

УДК 523.4-852

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА УСКОРЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ТОКОВОМ СЛОЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

© 2021 г. А. И. Подгорный^{1, *}, И. М. Подгорный², А. В. Борисенко¹, Э. В. Вашенюк³,
Ю. В. Балабин³, Н. С. Мешалкина⁴, Б. Б. Гвоздевский³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: podgorny@lebedev.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 12.03.2021 г.

Принята к публикации 28.04.2021 г.

И.М. Подгорным предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая ее основные наблюдательные проявления. Ускорение солнечных космических лучей происходит вдоль особой линии магнитного поля токового слоя электрическим полем $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}/c$. Поля находятся магнитогидродинамическим моделированием над активной областью, в реальном масштабе времени, которое может быть осуществлено только при помощи параллельных вычислений.

DOI: 10.31857/S0367676521080226

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные космические лучи (СКЛ) представляют собой потоки заряженных ускоренных частиц до энергий ~ 20 ГэВ, главным образом протонов, появляющихся во время солнечных вспышек. Однако только $\sim 30\%$ самых мощных вспышек рентгеновского класса X вызывают появление СКЛ. Прогноз появления СКЛ представляет важную практическую задачу, поскольку они могут вызвать облучение космонавтов. Поскольку СКЛ вызываются солнечными вспышками, для изучения физики этого явления и улучшения качества его прогноза, необходимо одновременно изучать процессы, происходящие во время солнечных вспышек и процессы ускорения заряженных частиц.

Вспышки происходят над активными областями (АО) на высотах 15000–30000 км. Это доказано измерениями теплового рентгеновского излучения вспышек на лимбе [1], неизменностью магнитного поля на солнечной поверхности [2], и другими наблюдениями [3]. Основной вспышечный процесс высоко в короне может быть объяснен механизмом С.И. Сыроватского [4]: накоплением магнитной энергии в поле токового слоя, который образуется в окрестности особой линии

магнитного поля X-типа и в ходе квазистационарной эволюции переходит в неустойчивое состояние. Освобождение энергии сопровождается наблюдаемыми проявлениями вспышки, которые объясняются электродинамической моделью вспышки, предложенной И.М. Подгорным [5]. Модель разработана на основании результатов наблюдений и численного МГД моделирования и использует аналогии с электродинамической моделью суббури, предложенной ранее ее автором [6]. Жесткое пучковое рентгеновское излучение на поверхности солнца во время вспышки объясняется торможением в нижних плотных слоях солнечной атмосферы потоков электронов, ускоренных в продольных токах, вызванных электрическим полем Холла в токовом слое.

УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ. НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСПЫШЕЧНОЙ СИТУАЦИИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Солнечные космические лучи ускоряются в токовом слое индукционным электрическим по-

лем, вызванным быстрым изменением магнитного поля во время вспышечного процесса [7]. Это электрическое поле есть $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}/c$ для скорости втекания в слой и магнитного поля слоя. Для типичных скорости втекания в токовый слой $V = 2 \cdot 10^7$ см/с, магнитного поля $B = 100$ Гс и длины слоя $l = 10^9$ см частица наберет энергию 20 ГэВ. Спектр СКЛ для вспышки Бастилия 14.07.2000 [5], найденный расчетом траекторий частиц в электрическом и магнитном поле, полученном МГД моделированием в солнечной короне над АО [8], совпал со спектром, полученным наблюдениями на мировой сети нейтронных мониторов. Выполняемая работа необходима для исследования механизма генерации и распространения СКЛ и их прогноза, которое включает:

1) Изучение механизма солнечной вспышки и положения вспышки в короне над активной областью путем численного МГД моделирования вспышечной ситуации в солнечной короне над активной областью, при котором наблюдаемое на солнечной поверхности распределение магнитного поля берется в качестве граничных условий.

2) Изучение механизма ускорения частиц во время вспышки и возможности их выхода из области сильного магнитного поля в короне путем расчета траекторий частиц в электрическом и магнитном полях, полученных в результате МГД моделирования.

