

УДК 520.8

ОБ ОБРАБОТКЕ И АНАЛИЗЕ ДАННЫХ КОРОНАС-Ф/СПИРИТ И ДРУГИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2009 г. С. А. Богачёв*, В. В. Гречнев**, С. В. Кузин*,
В. А. Слемзин*, О. И. Бугаенко***, И. М. Черток****

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

**Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), Иркутск

***Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), Москва

****Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк

Поступила в редакцию 27.02.2008 г.

На комплексе КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в период с августа 2001 г. по декабрь 2005 г. было получено более 300000 изображений Солнца на двух телескопах и четырех спектрогелиометрах крайнего ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов. В статье представлены методы обработки таких данных и способы получения из них физической информации с учетом опыта обработки и анализа данных других космических экспериментов по исследованиям Солнца. Приводятся некоторые результаты применения рассмотренных методов.

PACS: 07.05.P, 96.60.P

ВВЕДЕНИЕ

На первичных изображениях Солнца, которые поступают на Землю с космических аппаратов, часто присутствуют инструментальные артефакты, которые накладываются на полезный сигнал, искажают его и мешают его обработке и анализу. Инструментальные эффекты могут быть интерпретированы как ошибочные физические явления. Наземные группы, обеспечивающие проведение эксперимента, обычно осуществляют предварительную обработку таких изображений. При этом они самостоятельно корректируют некоторые типы артефактов, которые просты в обработке и не оказывают существенного влияния на последующий анализ данных, а для остальных артефактов исследователю предоставляется программное обеспечение, которое он может применить самостоятельно.

При работе с инструментальными данными важно понимать, что любое воздействие на них сопровождается потерями информации или ее искажением. Наилучшим с этой точки зрения было бы предоставление исследователям не преобразованных файлов, а комплекса программных средств, обеспечивающего обработку и анализ информации. Исследователь при этом получает возможность самостоятельно решать, какие изменения приемлемы для решения стоящей перед ним задачи, а какие нет, и соответственно выбирать варианты обработки. Опыт обработки данных СПИРИТ, однако, показал, что некоторые особенности в изображениях целесообразнее корректировать сразу, так как они

серьезно затрудняют последующее использование данных.

В настоящей работе на примере изображений СПИРИТ мы рассматриваем инструментальные и иные особенности, присутствующие на телескопических изображениях крайнего ультрафиолетового диапазона, и описываем методы, используемые для их устранения. Также в работе дается обзор некоторых методов, используемых для научного анализа изображений.

ОСОБЕННОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПАХ

Перечислим основные факторы, которые приводят к потерям или искажению информации, поступающей на Землю с космических аппаратов. Значительные трудности при обработке изображений возникают из-за фона, складывающегося с полезным сигналом. Приемником излучения на современных телескопах, как правило, является ПЗС-матрица, на выходе которой, даже при отсутствии падающего света, всегда присутствует шумовой сигнал. Кроме того, существенный вклад в фон дает рассеянное излучение. В среднем, уровень фона на изображениях СПИРИТ обычно не превышает 5% от среднего сигнала, хотя на отдельных участках изображения это соотношение может увеличиваться.

Второй фактор – это потерянные данные. Информация с матрицы поступает на вход системы сбора и регистрации информации космического аппарата и далее передается на Землю цифровыми

пакетами, часть из которых может быть утеряна или искажена во время сеанса связи. При формировании изображения на месте таких утраченных пакетов возникают пустые участки, форма и размер которых зависят от формата телеметрических файлов. Так, на изображениях SOHO/EIT пропущенные пакеты имеют вид квадратов размером 32×32 пикселя, а на изображениях СПИРИТ – это строки, длина которых определяется степенью сжатия телеметрической информации.

Третий фактор, который влияет на качество спутниковых изображений, – это нелинейное и пространственно неоднородное ослабление излучения при его прохождении через системы телескопа. Суммарное действие всех этих факторов иногда объединяется термином “функция плоского поля”. Так, телескопы СПИРИТ имели в составе своей оптической системы фильтры, пропускающие на фотоприемник только излучение рабочего диапазона. Повреждения фильтра во время работы на орбите приводили к ослаблению проходящего через них излучения, что было учтено в функции плоского поля. Кроме фильтров, существенный вклад в функцию плоского поля могут вносить оптические преобразователи излучения (ЭОП) и фотоприемники, так как их чувствительность обычно неоднородна по полю изображения.

Четвертый искажающий фактор иногда называется “снегом” или “снежным штормом”. В мощных протонных событиях формируется значительное количество энергичных частиц, которые распространяются от Солнца в межпланетное пространство. Через некоторое время эти частицы достигают космического аппарата и проявляются на изображениях как яркие точки или полосы, похожие на снег. “Снег” на изображениях появляется и в тех случаях, когда космический аппарат входит в радиационные пояса Земли и в зоны полярных шапок.

