

ЧИСЛЕННОЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ СЕРИИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ АО 0365

¹А.И. Подгорный, ²И.М. Подгорный, ³Н.С. Мешалкина

COMPUTATIONAL MHD MODELING OF APPEARANCE OF CURRENT SHEET SERIES OVER THE ACTIVE REGION AR 0365

A.I. Podgorny, I.M. Podgorny, N.S. Meshalkina

Описана первая попытка численного МГД-моделирования возникновения нескольких токовых слоев над активной областью перед серией элементарных вспышек. В поле каждого из слоев накапливается энергия, которая может выделяться при одной из вспышек. Расчеты начинались за три дня до появления серии вспышек, т. е. до всплыивания в активной области нового магнитного потока. Начальное (потенциальное) магнитное поле рассчитывалось решением уравнения Лапласа с наклонной производной. Границные условия на фотосфере задавались из карт измеренного магнитного поля в активной области для различных моментов времени. В расчетах использовалась программа «Пересвет», решающая полную систему МГД-уравнений с диссипативными членами. Использовалась абсолютно неявная схема, консервативная относительно магнитного потока. Обсуждается проблема правильного выбора размера расчетной области и отыскания положения особых линий магнитного поля.

The first attempt is presented for computational MHD modeling of appearance of several current sheets above an active region before series of elementary flares. In the field of each sheet the energy is accumulated which can be released during a flare. Calculations started three days before flare series, that is before new magnetic flux emergence in an active region. The initial (potential) magnetic field was computed from the solution of Laplace equation with the sloped derivative. Boundary conditions were set from maps of measured magnetic field in active region for different moments. The “Peresvet” program was used for solving the full system of MHD equations with dissipative terms. The absolutely implicit scheme conservative relative to magnetic flux was used. The problem of correct selection of calculation domain size and searching for special magnetic field line position is discussed.

Введение

Последние годы много внимания уделяется динамике магнитных полей над активными областями (АО) в предвспышечном состоянии и выяснению связи коронального источника энерговыделения с положением особой линии магнитного поля [1–3]. Наиболее популярный подход состоит в построении потенциального поля в момент вспышки и сравнении положения в нем особых линий (в двумерном приближении нулевых X-точек) с источниками теплового рентгеновского или микроволнового излучения в короне в момент вспышки [4]. Для вычисления потенциального поля в короне измеренное магнитное поле на поверхности Солнца обычно аппроксимируется магнитными зарядами, реже магнитными диполями. Между тем, сложная система пятен различного размера, наличие полутени и слабого рассеянного поля в самой АО, а также за ее пределами вызывают сомнение в точности такой аппроксимации. Даже слабое рассеянное поле может дать существенный вклад в полный магнитный поток активной области за счет большой занимаемой им площади. Более того, токовые системы (токовые слои), ответственные за накопление магнитной энергии, могут сильно искажить потенциальное поле и изменить положение особых линий. Сильное изменение конфигурации магнитного поля следует ожидать, если в предвспышечном состоянии появилось несколько мощных токовых слоев. До настоящего времени никто не попытался вычислить магнитное поле над АО в предвспышечном состоянии и сравнить это поле с потенциальным магнитным полем, отвечающим распределению поля в активной области в данный момент времени. Такое сравнение необходимо выполнить, используя в трехмерном МГД-расчете карты реального магнитного поля, не делая никаких упрощений.

Еще одна важная проблема состоит в правильном выборе размера расчетной области. Минимальный размер расчетной области, позволяющий правильно учесть магнитный поток за пределами АО, может быть определен только методом проб. В данной работе рассмотрены эти проблемы на примере АО 0365.

Постановка задачи

Полная система трехмерных МГД-уравнений с диссипационными членами численно решалась в короне над активной областью АО 0365 с использованием абсолютно неявной схемы [3], реализованной в программе «Пересвет».

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V} \rho), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta_0}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \\ & + \frac{1}{\text{Re}\rho} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta_0 \rho} \times \\ & \times (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_g \rho L'(T) + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} \times \\ & \times (\mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{dl} (\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp} \kappa_{\perp dl} (\mathbf{e}_{\perp}, \nabla T) + \\ & + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl} (\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T)). \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения решались в безразмерных единицах. В качестве единицы длины был выбран размер расчетной области $L_0 = 4 \cdot 10^{10}$ см. Единицей магнитного поля $B_0 = 300$ Гс служит характерная величина поля в АО.