3) Поскольку нет информации о плазменных неоднородностях, а, следовательно, коэффициент диффузии в уравнении распространения ускоренных частиц неизвестен, прогноз появления в межпланетном пространстве космических лучей, способных вызвать облучение космонавтов, предполагается проводить на основании времен прихода, полученных И.М. Подгорным [9] при помощи анализа наблюдательных данных.

При выполнении МГД моделирования никаких предположений о механизме вспышки при постановке задачи не делалось [10]. Для того, чтобы ускорить расчет была специально разработана абсолютно неявная конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока [7, 10, 11]. Несмотря на применение разработанных методов, провести МГД моделирование в короне на обычном компьютере удалось только в сильно сокращенном (в 10^4 раз) масштабе времени. Для получения более точных конфигураций магнитного и электрического полей для последующего изучения ускорения СКЛ путем расчета траекторий частиц необходимо проводить МГД моделирование в реальном масштабе времени.

Появление СКЛ не для всех мощных вспышек объясняется невозможностью выхода ускоренных в слое частиц из магнитного поля короны, окружающего токовый слой [12]. Поэтому прове-

дение МГД моделирования в реальном масштабе времени необходимо, также, для выяснения возможности выхода ускоренных частиц путем расчета их траекторий в точно определенных полях, окружающих токовый слой. Как показали расчеты, МГД моделирование в реальном масштабе времени потребовало бы 8 лет расчета. Возникает необходимость применения суперкомпьютера со многими вычислительными потоками, что требует распараллеливания численного решения.

МЕТОДЫ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Время расчета эволюции поля и плазмы в солнечной короне определяется: 1) величиной шага по времени, при которой схема остается устойчивой; 2) количеством итераций; 3) временем расчета одной итерации. Благодаря выбору математического метода (параметров разностной схемы), вычислительного оборудования и математического обеспечения (современные графические платы GPU для распараллеливания вычислений V100 (Volta-100), P100 (Pascal-100), Titan-100) и многочисленным оптимизациям алгоритма распараллеливания вычислений (минимизация пересылок массивов между графической картой и основной памятью компьютера, поблочное распараллеливание на сетке) удалось получить время расчета эволюции в течении суток над АО 21 сут (при менее благоприятных условиях оно может быть увеличено на 7–10%). Для прогноза это время должно быть меньше суток, следовательно, нужно работать над дальнейшей оптимизацией, для чего есть резервы.

ОБРАЗОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ ПОЛЯ Х-ТИПА

Рисунок 1 дает представление об эволюции распределения плотности тока и поля скоростей в центральной плоскости расчетной области. Эволюция магнитного поля, описываемая результатами МГД моделирования в реальном масштабе времени, приводит к появлению максимумов плотности тока с конфигурацией поля и течением плазмы, представленными на рис. 2 для 3-го максимума в момент 1.998 сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что солнечные космические лучи ускоряются электрическим полем $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}/c$ в токовом слое в солнечной короне во время солнечной вспышки. Разработаны методы параллельных вычислений для МГД моделирования над АО с целью определения полей для изучения генерации СКЛ. Расчет показал появление конфигураций магнитного поля Х-типа с течением плазмы,