При обработке изображений Солнца, полученных СПИРИТ, потребовалось дополнительно решить проблему центрирования изображения. Центр солнечного диска на изображениях смещается со временем из-за движения оси спутника, термодформаций и других факторов, суммарное действие которых непредсказуемо. В то же время для анализа физических процессов в атмосфере Солнца часто приходится привлекать данные нескольких диапазонов спектра, полученные на различных телескопах. При этом, конечно, необходимо обеспечить точность совмещения изображений не хуже пространственного разрешения телескопов. Поскольку система ориентации спутника КОРОНАС-Ф, на котором проходил эксперимент ТЕСИС, не давала информации о текущем положении платформы спутника, задачу центрирования изображений СПИРИТ приходилось решать специальными математическими методами.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОТЕРЯННЫХ ДАННЫХ И КОРРЕКЦИЯ ПЛОСКОГО ПОЛЯ

Возможности восстановления потерянных данных для телескопов СПИРИТ лучше, чем у похожих телескопов EIT на борту ИСЗ Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) из-за построчной передачи пакетов информации (у EIT – поблочная). Поскольку размер пикселя изображения телескопов СПИРИТ был меньше их пространственного разрешения, это дало возможность восстановления потерянных строк при минимальных вносимых искажениях.

Для восстановления потерянных данных на изображениях, в принципе, могут быть использованы два метода. Первый применяется, когда существует близкое по времени изображение, полученное в том же канале, что и предыдущее. В этом случае данные, пропущенные в первом изображении, могут быть скопированы из второго. На практике, однако, данный метод редко дает удовлетворительные результаты, так как даже близкие по времени изображения различаются из-за уровня фона, неодинаковой экспозиции и других факторов. Кроме того, для прямого копирования данных из одного изображения в другое требуется их совмещение с точностью, превышающей размер пикселя, что практически недостижимо. Как показал опыт СПИРИТ, более качественные результаты достигаются при заполнении пропущенных данных значениями, полученными в результате интерполяции данных из соседних строк. На практике хороший результат был получен при использовании интерполяции по четырем соседним точкам, заданной формулой:

$$X_i = X_{i+1} + X_{i-1} - \frac{1}{2}(X_{i+2} + X_{i-2}).$$

При восстановлении функции плоского поля следует принимать во внимание, что такая функция является общей для всех изображений одного канала. То есть для каждого канала можно составить единую матрицу поля. Матрицей поля мы называем таблицу чисел, размер которой совпадает с размером ПЗС-матрицы, а значения равны единице для тех пикселей, где излучение проходит через фильтр без искажения, и превышают единицу в тех пикселях, где излучение поглощается в фильтре. В результате для восстановления изображения достаточно умножить матрицу данных, считанную с ПЗС, на матрицу поля данного канала. Мы не описываем методы расчета функции плоского поля, поскольку они подробно изложены в литературе. Что касается телескопических каналов СПИРИТ, то для них был использован метод, изложенный в работе Kuhn и др. (1991).