Использовалась неоднородная конечно-разностная схема, в которой минимальный шаг составляет 0.005 (в безразмерных единицах). В местах больших градиентов автоматически происходило многократное дробление шага. Безразмерными единицами концентрации плазмы и ее температуры взяты типичные их значения в короне над АО, которые полагаются постоянными в пространстве в начальный момент: $\rho_0/m_i=10^8 \text{ см}^{-3}$, $T_0=10^6 \text{ К}$. Безразмерные единицы скорости, времени и плотности тока имеют вид:

$$V_0 = V_A = B_0 / \sqrt{4\pi\rho_0},$$

$$t_0 = L_0/V_0, j_0 = cB_0/4\pi L_0.$$

В уравнениях (1)–(4) $Re_m=V_0L_0/\nu_{m0}$ – магнитное число Рейнольдса; $\nu_{m0}=c^2/(4\pi\rho_0)$ – магнитная вязкость для проводимости σ_0 при температуре T_0 ; σ – проводимость; $\sigma/\sigma_0=T^{3/2}$; $\beta=8\pi n_0 k T_0 / B_0^2$ ($n_0=\rho_0/m_i$, m_i – масса иона); $Re=\rho_0 L_0 V_0 / \eta$ – число Рейнольдса; η – вязкость; $G_g=L(T_0)\rho_0 t_0 / T_0$; L – радиационная функция Кокса и Такера для ионизационного равновесия короны; $L'(T)=L(T_0)T/L(T_0)$ – ее безразмерный вид; \mathbf{e}_{\parallel} , $\mathbf{e}_{\perp 1}$, $\mathbf{e}_{\perp 2}$ – ортогональные единичные векторы, направленные соответственно параллельно и перпендикулярно магнитному полю; $\kappa_{\text{di}}=\kappa/(P\kappa_0)$ – безразмерная теплопроводность вдоль магнитного поля; $\Pi=\rho_0 L_0 V_0 / \kappa_0$ – число Пекле; κ_0 – теплопроводность при температуре T_0 ; κ – теплопроводность; $\kappa/\kappa_0=T^{5/2}$; $\kappa_{\perp\text{di}}=[(\kappa\kappa_0^{-1}\Pi^2)(\kappa_B\kappa_0^{-1}\Pi_B^{-1})]/[(\kappa\kappa_0^{-1}\Pi^2)+(\kappa_B\kappa_0^{-1}\Pi_B^{-1})]$ – безразмерная теплопроводность поперек магнитного поля; $\Pi_B=\rho_0 L_0 V_0 / \kappa_{\text{B}}$ – число Пекле для теплопроводности κ_{B} (для T_0 , ρ_0 , и B_0) поперек сильного магнитного поля; $\kappa_B/\kappa_{\text{B}}=\rho^2 B^{-2} T^{-1/2}$; $G_g \mathbf{G}$ – безразмерное гравитационное ускорение.

Ограничения, связанные с конечным шагом интегрирования, не позволяют использовать реальные величины безразмерных параметров в диффузионных членах уравнений (1)–(4), поэтому для выбора величин параметров использовался принцип ограниченного моделирования [5]. Использовались следующие значения безразмерных параметров: $\gamma = 5/3$, $Re_m=1000$, $Re=300$, $\beta=0.6 \cdot 10^{-5}$, $\Pi=100$, $\Pi_B=10^4$, $G_g=0.3 \cdot 10^{-5}$. Силой гравитации можно пренебречь по сравнению с магнитной силой и силой давления: $G_g=0$.

Вычисления начинались за три дня до появления серии вспышек, когда АО была спокойна и условия для формирования токовых слоев отсутствовали, следовательно, поле над АО можно было считать потенциальным. Начальное (потенциальное) поле в короне вычислялось решением уравнения Лапласа с наклонной производной вдоль луча зрения. Карты этой фотосферной компоненты брались из измерений SOHO MDI (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>).

Реальное (непотенциальное) магнитное поле в короне, сформированное не только фотосферными источниками, но и токами над активной областью, получалось численным решением уравнений (1)–(4). Для их решения в качестве граничных условий на фотосфере необходимо задавать в каждый момент времени две компоненты поля, параллельные фотосфере. Эти компоненты брались из потенциального поля, вычисленного в соответствующие моменты времени, так как поле на фотосфере определяется главным образом токами под фотосферой и практически не зависит от токов, текущих высоко в короне.