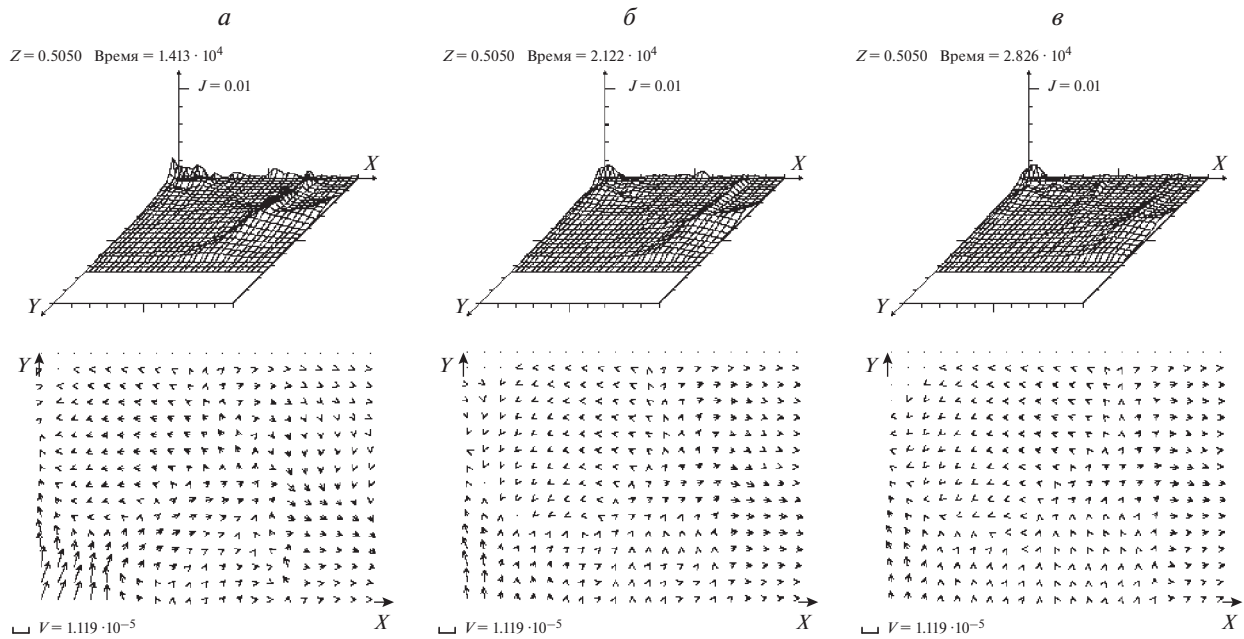


Рис. 1. Эволюция плотности тока и поля скоростей в течение вторых суток расчета. Момент времени 0.9992 (а), 1.5 (б), 1.9978 сут (в).

