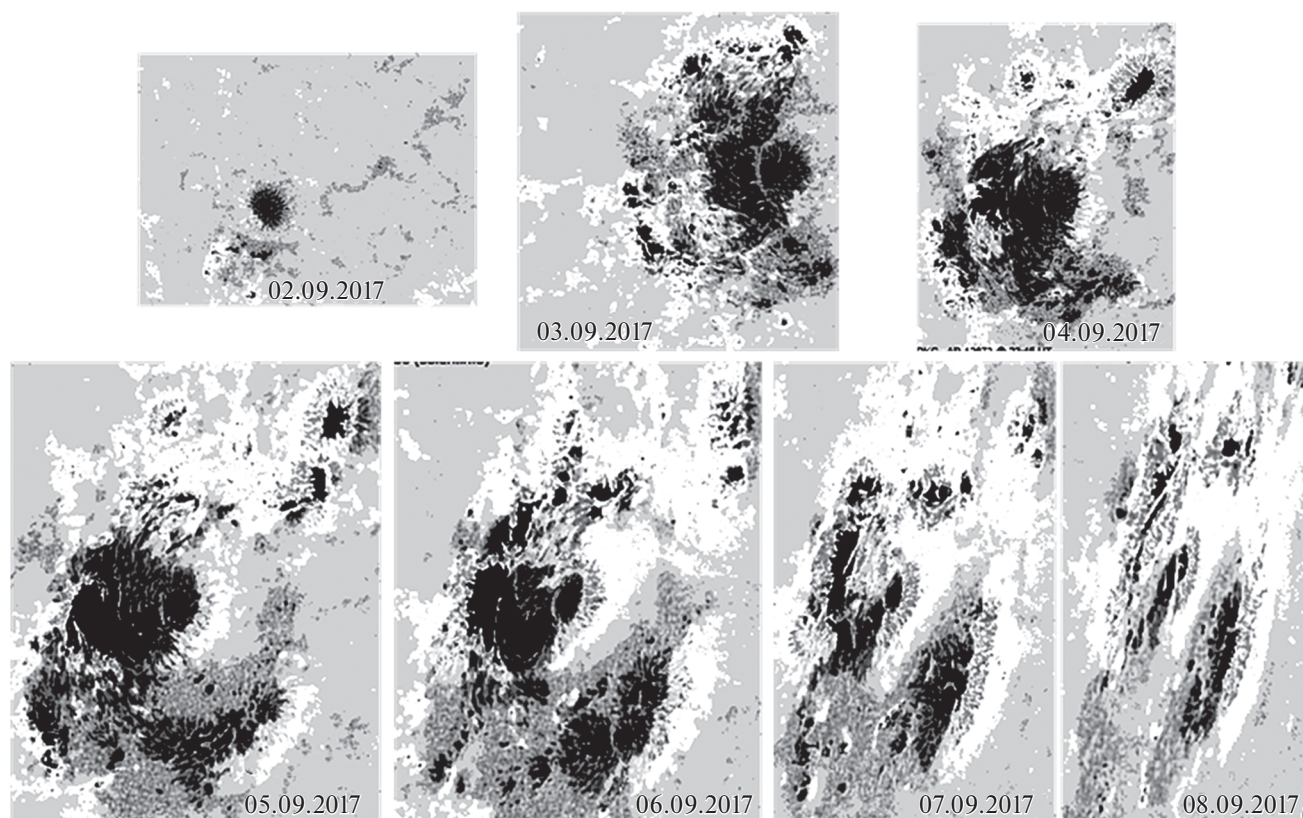


Рис. 2. Вид группы пятен AR12673 и динамика ее развития после последовательного всплытия 3 новых магнитных потоков 02.09, 04.09, и 06.09, обеспечивших три периода вспышечного энерговыведения 04–05.09 (12 ч), 06–08.09 (12 ч) и 06–08.09 (17 ч), за которые произошли 5 СВС рентгеновского класса X и 24 — класса M, в том числе самые мощные СВС СЦ24 X9.3 и X8.2, по наблюдениям космической солнечной обсерватории SDO в непрерывном спектре ($4500 \text{ \AA}$) с наложенным магнитным полем (белое “+” полярность) за 2–08.09.2017 г. Север сверху, восток слева. Преобразованный рисунок из <http://www.solen.info/solar/>.

Таблица 1. Характеристики СВС в различных МП на Солнце

МП, Гс	Конфигурация МП	Тип явления	Максимальный балл H_{α}	Класс 1–8 Å	$F_{\text{см макс}}$, с.е.п.	HXR, γ	КВВ	ВАС
<50	—	ВСВ	Уярчения	≤C7	<50	—	+	+
<500	—	СВ б/п	4N	≤M7	≤300	—	+	+
≤2000	γ, δ	СВ	3B	>X17.5	>10000	+	+	+
>2500	δ	СВ	1B	≤M5	<5000	+	—	—

МП — средняя величина магнитного поля в солнечных структурах, б/п — беспятненные, ВСВ — выброс солнечного волокна, $F_{\text{см макс}}$ — максимальный поток радиоизлучения в см диапазоне в солнечных единицах потока, HXR, γ — наличие значимого излучения в жестком рентгене и γ-диапазоне, КВВ — корональный выброс вещества, ВАС — вспышечные арочные системы.