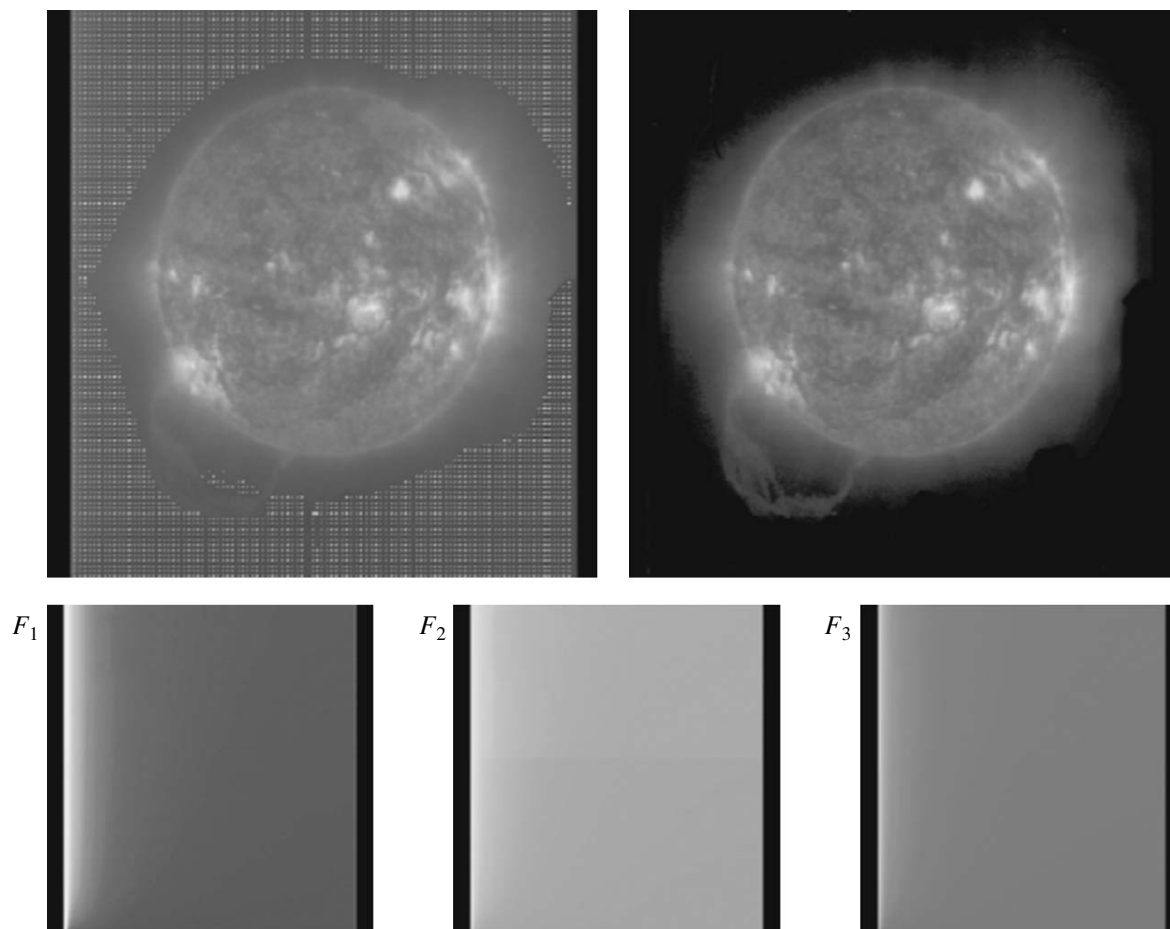


Рис. 1. Вычитание фона из изображения Солнца. На верхней панели приведены изображение до вычитания фона (показаны точки, по которым определялись коэффициенты a_i) и после вычитания. На нижней панели приведены примеры темновых кадров, использовавшихся как базисные функции F_i .

ВЫЧИТАНИЕ ФОНА И ЦЕНТРИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для вычитания фона и центрирования изображений группой СПИРИТ было разработано специальное программное обеспечение, доступное для внешних пользователей. Фон на спутниковых изображениях СПИРИТ (как и большинства космических телескопов) неоднороден по полю кадра и не может быть удален простым вычитанием постоянной подложки. Кроме того, распределение фона меняется от кадра к кадру, то есть его матрица должна рассчитываться отдельно для каждого изображения, в отличие от матрицы плоского поля, общей для всех изображений одного канала.

Для вычитания фона в изображениях СПИРИТ был разработан следующий метод, который показал высокую эффективность и на данных ЕИТ. Для каждого канала СПИРИТ составлен набор из нескольких десятков темновых кадров (изображений, полученных с закрытой шторкой). Эти кадры могут быть интерпретированы как двумерные матрицы фона F_i , отличающиеся друг от друга простран-

ственным распределением и яркостью. Далее предполагается, что фон произвольного изображения может быть представлен как сумма функций F_i с некоторыми коэффициентами:

$$\text{Back} = a_0 + \sum a_i F_i. \quad (1)$$

Таким образом, задача построения матрицы фона сводится к задаче определения набора коэффициентов a_i , индивидуальных для каждого изображения. Для этого с изображения считывается набор значений в нескольких тысячах точек, находящихся за пределами солнечного диска. Затем коэффициенты a_i подбираются так, чтобы минимизировать сумму квадратов расхождений между значениями в точках изображения и этих же точках в матрице фона (1). Результат применения метода показан на рис. 1.

Нами также было разработано программное обеспечение для определения координат и центрирования телескопических изображений. Соответствующая методика основана на нахождении солнечного лимба на исследуемом изображении. Поиск