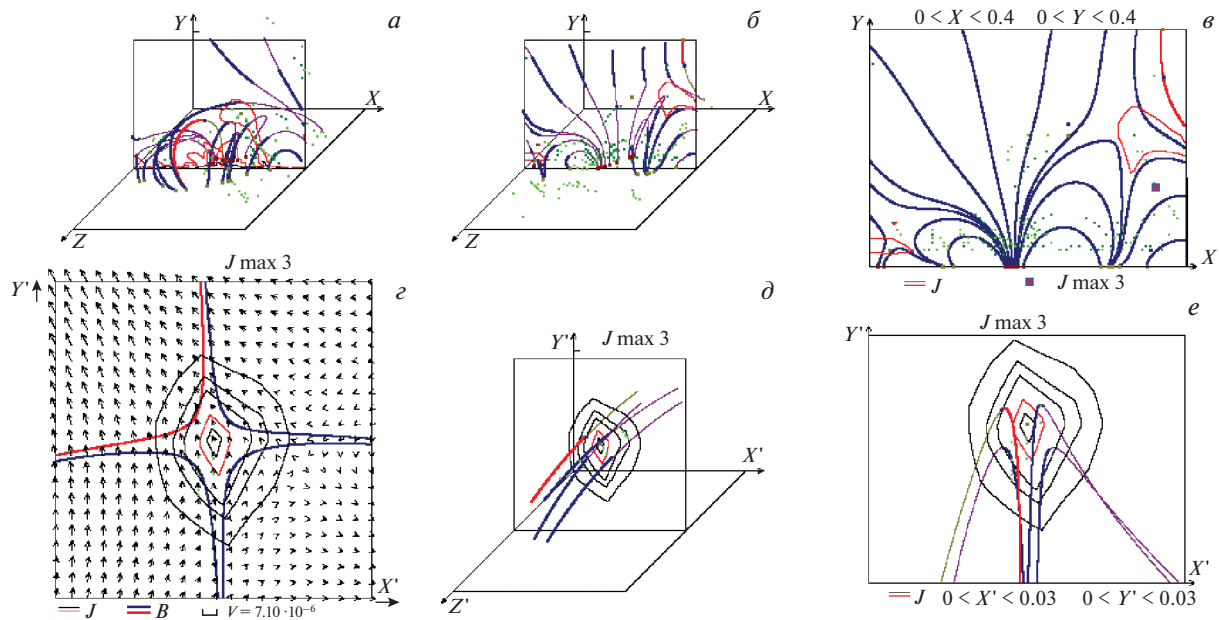


Рис. 2. Рассчитанная конфигурация магнитного поля в короне над АО 10365 в моменты 0.658 (а) и 1.998 сут (б). Конфигурация магнитного поля в центральной плоскости расчетной области с указанием положения 3-го максимума плотности тока (в). Конфигурация поля и течение плазмы в окрестности 3-го максимума плотности тока в момент 1.998 сут (z, д, е).

которое должно привести к образованию токового слоя. Проведенная работа выявила возможности дальнейшей оптимизации методов, с целью дальнейшего уменьшения времени расчета.

Авторы благодарны команде SOHO/MDI за научные данные, а также специалистам по облачным сервисам, упростившим нам задачу настройки, арендованных удаленных машин для

вычислений на GPU. Работа частично поддержана (Н.С. Мешалкина) Фундаментальной научной программой № II.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin R.P., Krucker S., Hurford G.I. et al. // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. No. 2. P. L69.
2. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. // *Астрон. журн.* 2015. Т. 92. № 8. С. 669; Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S. // *Astron. Rep.* 2015. V. 59. No. 8. P. 795.
3. Подгорный И.М., Подгорный А.И. // *Астрон. журн.* 2018. Т. 95. № 10. С. 735; Podgorny I.M., Podgorny A.I. // *Astron. Rep.* 2018. V. 62. No. 10. P. 696.
4. Сыроватский С.И. // *ЖЭТФ.* 1966. Т. 50. № 4. С. 1133.
5. Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Ващенко Э.В., Подгорный А.И. // *Астрон. журн.* 2010 Т. 87. № 7. С. 704; Podgorny I.M., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Podgorny A.I. // *Astron. Rep.* 2010. V. 54. No. 7. P. 645.
6. Podgorny I.M., Dubinin E.M., Israilevich P.L., Nicolaeva N.S. // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 1538.
7. Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1997. Т. 61. № 6. С. 1067; Podgorny A.I., Podgorny I.M. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 1997. V. 61. No. 6. P. 837.
8. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Биленко И.А. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2003. Т. 67. № 3. С. 406; Podgorny A.I., Podgorny I.M., Bilenko I.A. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2003. V. 67. No. 3. P. 321.
9. Podgorny I.M., Podgorny A.I. // *JASTP.* 2018. V. 180. P. 9.
10. Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *Астрон. журн.* 2008. Т. 85. № 8. С. 739; Podgorny A.I., Podgorny I.M. // *Astron. Rep.* 2008. V. 52. No. 8. P. 666.
11. Подгорный А.И., Подгорный И.М. // *ЖВМиМФ.* 2004. Т. 44. № 10. С. 1873; Podgorny A.I., Podgorny I.M. // *Comput. Math. Math. Phys.* 2004. V. 44. No. 10. P. 1784.
12. Podgorny I.M., Podgorny A.I. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1370. Art. No. 012064.

Investigation of the mechanism of cosmic rays acceleration during the solar flares by the electric field in the current sheet of solar corona

A. I. Podgorny^{a,*}, I. M. Podgorny^b, A. V. Borisenko^b, E. V. Vashenyuk^c, Yu. V. Balabin^c, N. S. Meshalkina^d, B. B. Gvozdevskiy^c

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^b*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^c*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^d*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*

*e-mail: podgorny@lebedev.ru

I. Podgorny proposed an electrodynamic model of a solar flare, explaining its main observational manifestations. The acceleration of protons occurs along a singular line of the magnetic field of the current sheet by the electric field $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}/c$. Magnetic fields must be obtained by MHD simulation above active region in the real scale of time, which can only be done using parallel computing.