

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА PYAMPP

В.В. Феденёв, С.А. Анфиногентов, С.В. Лесовой, М.В. Глоба

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Иркутск, Россия, fedenev@iszf.irk.ru

RECONSTRUCTION OF THE MAGNETOTHERMAL STRUCTURE OF SOLAR ACTIVE REGIONS USING THE PYAMPP SOFTWARE PACKAGE

V.V. Fedenev, S.A. Anfinogentov, S.V. Lesovoi, M.V. Globa

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, fedenev@iszf.irk.ru

Аннотация. Восстановление пространственного распределения полного вектора магнитного поля солнечной короны над активными областями имеет огромную важность для прогноза космической погоды. В рамках проекта SUNCAST, с применением новых и уже существующих методов нелинейной бессиловой экстраполяции поля и трёхмерных тепловых моделей солнечных активных областей, развивается программный пакет pyAMPP, отличающийся удобством использования, высокой производительностью и возможностью задействования наблюдения различных инструментов в качестве граничных условий. Цель этой работы — показать возможности данного программного обеспечения на момент публикации на примере нескольких солнечных активных областей. Были построены трёхмерные модели магнитоплазменной структуры для двух активных областей, сгенерированы синтетические радиокарты для каждой из них. Выполнено качественное сопоставление с наблюдательными данными, показавшее хорошее соответствие модельных радиоисточников реальным.

Ключевые слова: активные области, магнитное поле Солнца, численное моделирование, радиоизлучение.

Abstract. Reconstruction of the spatial distribution of the full vector of the solar corona magnetic field above active regions is of great importance for space weather forecasting. Within the framework of the SUNCAST project, using new and existing methods of nonlinear force-free field extrapolation and three-dimensional thermal models of solar active regions, the pyAMPP software package is being developed, aimed at ease of use, high performance and the ability to use observational data from various observational facilities as boundary conditions. The purpose of this work is to demonstrate the capabilities of this software at the time of publication using the example of several solar active regions. Three-dimensional models of the magnetothermal structure were built for two active regions, and synthetic radio maps were generated for each of them. A qualitative comparison with observational data showed a good agreement between the model radio sources and the real ones.

Keywords: active regions, solar magnetic field, numerical modeling, radio emission.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия магнитного поля солнечных активных областей, которая высвобождается в результате вспышек и корональных выбросов масс, является определяющим фактором космической погоды. Чтобы прогнозировать возможные последствия выделения этой энергии и оценить её количество, необходима реконструкция полного вектора магнитного поля во всём объёме активной области, начиная от фотосферы и выше, в солнечной короне.

Одной из наиболее распространённых методик восстановления магнитного поля является подход нелинейной бессиловой экстраполяции (Non-Linear Force Free Field, NLFFF), который основывается на приближении равенства нулю силы Лоренца, что, разумеется, в общем случае не так, однако, данное приближение позволяет создавать достаточно точные модели поля в солнечной короне.

Программные пакеты, использующие подход NLFFF, основаны на оптимизационном методе, описанном в работе [Wheatland et al, 2000]. Одним из самых известных и распространённых свободно распространяемых программных пакетов, использующих метод NLFFF, является GX Simulator [Nita et al, 2015], написанный на языке программирования IDL. При реконструкции магнитоплазменной структуры активной области GX Simulator сначала создаёт трёхмерный массив для хранения распределения вектора магнитного поля, заполняет его нижнюю границу значениями из фото-

сферной магнитограммы, проводит потенциальную экстраполяцию поля выше в объём короны, затем восстанавливает магнитное поле во всём объёме активной области в приближении NLFFF, используя потенциальное поле в качестве начального приближения оптимизационного метода. После получения вектора магнитного поля в объёме рассчитываются модельные силовые линии, а на их основе создаётся модель плотности и температуры в короне.

В дальнейшем полученную модель можно использовать уже для создания синтетических карт радио- или рентгеновского излучения как для спокойных, так и для вспышечных активных областей, см., например, [Fleishman, Kuznetsov, 2010].

PYAMPP И ЕГО РЕАЛИЗОВАННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

В составе команды проекта SUNCAST создаётся преемник GX Simulator — пакет pyAMPP, использующий широкие возможности языка программирования Python для параллельной обработки данных и интерактивных вычислений, обширную экосистему библиотек и набор средств для визуализации полученных результатов. На данный момент в pyAMPP реализованы следующие этапы моделирования:

1. Скачивание фотосферных данных (магнитограмм и вспомогательных карт в белом свете и в ультрафиолетовом диапазоне), полученные инструментами SDO/HMI и SDO/AIA [Pensnell et al; 2012]

для заданного момента времени, проецирование граничных условий на плоское основание модели с использованием цилиндрической равновеликой (cylindrical equal area, CEA) проекции;

2. Создание модели полного вектора магнитного поля в объёме короны над активной областью в потенциальном приближении;

3. Восстановление магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении по начальному приближению, полученному в предыдущем шаге;

4. Создание модели силовых линий на основе модели магнитного поля;

5. Построение синтетических карт радиоизлучения на произвольных частотах с применением магнитотепловой модели EBTEL для плотности и температуры плазмы в солнечных корональных петлях.

МОДЕЛИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ruAMPP

Для иллюстрации возможностей ruAMPP и в качестве верификации его корректной работы рассмотрим активные области AR13663 и AR13664, примечательные тем, что в них на момент написания статьи происходили самые сильные солнечные вспышки в текущем (25-м) цикле солнечной активности. В качестве нижнего граничного условия по магнитному полю были использованы магнитограммы SDO/HMI для моментов времени 2024-05-05 05:00:00 и 2024-05-09 04:00:00 соответственно (с предварительной проверкой, что эти времена не приходились на вспышки). На рис. 1 и рис. 2 показан модуль вектора фотосферного магнитного поля для первой и второй выбранных активных областей. На правых панелях показан результат восстановления магнитного поля пакетом ruAMPP.

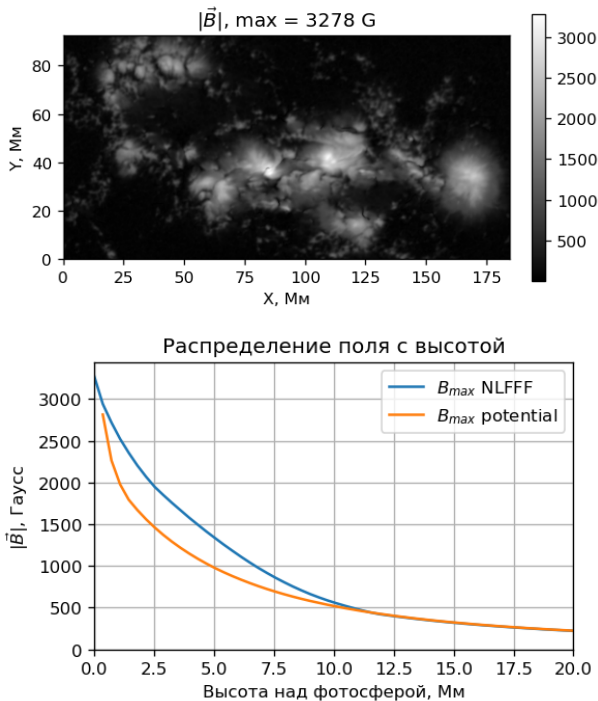


Рис. 1. Модуль магнитного поля и зависимость максимального модуля поля в зависимости от высоты над фотосферой, для активной области AR13663 в момент времени 2024-05-05 05:00:00

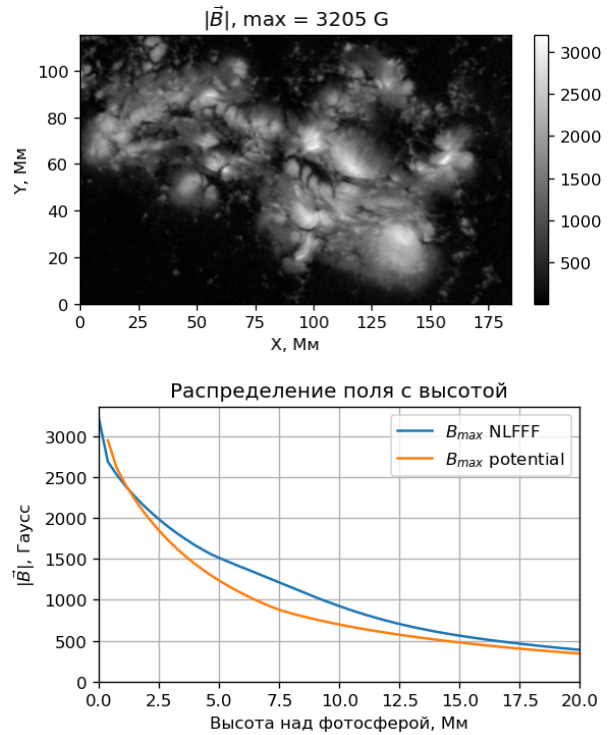


Рис. 2. Модуль магнитного поля и зависимость максимального модуля поля в зависимости от высоты над фотосферой, для активной области AR13664 в момент времени 2024-05-09 04:00:00

Энергия потенциального поля для активной области AR13663 составила 8.73×10^{32} эрг, а для AR13664 — 2.15×10^{32} эрг. Энергия нелинейного бессилового поля — 1.12×10^{33} эрг и 3.04×10^{33} эрг соответственно. В результате свободная энергия, которая является разностью между энергией в NLFFF и потенциальном приближениях и доступная для высвобождения во время вспышек, равняется для первой активной области 2.45×10^{32} эрг, а для второй — 8.82×10^{32} эрг.

СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

В составе ruAMPP имеется программный компонент для решения уравнения переноса излучения, описанный в работе [Fleishman, Kuznetsov; 2014]. На основе полученных моделей магнитного поля с применением магнитоплазменной модели EBTEL были получены синтетические радиоизображения на частотах наблюдения Сибирского Радиогелиографа 3–24 ГГц (СРГ) [Altynsev et al; 2020] в выбранные моменты времени. Результаты сравнения полученных модельных радиокарт с реальными наблюдениями на СРГ показаны на рис. 3 и 4. Для получения радиокарт СРГ из данных радиовидностей был использован программный пакет srhdata [Globa; 2024]. Использовалось разрешение 4.9 угловых секунд на пиксель, синтетические радиокарты приведены к пространственной сетке и к угловому разрешению СРГ.

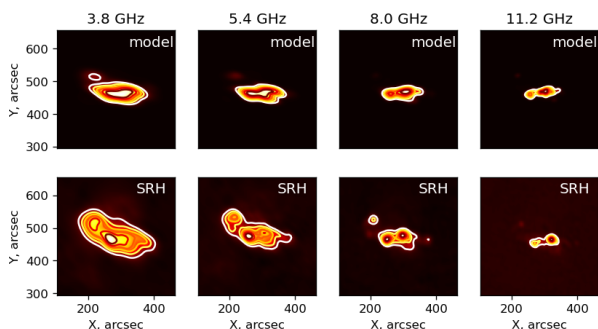


Рис. 3. Сравнение синтетических радиокарт и наблюдений Сибирского Радиогелиографа для AR13663 в момент времени 2024-05-05 05:00:00

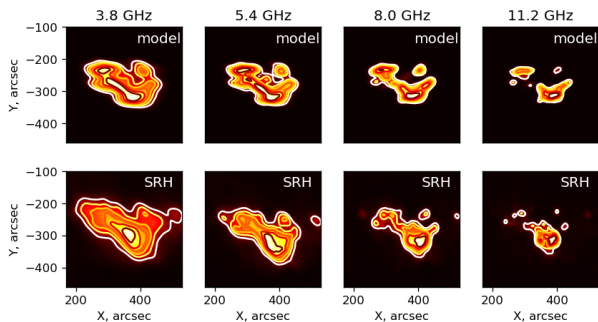


Рис. 4. Сравнение синтетических радиокарт и наблюдений Сибирского Радиогелиографа для AR13664 в момент времени 2024-05-09 04:00:00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно утверждать по нескольким признакам, что с помощью ruAMPР получены физически до-

стоверные модели магнитного поля и радиоизлучения из обеих активных областей. Во-первых, порядок величины свободной энергии в 10^{32} эрг достаточно для возникновения нескольких мощных вспышек X-класса, которые действительно наблюдались. Во-вторых, пространственная структура модельных радиоисточников качественно согласуется с наблюдательными данными. В частности, хорошо воспроизводится форма и местоположение радиоисточников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А., Лесовой С., Глоба М. и др. Многоволновой Сибирский Радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 30–40.

Нита Г.М., Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. и др. Трёхмерное Радио и Рентгеновское Моделирование и Анализ Данных: Раскрытие Сложности Вспышек // ApJ. 2015. Т. 799, № 2. С. 236.

Песнелл У.Д., Томпсон Б.Дж., Чемберлин П.С. Обсерватория Солнечной Динамики (SDO) // Солнечная физика. 2012. Т. 275, № 1–2. С. 3–15.

Уитленд М.С., Старрок П.А., Румелиотис Г. Оптимизационный Подход к Восстановлению Бессиловых Полей // ApJ. 2000. Т. 540, № 2. С. 1150–1155.

Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. Быстрые гиросинхротронные коды // ApJ. 2010. Т. 721. С. 1127–1141.

Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. Теория Гирорезонанса и Свободно-Свободных Излучений от Не-Максвелловских Квазистационарных Электронных Распределений // ApJ. 2014. Т. 781, № 2. С. 77.

URL: <https://github.com/maria-globa/srhdata> (дата обращения 31.05.2024)