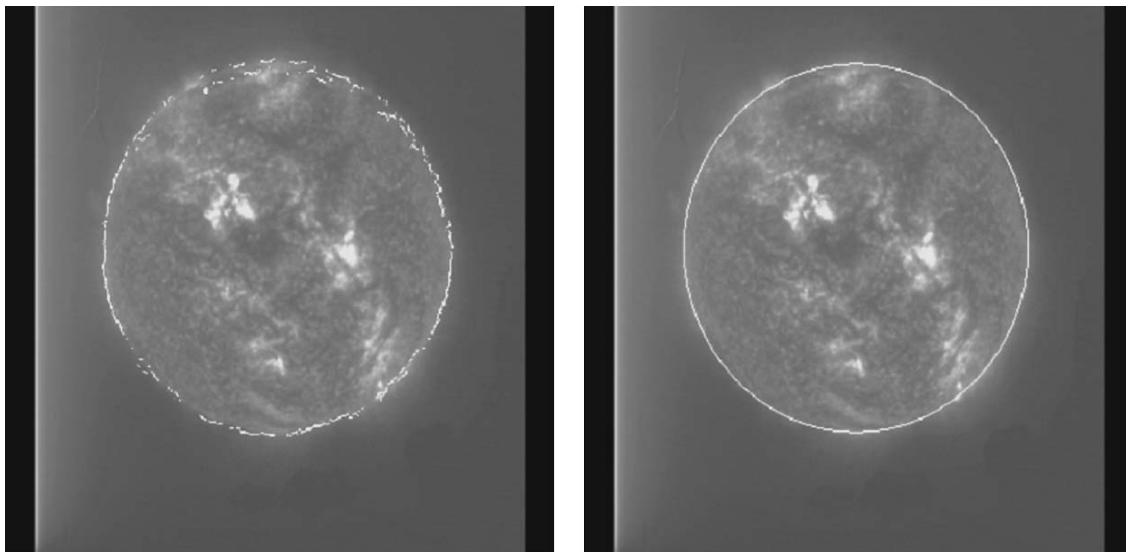


Рис. 2. Определение положения лимба на изображении СПИРИТ. Рисунок слева показывает исходное изображение с точками лимба, определенными на первой итерации. На правом рисунке показан результат после третьей, заключительной итерации.

лимба осуществляется последовательными итерациями при построчном сканировании изображения. Определение точки лимба зависит от канала, в котором получено изображение. В каналах 175 Å и 195 Å, где основное излучение формируется корональной плазмой, лимб определяется по максимальной яркости изображения, а в канале He II 304 Å, в котором регистрируется, в основном, излучение плазмы переходного слоя, – по максимальному градиенту яркости, соответствующему переходу от солнечного диска к “небу”. Диапазон, в котором ищутся точки лимба на каждом шаге итерации, зависит от разброса (дисперсии) точек, найденных на предыдущей итерации. Как правило, метод сходится за три-четыре итерации. Точность нахождения центра солнечного диска составляет половину размера пикселя (для изображений СПИРИТ это около 2”). Данный метод иллюстрируется на рис. 2.

МЕТОДЫ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

После центровки изображений, вычитания фона, коррекции плоского поля и подавления других инструментальных особенностей перед исследователем возникает задача извлечения физической информации из изображений. Применяемые на этом этапе методы мы называем методами вторичной обработки – в отличие от методов первичной обработки, направленных на повышение качества изображений, а также приведение их к стандартным масштабам, ориентации и форматам (см. Grechnev и др., 1999; Grechnev, 2002).

Научная информация, содержащаяся в изображениях Солнца, чрезвычайно разнообразна. Соот-

ветственно, весьма многообразны и методы ее получения и анализа (см., например, Бугаенко и др., 2004). Здесь мы опишем лишь некоторые из них, относящиеся, прежде всего, к анализу больших серий последовательных изображений. Такой тип данных широко распространен, а методы работы с ними не столь развиты и известны, как методы обработки и анализа отдельных изображений.

Обработка серий изображений имеет две важные особенности. Во-первых, необходимо хорошее совмещение кадров серии, чтобы возможные “дрожания” не помешали сравнивать изображения друг с другом. Такое дрожание может быть устранено, например, методом, основанным на вычислении коэффициентов корреляции между изображениями и подборе такого их положения, чтобы корреляция между соседними кадрами была максимальной. Вторая особенность состоит в том, что все изображения серии должны быть приведены к одинаковым яркостным характеристикам (Слемзин и др., 2005). Такая фотометрическая калибровка особенно важна при количественном анализе данных.

Нелинейное представление изображений

Изображения мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового диапазонов характеризуются очень высоким динамическим диапазоном из-за широкого диапазона значений меры эмиссии наблюдаемых корональных структур. Для его сжатия в ряде случаев можно использовать ограничение уровней яркости сверху и снизу. Шумы типа белых или черных точек, присутствующие в некоторых изображениях, могут существенно понизить контраст, если эти локальные дефекты имеют очень

высокие и низкие значения. В этом случае существенно улучшить контраст может медианное сглаживание. При этом, однако, страдает пространственное разрешение. Другой мощный, но весьма грубый способ состоит в выравнивании гистограммы распределения яркостей. Это нелинейное преобразование изображения делает распределение яркостей по изображению равномерным. Сущность способа состоит в удалении значений, имеющих низкую статистическую значимость или вообще отсутствующих в изображении. Динамический диапазон в изображениях, обработанных этим способом, резко сжимается. В результате контраст значительно уменьшается, и как очень яркие, так и очень слабые детали становятся видимыми одновременно, что облегчает обнаружение на изображении деталей с малым контрастом. Этот метод универсален и позволяет увидеть общую картину корональных структур на любых изображениях крайнего ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов (ИСЗ SOHO/EIT, Transition Region And Coronal Explorer (TRACE), Yohkoh/SXT, КОРОНАС-Ф/СПИРИТ).