няет их в единый процесс и позволяет подойти к реальному прогнозу СВС.

Из наблюдений можно суммировать признаки, после которых наступает рост вспышечной активности [1]:

- появление нового быстрого магнитного потока любой мощности приводит к увеличению вспышечной активности;

- для осуществления значимых СВС необходимо, чтобы новый магнитный поток был достаточно большим ($>10^{13}$ Вб) и скорость его всплытия была не менее 10^9 Вб/с;

- вспышки появляются через 0.5–2 сут после обнаружения такого потока в пределах АО;

- СВС больших и средних баллов всегда группируются в серии, кортежи, [2], которые образуют период вспышечного энерговыделения, за который в АО происходит основная доля таких СВС. Его длительность 16–80 ч, в среднем 55 ± 30 ч или не более 16% времени прохождения АО по видимому диску Солнца [1].

Эти признаки позволяют осуществлять прогноз именно периода вспышечного энерговыделения за 12 (для эпохи пониженной СА) — 48 ч до реализации первого значимого СВС.

Возможность выхода и ускорения солнечных высокоэнергичных протонов (СПС) в реализуемом СВС определяется самим процессом энерговыделения, локализацией вспышечного события на диске Солнца, характеристиками ударных волн и КВВ [5–7], которые могут вносить существенный вклад в ускорение образовавшихся протонов вплоть до релятивистских энергий, и соотношением энергетики СВС в разных диапазонах излучения. В настоящее время прогноз СПС по характеристикам АО не представляется возможным, т.е. нет особых “протонных” АО. Реально, диагностика развития СПС осуществляет-

ся по приходу первых частиц различных энергий в околоземное космическое пространство по детекторам, установленным на геостационарных спутниках и космических аппаратах в точке Лагранжа L1 [8–10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогноз геоэффективных солнечных вспышечных событий в настоящее время возможен как прогноз периода осуществления серии значимых СВС, которые с вероятностью до 90% начнутся в интервале времени 12 (для эпохи пониженной СА) — 48 ч от времени появления первых признаков значимого по мощности и скорости всплытия нового магнитного потока. За этот период принесенная всплывающим магнитным потоком в АО энергия полностью реализуется и осуществляются практически все СВС среднего и большого рентгеновского класса. Следующий период вспышечного энерговыделения возможен исключительно при появлении следующего ВМП. Дать прогноз порядка осуществления больших вспышек, мощности, класса и характера СВС внутри периода вспышечного энерговыделения не представляется возможным, т.к. внутри его работает случайная триггерная схема начала реализации последующих СВС. Прогноз СПС по характеристикам АО или по характеристикам самого СВС не представляется возможным — не существует особых активных областей, в которых изначально заложена возможность выхода солнечных высокоэнергичных частиц. В настоящее время работают только модели диагностики развития СПС по приходу первых частиц различных энергий в окрестности Земли (околоземное космическое пространство, точки Лагранжа) на детекторы космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ишков В.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 9. С. 1835.
2. *Ишков В.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 11. С. 2148.
3. *де Ягер К.* // Строение и динамика атмосферы Солнца. Москва: Изд. иностр. лит., 1962. 376 с.
4. *Головкин А.А.* // Солн. данные. 1986. № 4. С. 48.
5. *Kahler S.W., Cliver E.W., Ling A.G.* // JASTP. 2007. V. 69. No. 1-2. P. 43.
6. *Balch C.* // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. S01001.
7. *Belov A.* // Adv. Space Res. 2009. V. 43. No. 4. P. 467.
8. *Posner A.* // Space Weather. 2007. V. 5. Art. No. S05001.
9. *Núñez M.* // Space Weather. 2011. V. 9. Art. No. S07003.
10. *Núñez M.* // Space Weather. 2015. V. 13. P. 807.

Solar flare phenomena forecast: solar proton events**V. N. Ishkov***

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Science,
Moscow, 108840 Russia*

**e-mail: ishkov@izmiran.ru*

The problems of predicting solar flare events, the only source of high-energy protons, both from the process of energy release itself and from the accompanying dynamic phenomena: shock waves and coronal mass ejections propagating from the place of energy release, are considered from modern positions. The possibility of predicting the flare events themselves ensures the interaction of new emerging magnetic fluxes with the magnetic fields of active regions and outside them, but always on the dividing line of polarities. The possibility of the release of solar protons during of a flare event is determined by the characteristics and localization of the flare event, its CME parameters, and the ratio of its energy in different radiation ranges.