Оптимальный размер расчетной области

При аппроксимации АО точечными источниками обычно принимаются во внимание только наиболее мощные пятна без учета распределения поля внутри пятен, при этом совершенно игнорируется рассеянное магнитное поле между пятнами. Аппроксимация точечными магнитными зарядами особенно привлекательна, так как в этом случае магнитный поток, исходящий от каждого заряда, четко ограничен и сепаратрисы, разделяющие потоки, принадлежащие к определенным топологическим областям, определяются однозначно. При этом создается иллюзия, что аналогичные сепаратрисы существуют и в реальных сложных полях над АО. В настоящей работе для задания начального (потенциального) поля в АО и его эволюции в предвспышечном состоянии используются реальные распределения в АО. Поиск особых линий в вычисленном в короне поле осуществляется путем нахождения в различных плоскостях особых точек X-типа, в окрестности которых поле самосогласованно деформируется в конфигурацию токового слоя. Расчет при этом должен вестись в достаточно большой расчетной области, чтобы учесть влияние полей за пределами АО. Поскольку границы АО проводятся очень условно и за их пределами слабое фотосферное поле может занимать большую площадь, то его магнитный поток может оказывать существенное влияние на конфигурацию поля над АО. Примеры расчета потенциального поля над АО 0365 с использованием расчетных областей различного размера даны на рис. 1, 2.

На рис. 1, *a*, *b* представлен один и тот же участок плоского сечения короны с изображением линий потенциального поля, вычисленного в расчетных областях двух размеров: $L_0=2 \cdot 10^{10}$ и $L_0=4 \cdot 10^{10} \text{ см}$.

Из их сравнения следует, что при таком увеличении расчетной области конфигурация поля заметно меняется – возникает вторая особая X-точка. Это значит, что расчетная область $L_0=2 \cdot 10^{10} \text{ см}$ недостаточно велика, чтобы учесть главные особенности АО. Ее использование в модельном МГД-расчете не позволит получить правильную конфигурацию магнитного поля. При дальнейшем увеличении расчетной области (от $L_0=4 \cdot 10^{10}$ до $L_0=6 \cdot 10^{10} \text{ см}$, рис. 1, *c*, *z*) конфигурация поля практически не изменилась. Произошло лишь незначительное смещение вверх второй X-точки, следовательно, при таком размере области магнитное поле в короне было рассчитано правильно.

Аналогичным образом ведет себя и потенциальное поле, вычисленное для 27 мая 2003 г. при различных размерах АО (рис. 2). Здесь для области размером $L_0=2 \cdot 10^{10} \text{ см}$ особенности X-типа отсутствуют.

Приведенные данные показывают, что положение особых линий при учете только наиболее мощных пятен и пренебрежении рассеянным магнитным полем в окрестности АО может сильно отличаться от их реального положения в короне.

Результаты расчета магнитного поля над активной областью перед серией вспышек

На рис. 3 даны изолинии нормальной компоненты магнитного поля в АО 0365 перед вспышкой. Пронумерованными линиями показаны положения

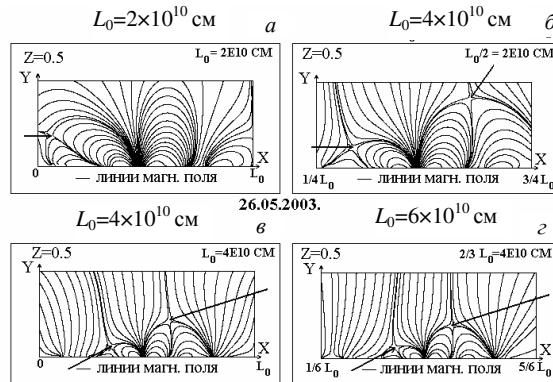


Рис. 1. Линии потенциального магнитного поля, вычисленные над АО 0365 26 мая 2003 г. с использованием расчетных областей различных размеров. Стрелки показывают особые X-точки.

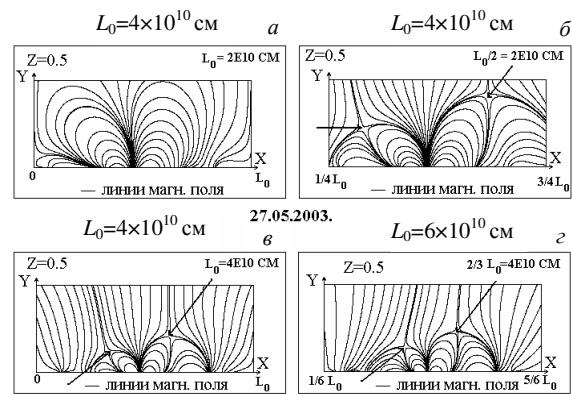


Рис. 2. Линии потенциального магнитного поля, вычисленные над АО 0365 27 мая 2003 г. с использованием расчетных областей различных размеров.