Разностные методы

Для исследования слабоконтрастных явлений и структур, яркость которых мала по сравнению с окружающими структурами, применяются разностные методы. В этом случае берутся два изображения, одно вычитается из другого, и по разностной картине определяется, какие изменения и где именно произошли за время между этими двумя кадрами.

Один из разностных методов, широко используемый, в частности, для обнаружения корональных выбросов массы (КВМ) и корональных волн, состоит в том, что из каждого кадра вычитается непосредственно предшествующее ему изображение. Этот метод называется в англоязычной литературе “running difference” (“бегущая разность”). При его применении важно понимать, что разностные изображения, полученные этим методом, показывают временную производную от распределения яркости, а не само распределение, а также то что присутствующие на изображениях артефакты также будут продифференцированы.

Во втором из разностных методов из всех кадров вычитается одно и то же изображение, полученное до начала события. При этом, однако, на изображениях могут возникать артефакты из-за вращения Солнца (этот эффект наиболее выражен для структур, расположенных вдоль меридиана). Чтобы его избежать, до вычитания кадров вращение Солнца компенсируется на всех изображениях с помощью преобразования сферических координат.

Метод разностных кадров с фиксированной базой и предварительной компенсацией солнечного вращения очень эффективен для исследования

диммингов – временных снижений яркости корональных структур, происходящих при многих КВМ. Этот метод использовался для анализа данных SOHO/EIT (Черток, Гречнев, 2003а; 2003б; 2005), сейчас успешно применяется для анализа данных КОРОНАС-Ф/СПИРИТ (Черток и др., 2004; Grechnev и др., 2005; Slemzin и др., 2004; 2005; Kuzin и др., 2006). Заметим, что димминги – относительно слабые явления: величина уменьшения яркости в них обычно не превышает нескольких процентов от максимальной яркости по изображению. Поэтому при их исследовании разностными методами необходимо ограничивать диапазон яркости в изображениях.

На рис. 3 два описанных разностных метода иллюстрируются на примере данных SOHO/EIT в канале 195 Å для события 28 октября 2003 г. В левом ряду (А) представлены исходные изображения с выровненной гистограммой. Ряд Б показывает разностные изображения, полученные методом “бегущей разности”. Изображения в ряде В получены методом с фиксированной базой 10:48 UT, но без учета вращения Солнца. В ряде Г это вращение было учтено.

Количественное исследование диммингов осуществляется путем исследования и сравнения вариаций яркости в малых площадках (см., например, Zarro и др., 1999; Slemzin и др., 2005). Построенные таким методом временные профили позволяют оценить глубину потемнения, а также сравнить эволюцию явления в разных частях солнечного диска.

Подавление следов частиц в изображениях

Эффективная процедура подавления “снега” имеется в программном обеспечении SOHO. В этой процедуре “снежинки” (следы частиц) детектируются по превышению яркости над яркостью в изображении, подвергнутому медианному сглаживанию с шириной окна 7. Пиксели внутри “снежинок” заменяются на пиксели сглаженного изображения.

Эффективность подавления следов частиц может быть повышена, если привлечь соседние кадры. Кроме того, имеются дополнительные возможности повышения эффективности в исследованиях диммингов, когда важны лишь потемнения корональных структур, и нет необходимости регистрировать уярчения. Нами разработаны методы, учитывающие эти обстоятельства (Grechnev, 2004; Chertok, Grechnev, 2005). Один из них заключается в формировании разностных изображений, которые показывают только потемнения. Это особенно полезно, когда доступны только два изображения, одно – до события и другое – после него. В этом случае каждому пикселю изображения, из которого вычитается базовый кадр, присваивается минимум из значений этого пикселя в обоих изображениях, и

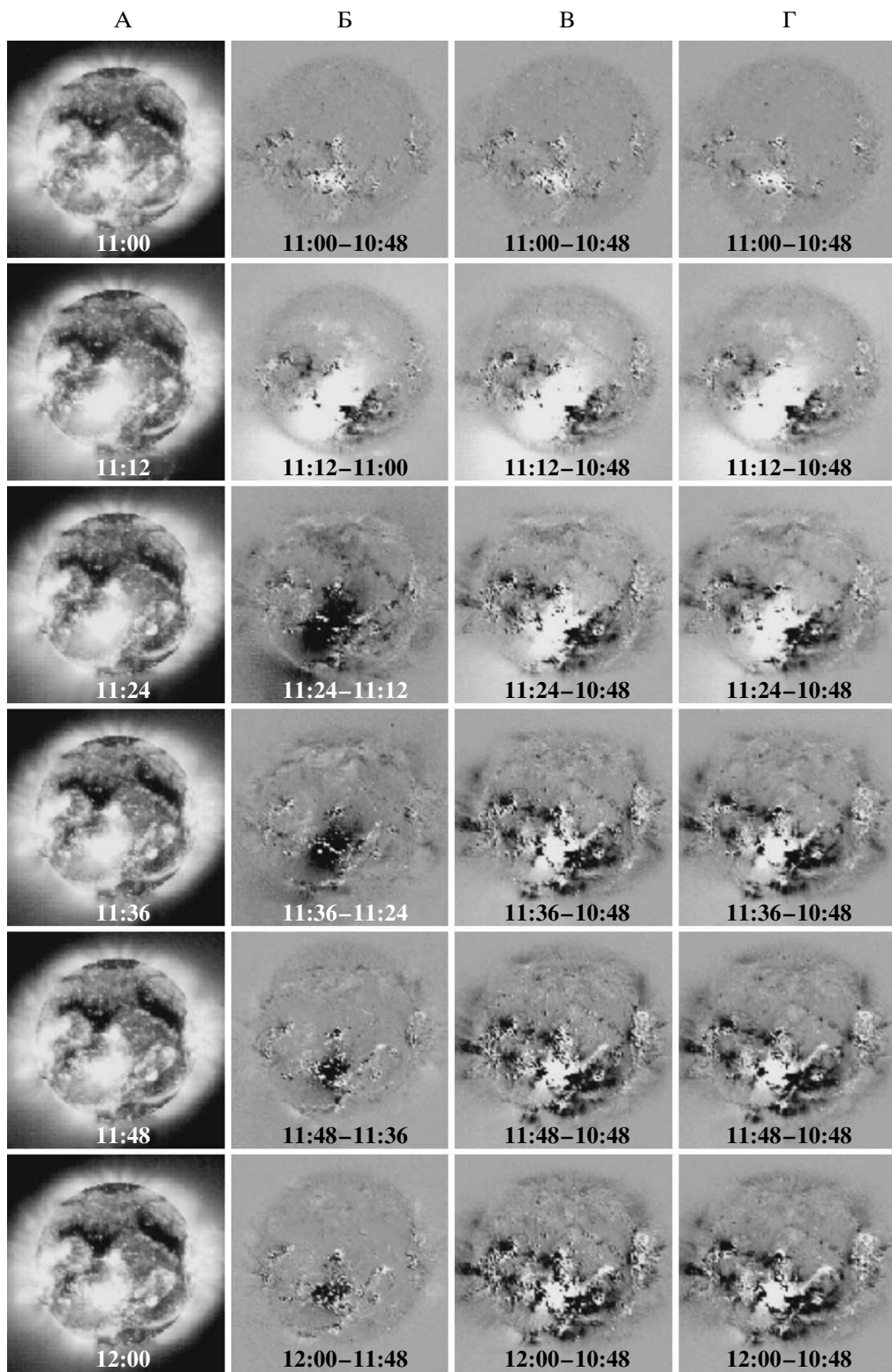


Рис. 3. Способы получения разностных изображений на примере данных SOHO/EIT в канале 195 \AA для события 28 октября 2003 г. Ряд А: исходные изображения EIT. Ряд Б: изображения, полученные методом “бегущей разности”. Ряд В: разностные изображения, полученные методом с фиксированной базой без компенсации солнечного вращения. Ряд Г: то же, что и ряд В, но с предварительной компенсацией солнечного вращения. Базовый кадр в нижнем ряду взят на 5 часов раньше, чем в остальных.

соответствующий пиксель разностного изображения x_{ij}^{dif} формируется как $x_{ij}^{\text{dif}} = \min\{x_{ij}^0, x_{ij}^1\} - x_{ij}^0$, где индексы 0 и 1 относятся к изображениям до и после события. Таким образом, пиксели разностного изображения – либо нули, если яркость не уменьшилась, либо отрицательны, если произошло ее уменьшение.

Еще более простой способ состоит в формировании разностных изображений, при котором каждый пиксель вычитаемого изображения заменяется на минимум по соседним:

$$x_{ij}^N = \min\{x_{ij}^{N-k} \dots x_{ij}^{N+k-1}\},$$

где N – номер данного кадра, $2k$ – ширина “окна фильтрации” (количество изображений, используемых для подавления следов частиц). Очевидно, что артефакты в таком изображении ограничиваются величиной $2k$, а уярчения в пределах ширины окна будут заметно подавлены.

Полное восстановление изображения осуществляется более сложным способом. В этом случае мы находим “хлопья” снега на изображениях как выраженные изолированные уярчения по отношению к соседним кадрам и затем заменяем значение каждого пикселя внутри них на его минимальное значение по соседним изображениям.

Метод дисперсионных карт

Исследователю нередко приходится иметь дело с большими наборами данных, например, при изучении солнечных вспышек, когда для идентификации активных вспышечных источников и их динамики требуется анализировать десятки, сотни и даже тысячи кадров. Для нахождения активных вспышечных источников в этих сериях можно воспользоваться дисперсионной картой. Такая карта представляет динамику всего события в одном-единственном изображении (Grechnev, 2005). Дисперсионная карта получается вычислением дисперсии в каждой пространственной точке куба данных вдоль его временного измерения. Дисперсионная карта σ_{ij}^2 для куба данных x_{ijk} может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ijk}^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{k=1}^N x_{ijk} \right)^2.$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, L$ – номер строки изображения, $j = 1, 2, \dots, M$ – номер столбца и $k = 1, 2, \dots, N$ – номер “слоя” изображения в кубе данных размерностью $L \times M \times N$. Данное выражение эквивалентно определению дисперсии, но не содержит перекрестных членов. Это позволяет избежать повторного сканирования куба данных, уменьшая время вычислений.

Значение каждой точки на такой карте отражает изменчивость во времени этой точки пространства.

Поэтому на дисперсионной карте проявляются переменные источники: источники с изменяющейся яркостью, движущиеся, флуктуирующие и т.д. – разумеется, в соответствии со статистической значимостью их изменчивости.

На дисперсионной карте также проявляются регулярные инструментальные эффекты (например, боковые лепестки инструментальной функции). Это дает возможность судить о том, может ли источник быть инструментальным эффектом. Мы рекомендуем отвергать слабые источники, если их временные профили воспроизводят вариации главного вспышечного источника, ответственного за боковые лепестки.

Этот метод использовался ранее для анализа наборов радиоизображений солнечных вспышек (Гречнев и др., 2002; Grechnev, 2003), для исследования квазипериодических колебаний в активных областях по оптическим (Tsiroula и др., 2000) и радиоданным (Nindos и др., 2002), а также для изучения эволюции фотосферных магнитных полей (Kundu и др., 2001).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью изложенных методов анализа данных было значительно улучшено качество изображений базы данных СПИРИТ, а также получен ряд научных результатов. Были исследованы крупномасштабные явления, в особенности димминги и корональные волны, в ряде мощных эруптивных событий в периоды высокой активности на фазе максимума и спада 23-го солнечного цикла (см. Житник и др., 2005; Слемзин и др., 2005; Черток и др., 2005; Grechnev и др., 2005; Zhitnik и др., 2003). Обнаружены глобальный характер и гомология этих явлений, а также разновременность потемнения структур в канале 304 Å относительно корональных эмиссионных линий, предполагающая постепенное развитие димминга сверху вниз, вплоть до переходного слоя (Черток и др., 2005). Установлено, что механизмы, ответственные за образование диммингов и корональных волн, в общем случае различны, а имеющие повышенную яркость фронты корональных волн, возможно, обусловлены излучением плазмы с температурой выше 10 МК (Grechnev и др., 2005). Обнаружены выбросы крупномасштабных движущихся облаков плазмы, имеющих температуры, видимому, порядка 10000 К (Slemzin и др., 2004; Grechnev и др., 2005).

Представленные методы обработки данных реализованы в виде программного пакета, доступного на Web-сайте <http://www.thesis.lebedev.ru/soft>. Этот пакет совместим с SolarSoft (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/solarsoft/>) и является основой при разработке программного обеспечения нового космического эксперимента

ФИАН ТЕСИС на борту ИСЗ КОРОНАС-Фотон. Начало эксперимента запланировано на 2008 год.

Авторы благодарны инструментальным группам космических миссий SOHO и GOES.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 05-02-17415, 06-02-16106, 07-02-00101), Министерства образования и науки РФ (гранты НШ-8499.2006.2, НШ-477.2003.2, НШ-7495.2006.2), а также программы № 16 ОФН РАН, программы Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля” и программ фундаментальных исследований ОФН РАН “Плазменная гелиофизика” и “Нестационарные процессы в астрономии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бугаенко О.И., Гречнев В.В., Жигалкин Р.К. и др. Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф: I. Методы наблюдений и анализа солнечных изображений, зарегистрированных в различных диапазонах волн // Изв. Крымск. астрофиз. obs. 2004. Т. 100. С. 102–114.
- Гречнев В.В., Накаджима Х., Кунду М.Р. Модели и наблюдения импульсных солнечных вспышек // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2. С. 18–20.
- Житник И.А., Кузин С.В., Собельман И.И. и др. Основные результаты эксперимента СПИРИТ на ИСЗ КОРОНАС-Ф // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 495–506.
- Слемзин В.А., Кузин С.В., Житник И.А. и др. Результаты наблюдений EUV излучения Солнца телескопами СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф и SOHO/EIT // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 542–549.
- Чертюк И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабные канализированные “димминги”, вызываемые корональными выбросами массы на Солнце // Астрон. журн. 2003а. Т. 80. С. 162–174.
- Чертюк И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабные “димминги”, вызываемые корональными выбросами массы на Солнце, по данным SOHO/EIT в четырех линиях крайнего УФ-диапазона // Астрон. журн. 2003б. Т. 80. С. 1013–1025.
- Чертюк И.М., Слемзин В.А., Кузин С.В. и др. Солнечное эруптивное событие 4 ноября 2001 г. по данным телескопа СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 447–458.
- Чертюк И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабная активность в солнечных эруптивных событиях октября–ноября 2003 г. по данным SOHO/EIT // Астрон. журн. 2005. Т. 82. № 2. С. 180–192.
- Чертюк И.М., Гречнев В.В., Слемзин В.А. и др. Проявления корональных выбросов массы в крайнем УФ-диапазоне по данным телескопа КОРОНАС-Ф/СПИРИТ // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 517–526.
- Chertok I.M., Grechnev V.V. Large-scale activity in the Bastille Day 2000 solar event // Sol. Phys. 2005. V. 229. P. 95–114.
- Grechnev V.V. A way to detect variable objects // Patent No. 2246760. 2005.
- Grechnev V.V., Altyntsev A.T., Kononov S.K., Lesovoi S.V. Joint processing of radio data produced by the SSRT together with data of other spectral ranges // Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII. ASP Conference Series / Eds. Mehringer D.M., Plante R.L., Roberts D.A. 1999. V. 172. P. 329–332.
- Grechnev V.V. Solar data analysis with IDL software // Int. Symp. Phys. Processes associated with the Sun, Weihai, 5–12 Aug. 2002. <http://srg.bao.ac.cn/weihai-lect/Grechnev/Grechnev01.htm>.
- Grechnev V.V. A method to analyze imaging radio data on solar flares // Sol. Phys. 2003. V. 213. P. 103–110.
- Grechnev V.V. Solar energetic particles in SOHO/EIT images: Cleaning images and particle diagnostics // Proc. IAU Symp. 223 “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity” / Eds Stepanov A.V., Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. 2004. P. 625–626.
- Grechnev V.V., Chertok I.M., Slemzin V.A., et al. CORONAS-F/SPIRIT EUV observations of October–November 2003 solar eruptive events in combination with SOHO/EIT data // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A09S07, doi:10.1029/2004JA010931.
- Kuhn J.R., Lin H., Loran D. Gain calibrating nonuniform image-array data using only the image data // PASP. 1991. V. 103. P. 1097.
- Kundu M.R., Grechnev V.V., Garaimov V.I., White S.M. Double loop configuration of a flaring region from microwave, extreme-ultraviolet, and X-ray imaging data // Astrophys. J. 2001. V. 563. P. 389–402.
- Kuzin S., Chertok I., Grechnev V., et al. CME-associated dimmings on the Sun observed with the EUV SPIRIT telescope on the CORONAS-F spacecraft // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 451–455.
- Nindos A., Alissandrakis C.E., Gelfreikh G.B., et al. Spatially resolved microwave oscillations above a sunspot // Astron. and Astrophys. 2002. V. 386. P. 658–673.
- Slemzin V., Chertok I., Grechnev V., et al. Multi-wavelength observations of CME-associated structures on the Sun with the CORONAS-F/SPIRIT EUV telescope // Proc. IAU Symp. 223 “Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity” / Eds Stepanov A.V., Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. 2004. P. 533–536.
- Slemzin V.A., Grechnev V.V., Zhitnik I.A., et al. EUV observations of CME-associated eruptive phenomena with the CORONAS-F/SPIRIT telescope/spectroheliograph // Proc. IAU Symp. 226. “Coronal and Stellar Mass Ejections” / Eds Dere K.P., Wang J., Yan Y. 2005. P. 21–25.
- Tsiropoulou G., Alissandrakis C.E., Mein P. Association of chromospheric sunspot umbral oscillations and running penumbral waves. I. Morphological study // Astron. and Astrophys. 2000. V. 355. P. 375–380.
- Zarro D.M., Sterling A.C., Thompson B.J., et al. SOHO EIT observations of extreme-ultraviolet “dimmings” associated with halo coronal mass ejections // Astrophys. J. Lett. 1999. V. 520. P. L139–L142.
- Zhitnik I.A., Bugaenko O.I., Ignat’ev A.P., et al. Dynamic 10 MK plasma structures observed in monochromatic full-Sun images by the SPIRIT spectroheliograph on the CORONAS-F mission // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2003. V. 338. P. 67–71.