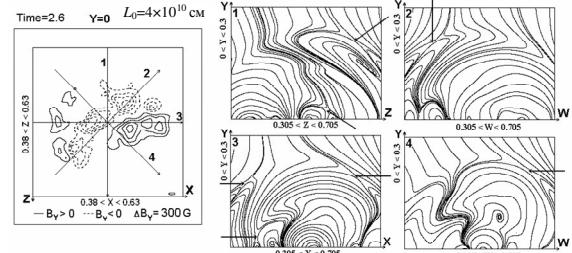


Рис. 3. Изолинии северной (сплошные линии) и южной (пунктир) нормальной компоненты в активной области (слева). Линии поля в плоскостях, перпендикулярных фотосфере (справа). Стрелками показаны токовые слои.

плоскостей, перпендикулярных фотосфере, в которых на рис. 3 справа представлены линии магнитного поля, рассчитанные путем решения МГД-уравнений (1)–(4).

Конфигурация поля в каждой из плоскостей показывает образование токовых слоев. Положение слоев показано стрелками. Важной особенностью приведенного здесь результата расчета предвспышечного состояния является появление не одного, как это обычно предполагается, а нескольких токовых слоев. Каждый такой слой при распаде может дать вспышку. Этим фактом, по-видимому, объясняется появление серии из нескольких элементарных вспышек, произошедших 26–28 мая 2003 г.

Никаких предположений о механизме образования токовых слоев в расчетах не делалось. Все обнаружен-

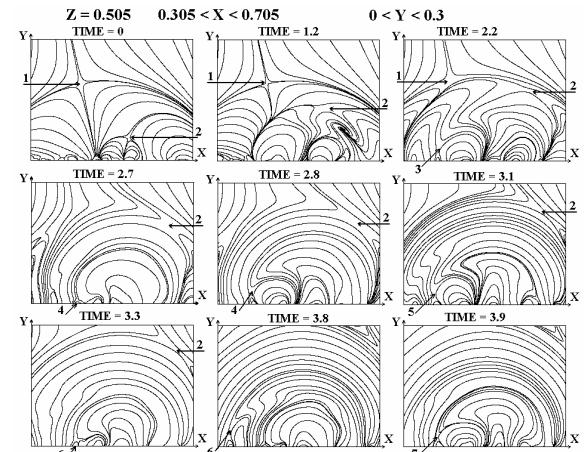


Рис. 4. Эволюция во времени конфигурации магнитного поля при МГД-моделировании над АО.

женные при численном моделировании токовые слои возникли в окрестности особых X-линий при всплытии нового потока. Численное моделирование и анализ магнитного поля на фотосфере не обнаружили никаких признаков генерации токовых жгутов (ropes), выбросами которых иногда [6] объясняется вытягивание линий поля с образованием токовых слоев.

Эволюция во времени конфигурации магнитного поля, в ходе которой возникает несколько токовых слоев, представлена на рис. 4 в центральной плоскости (т. е. плоскости 3 рис. 3). В ходе эволюции возникает несколько токовых слоев, причем их количество меняется со временем. Вследствие всплытия нового магнитного поля в области появляются все новые и новые токовые слои. При этом токовые слои возникают как в особых линиях X-типа (в плоскости рис. 4 – в X-точках), которые с самого начала существовали в потенциальном поле, так и во вновь появившихся X-линиях вследствие всплытия нового магнитного потока.

Возникновение многих токовых слоев в большой области (размером $4 \cdot 10^{10}$ см) не наблюдается при моделировании в малой расчетной области ($L_0 = 1.2 \cdot 10^{10}$ см) [7]. Вспышки могут возникать вследствие неустойчивости каждого появившегося токового слоя. Однако магнитное поле вблизи всплывшей из-под фотосфера X-точки много больше поля вблизи расположенных выше X-точек, существовавших в начальном потенциальном поле. Поэтому в поле токовых слоев, появившихся вблизи всплывших X-точек, накапливается больше энергии и они должны дать более мощные вспышки. Слои, появляющиеся вблизи всплывших X-точек, почти вертикальны (см. рис. 4). Вспышки в этих слоях могут вызвать корональные выбросы массы, поскольку сила $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$, которая ускоряет плазму, в слое направлена от Солнца.

Положение особых линий в потенциальном поле и в предвспышечном состоянии

Потенциальное магнитное поле, вычисленное решением уравнения Лапласа через сутки и двое суток (второй и третий день) после начала предвспышечного возрастания магнитного потока в центральной

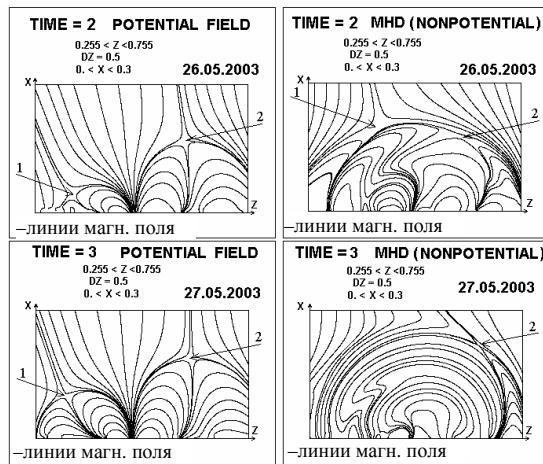


Рис. 5. Линии потенциального и непотенциального (с токовыми слоями) поля для двух моментов времени.

плоскости (плоскости 3 рис. 3), показывает две нулевых точки магнитного поля X-типа (рис. 5). Справа в этих же плоскостях дано магнитное поле над активной областью, рассчитанное в численном МГД-эксперименте по изменению поля в АО. Конфигурация поля во второй день показывает образование токового слоя в окрестности точки 2, причем X-точка в непотенциальном поле несколько смещена. Однако токовый слой, который образовался из X-точки 1 на второй день, оказался сильно смещенным от начального положения этой точки, а на третий день слой 2 вместе с X-точкой вышел из плоскости рисунка. Этот расчет демонстрирует смещение особых линий над сложной АО, когда токи нескольких токовых слоев вызывают изменение всей конфигурации магнитного поля, включая положение особых X-линий. Поэтому при анализе вспышек и выяснении координат образовавшегося токового слоя нельзя использовать расчетное потенциальное поле короны даже в том случае, если в расчете поле не аппроксимируется точечными источниками, а применяются карты реального фотосферного поля.

Такое различие положений особых линий и ТС не должно наблюдаться, если над активной областью существует единственная особенность. Однако появление каждого нового токового слоя приводит к искажению поля во всей области в короне и изменению положения других ранее существующих особых линий (в сечениях плоскостями – X-точек). Довольно хорошее совпадение положения токового слоя и особых линий потенциального поля в [4], по-видимому, объясняется тем, что другие токовые слои над областью АО были очень слабыми или обнаруженный слой был единственным.

Заключение

Показано, что для получения полной картины развития предвспышечного состояния расчетная область должна быть достаточно большой и включать область рассеянных полей за пределами главных солнечных пятен. Учет в вычислениях поля над АО только наиболее мощных пятен и пренебрежение рассеянными полями может приводить к сильным искажениям конфигурации поля и ошибочным выводам о расположении особых линий и токовых слоев. Правильный выбор размера счетной области $L_0 = 4 \cdot 10^{10}$ см позволил обнаружить над АО 0365 зарождение нескольких токовых слоев перед серией вспышек 26–28 мая 2003 г. Каждый из этих слоев мог быть ответственным за одну из элементарных вспышек. В ранее выполненной работе [7], где размер расчетной области был мал ($L_0 = 1.2 \cdot 10^{10}$ см), отчетливо зафиксировано появление только одного слоя.

Показано также, что при зарождении нескольких токовых слоев их влияние на общую конфигурацию поля над АО может быть значительным и положение X-точек, найденных в потенциальном поле, может сильно отличаться от мест расположения образовавшихся токовых слоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Модель солнечной вспышки: сопоставление с наблюдением высоконергетических процессов // Астрон. журнал. 2006. Т. 83. С. 940–949.
2. Подгорный И.М., Подгорный А.И. МГД-моделирование образования токового слоя над биполярной областью // Астрон. журнал. 2003. Т. 80. С. 753–760.
3. Подгорный А.И., Подгорный И.М. МГД-моделирование явлений в солнечной короне с использованием абсолютно неявной схемы // Журнал вычисл. математики и математич. физики. 2004. Т. 44, № 10. С. 1873–1897.
4. Уралов А.М., Руденко Г.В., Гречнев В.В. и др. Микроволновый источник над нейтральной линией – источник под токовым слоем // Труды Конференции «Микроволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», 28 сентября – 2 октября 2006, САО РАН, Нижний Архыз. 2006. С. 484–515.
5. Podgorny I.M. Simulation studies of space // Fundamentals of Cosmic Phys. 1978. V. 4. P. 1–72.
6. Tork T., Kliem B. Numerical simulations of fast and slow coronal mass ejections // Astron. Nachr. 2007. V. 328, N 8. P. 743–746.
7. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С. Моделирование токового слоя во вспышечной активной области и сопоставление с данными радиоизлучения // Астрономический вестник. 2007. Т. 41, № 4. С. 366–373.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Институт астрономии РАН, Москва

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск