

УДК 523.947:520.86

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ В ИЗМИРАН

© 2011 г. Р. А. Гуляев

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: rgulyaev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 02.03.2010 г.

После доработки 28.06.2010 г.

За период с 1945 по 2009 г. сотрудники ИЗМИРАН провели 24 экспедиции по наблюдению солнечных затмений. Главным предметом исследований были характеристики солнечной короны: структура, интенсивность и поляризация излучения, линейчатый и непрерывный спектр и т.д. Представлен обзор важнейших результатов, способствовавших развитию современных представлений о строении и физических свойствах солнечной короны.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения солнечных затмений сыграли исключительную роль в развитии физики Солнца. Прежде всего, это относится к исследованиям солнечной короны. Научное изучение короны началось в середине XIX века. Этому способствовало, во-первых, появление фотографии и, во-вторых, развитие методов спектрального анализа и внедрение этих методов в практику наблюдений солнечных затмений. Первые фотоснимки (дагерротипы) солнечной короны были получены во время затмения 28 июля 1851 г. Бушем и Берковским в Кенигсберге. Классик затменных наблюдений М. Вальдмайер отмечал, что именно этот момент следует считать началом эры научных исследований солнечной короны [Waldmeier, 1951]. Вскоре открытия посыпались как из рога изобилия. Кратко перечислим наиболее важные из них.

1869 г. — В спектре короны обнаружена первая эмиссионная линия λ 5303 Å. **1871 г.** — обнаружены темные фраунгоферовы линии в спектре короны. **1871–1878 гг.** — Замечено, что вид короны меняется с циклом солнечных пятен. **1900 г.** — Выяснилось, что излучение внутренней короны поляризовано. **1914 г.** — открыта вторая корональная линия λ 6374 Å. К середине XX века число зарегистрированных эмиссионных линий в видимой области коронального спектра превысило 40. **1923 г.** — Гротриан разделил спектр короны на две составляющие: непрерывный спектр без линий поглощения (*K*-корона) и фраунгоферов спектр, в котором линии имеют такую же глубину, как и в спектре Солнца (*F*-корона). **1936 г.** — Спектрограммы Г.А. Шайна показали, что в спектре *K*-короны отсутствуют даже следы линий поглощения *H* и *K* Ca II. На основании этих результатов

И.С. Шкловский пришел к выводу, что температура короны составляет $\sim 10^6$ К, тем самым положив начало теории “горячей” солнечной короны. **1947 г.** — Советские исследователи провели эксперимент по регистрации изменений потока солнечного радиоизлучения в ходе затмения, доказавший, что метровое излучение Солнца генерируется именно в короне. В результате была подтверждена концепция “горячей” короны Шкловского. **1966 г.** — По наблюдениям в инфракрасной области спектра обнаружено собственное тепловое излучение нагретой пыли в ближнем околосолнечном пространстве (*T*-корона).

Выдающийся организатор науки, основатель ИЗМИРАН Николай Васильевич Пушков (1903–1981) придавал первостепенное значение комплексности геофизических исследований. Не оставлял он без внимания и такой специфический аспект исследований, как наблюдения солнечных затмений, справедливо полагая, что наблюдения затмений являются эффективным средством изучения не только Солнца, но и разнообразных проявлений солнечно-земных связей. Первая экспедиция для наблюдений затмения была организована им еще в 1945 г. Впоследствии ИЗМИРАН проводил затменные наблюдения разных видов: магнитометрические, ионосферные, озонометрические, радиоастрономические и т.д. Но наиболее масштабный характер приобрели, особенно с приходом в ИЗМИРАН в 1958 г. Г.М. Никольского, оптические наблюдения затмений, нацеленные на изучение внешней атмосферы Солнца и межпланетной среды. Ниже представлен обзор ряда затменных наблюдений 1954–2008 гг., способствовавших развитию современных представлений о строении солнечной короны.

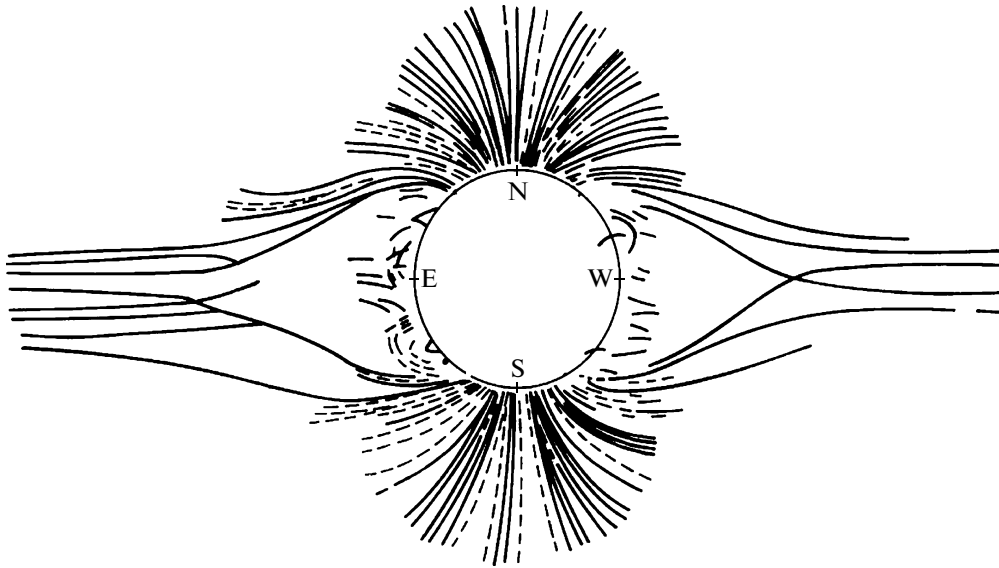


Рис. 1. Структура солнечной короны 30 июня 1954 г. по С.К. Всехсвятскому и Г.М. Никольскому.

2. ОБНАРУЖЕНИЕ ИСКРИВЛЕННОСТИ КОРОНАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ

Затмение 30 июня 1954 г. пришлось на период глубокого минимума солнечной активности, и наблюдателям предстала корона “идеально минимального типа”. По материалам наблюдений Г.М.Никольский совместно с С.К. Всехсвятским составил структурный рисунок короны, который до сих пор воспринимается (и часто демонстрируется) как эталонное изображение короны “минимального” типа (рис. 1 [Всехсвятский и Никольский, 1955]).

Маленькая экспедиция НИЗМИР (будущий ИЗМИРАН) — Э.И. Могилевский, Ю.Н. Куликова и А.Е. Веллер — провела наблюдения в г. Козельце Черниговской обл. Для изучения поляризации короны была использована трехобъективная камера с поляроидами (наблюдатель Ю.Н. Куликова). Обработка и анализ полученного материала были завершены с приходом в ИЗМИРАН Г.М. Никольского, который взял на себя методическое руководство работой по обработке результатов наблюдений. Измерение поляризации в корональных лучах (или, как теперь говорят, “стримерах”), выполненное И.Д. Гиц по снимкам Ю.Н. Куликовой, показало необычный ход степени поляризации в восточном луче: сначала рост, затем, начиная с расстояния $3.5 R_{\odot}$, уменьшение с удалением от Солнца [Гиц, 1961]. Г.М. Никольский высказал предположение, что это связано с искривлением луча в направлении, перпендикулярном к картинной плоскости.

Предположение Г.М. Никольского нашло серьезное подтверждение результатами наблюдений затмения 10 июля 1972 г. Две группы ИЗМИРАН наблюдали затмение на Чукотке (коса Русская

кошка в Беринговом море). Г.М. Никольский наблюдал корону с поляриметром, состоящим из двухобъективной камеры и вращающихся секторных поляроидов, один из которых выделял излучение с радиальным направлением поляризации, другой — с тангенциальным. Сопоставление измеренного хода степени поляризации в 15-ти корональных лучах с семейством кривых Баумбаха [Baumbach, 1937] дало представление о трехмерной конфигурации лучей. Обнаружено, что направления всех лучей существенно отличаются от радиального: лучи отклоняются от картинной плоскости, причем угол отклонения возрастает с удалением от Солнца, следовательно, лучи искривлены в направлении, перпендикулярном к картинной плоскости [Nikolsky et al., 1977]. Сейчас, когда стало известно, что корональные лучи, стримеры, суть структурные элементы гелиосферного токового слоя, уже не вызывает сомнений, что в проекции на плоскость солнечного экватора они действительно должны быть искривлены и иметь конфигурацию, напоминающую спиральные рукава галактик. При наблюдениях в плоскости эклиптики (с Земли или, например, с ИСЗ SOHO) искривление лучей не обнаруживается в чистом виде, но оно должно быть хорошо видно при наблюдениях с высоких гелиографических широт над Солнцем. Пока единственная потенциальная возможность увидеть корональные лучи с высоких широт была связана с миссией “Ulyssis”, однако этот шанс не был использован.

3. СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ НАД ФОТОСФЕРОЙ

В 1955 г. Атей и Робертс (США) на основании результатов наблюдений затмения 1952 г. высказали



Рис. 2. Затмение 10 июля 1972 г. на Чукотке. Группа лаборатории солнечной активности ИЗМИРАН. Сидят: Г.М. Никольский, Ю.В. Платов, Н.С. Шилова. Стоят: А.К. Кишонков, Ю.Д. Жугжда, И.С. Ким, М.М. Молоденский, Р.А. Гуляев, А.К. Айманов, Р.Т. Третьякова.

предположение, что корональное излучение возникает уже в межспиккулярных областях хромосферы [Athay and Roberts, 1955]. Во время затмения 1970 г.

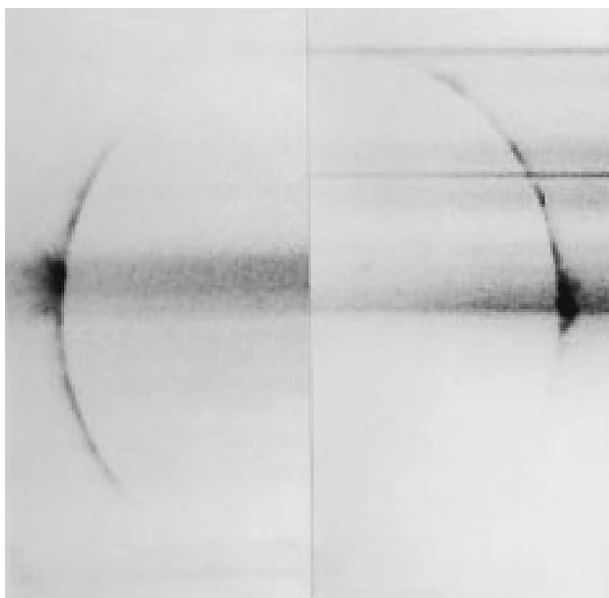


Рис. 3. Бесщелевая спектрограмма короны с линией Fe X λ 6374 Å. Изображение составлено из двух снимков, относящихся соответственно к восточному и западному лимбу Солнца.

японские исследователи поставили специальный эксперимент по изучению поведения корональных линий 5303 и 6374 Å (*E*-корона) на близких расстояниях от лимба Солнца. Было показано, что интегральная интенсивность обеих линий растет с приближением к лимбу вплоть до расстояния ~1000 км [Kanno et al., 1971]. Вывод японских наблюдателей был основан на измерениях в двух участках над лимбом Солнца. Для детального исследования распределения яркости *E*-короны на очень близких расстояниях от лимба Р.А. Гуляевым к затмению 30 июня 1973 г. была подготовлена программа кинематографических наблюдений бесщелевого спектра короны с линией λ 6374 Å.

Небольшая группа ИЗМИРАН (Р.А. Гуляев, А.К. Кишонков, Ю.В. Платов) в составе объединенной экспедиции Академии наук СССР провела наблюдения вблизи городка Атар в Мавритании. Спектрограммы, полученные Р.А. Гуляевым (см. рис. 3), позволили измерить ход интенсивности в 17-ти участках вокруг всего лимба. Результаты обработки полностью подтвердили выводы японских исследователей: показано, что в интервале высот от ~50 тыс. км до, по крайней мере, 3 тыс. км интенсивность линии 6374 Å растет по экспоненте с приближением к лимбу. И такое поведение прослеживается *всегда*, независимо от гелиографической широты, абсолютной яркости и морфологических особенностей конкретной области на лимбе Солнца [Гуляев и Айманов, 1978].

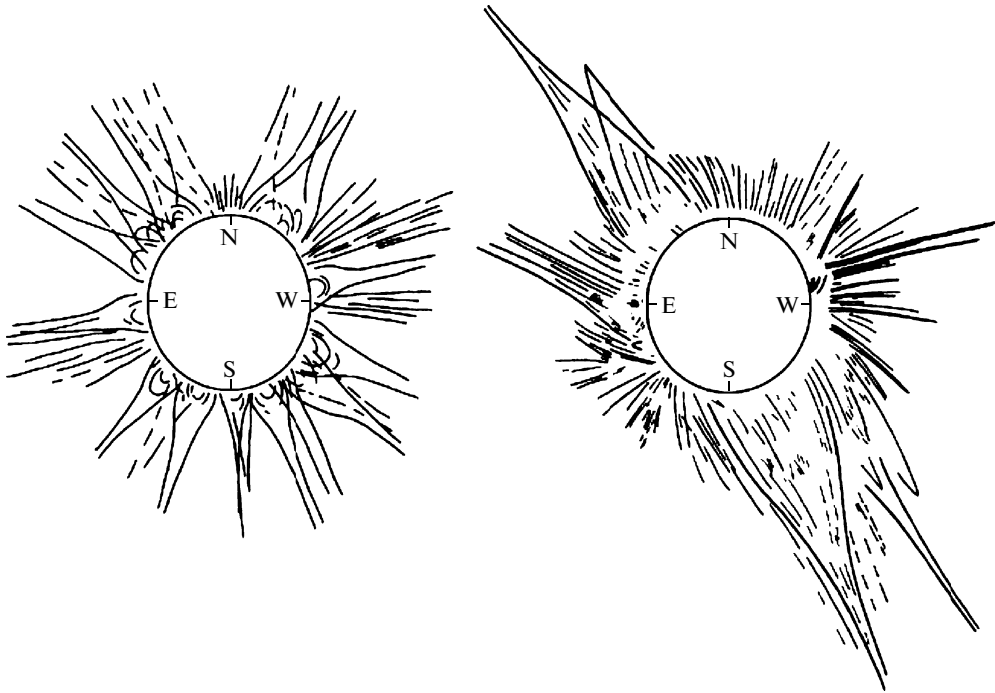


Рис. 4. Структурные рисунки короны 11 июля 1991 г. Слева – прогноз, справа – реально наблюдавшаяся корона.

В середине 60-х годов прошлого столетия С.Б. Пикельнер высказал предположение, позволившее решить проблему генерации магнитотормозного см-радиоизлучения над солнечными пятнами: вероятно, над пятнами корона начинается не на высотах >10 тыс. км, как было принято считать в то время, а гораздо ниже, на высоте ~ 2000 км [Лившиц и др., 1966]. Затменные наблюдения 1970–1973 гг. показали, что корона начинается на такой высоте *не только над пятнами, но везде*. Иными словами, мы имеем дело с общим, фундаментальным свойством солнечной атмосферы: повсюду корональная материя заполняет пространство между спикулами вплоть до очень глубоких (2–3 тыс. км) слоев хромосферы. Видимая же картина хромосферы создается совокупностью спикул, пронизывающих корональную плазму.

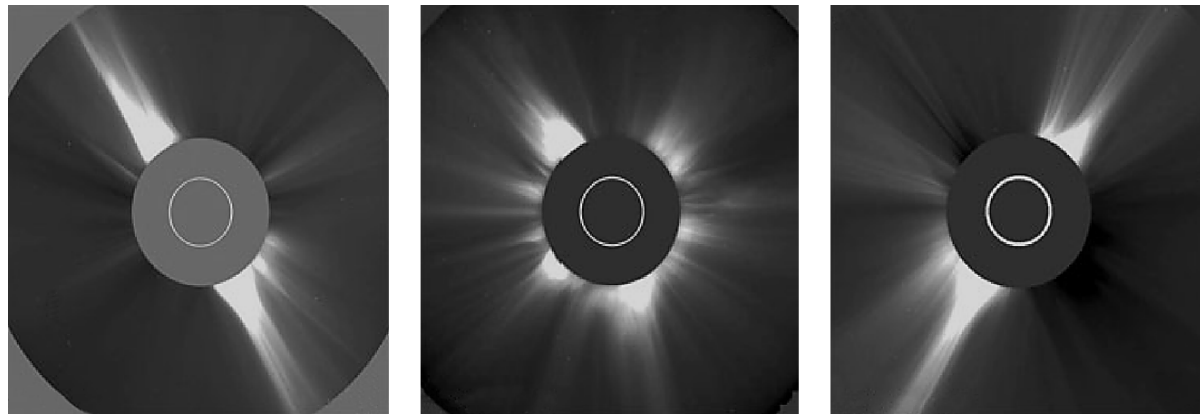
4. КОНЦЕПЦИЯ “ПЛОСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ”

Для наблюдений затмения 11 июля 1991 г. Академия наук СССР организовала экспедицию в Мексику. Руководство объединенной экспедицией АН СССР взял на себя академик В.В. Мигулин. ИЗМИРАН был представлен сотрудниками лаборатории солнечной активности: Н.Я. Ванярха, Р.А. Гуляев, В.Ю. Клепиков, Ю.В. Платов, Б.П. Филиппов. Фактически в группу ИЗМИРАН входил и В.В. Мигулин.

Затмение 1991 г. сыграло выдающуюся роль в стимулировании исследований структуры и эволюции внешней солнечной короны. Корона во время затмения имела совершенно необычную форму: вместо ожидавшейся короны “максимального” типа наблюдателям предстала картина, напоминающая корону эпохи минимума солнечной активности, но сильно наклоненную относительно плоскости солнечного экватора. На рис. 4 слева показан прогноз структуры короны на 11 июля 1991 г., составленный на Горной астрономической станции, справа – структурный рисунок реальной короны по наблюдениям Б.П. Филиппова и Р.А. Гуляева. Как видим, между двумя изображениями нет ничего общего. Таким образом, выявилась несостоятельность (или недостаточность) классической схемы эволюции короны в 11-летнем цикле.

В то же время, затмение 1991 г. предоставило возможность прямого сопоставления структуры внешней короны с ориентацией гелиосферного токового слоя. В 1974 г. Свалгард высказал предположение о том, что совокупность стримеров образует замкнутый пояс вокруг Солнца, и этот пояс является основанием гелиосферного токового слоя [Svalgaard et al., 1974]. Наблюдения затмения 1991 г. дали прямое экспериментальное подтверждение тождественности пояса корональных лучей с основанием гелиосферного слоя [Гуляев и Филиппов, 1992] (см. также [Saito et al., 1993]).

В результате анализа структуры короны 1991 г., а также других затменных и внезатменных матери-



13.01.2003 г.

20.01.2003 г.

27.01.2003 г.

Рис. 5. Снимки короны, полученные с прибором LASCO-2 на космической станции SOHO с интервалом в 1/4 оборота Солнца.

лов в ИЗМИРАНе была сформулирована концепция “плоской солнечной короны”: в течение большей части цикла солнечной активности корона в трехмерном пространстве имеет более или менее уплощенную форму, примерно как в минимуме цикла, но при этом наклон короны к плоскости солнечного экватора меняется с фазой 11-летнего цикла. Наблюдаемое же многообразие корональных форм обусловлено изменениями ориентации “плоской” короны по отношению к Земле при вращении Солнца вокруг своей оси [Гуляев, 1992; Gulyaev, 1992]. Это подтверждают снимки короны, получаемые на станции SOHO. Для примера на рис. 5 представлены три снимка короны, полученные на станции SOHO с интервалом в 1/4 оборота Солнца. Отметим, что почти одновременно с нами к выводу о “плоской короне” пришел словацкий астроном Ю. Сикора [Сикора и др., 2000]. Следующее приближение для 3D-формы короны – гиперболический параболоид [Gulyaev, 1994].

5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О КОРОНАЛЬНЫХ ЛУЧАХ КАК ВИДИМЫХ С РЕБРА СКЛАДКАХ ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Неоднократно разными авторами высказывалось предположение о том, что наблюдаемые корональные лучи (может быть, некоторые из них) не являются реальными (физическими) элементами структуры ГТС, а представляют собой лишь складки гелиосферного слоя, ориентированные ребром к наблюдателю (см., например, [Коржов, 1978; Eddy, 1973; Svalgaard et al., 1974; Gulyaev and Vanyarkha, 1992]). Хотя такое представление и не получило широкого признания, его активно развивал М.М. Молоденский (см. [Кучми и др., 1994]). Во время затмения 3 ноября 1994 г. в Бразилии М.М. Молоденский вместе с Л.И. Старковой провел специальные наблюдения для проверки адекватности развиваемого

представления. Поверхность $Br=0$ (равенство нулю радиальной составляющей коронального магнитного поля) на день затмения была рассчитана по данным о расположении волокон на диске Солнца. По результатам наблюдений затмения был построен структурный рисунок короны и получено распределение степени поляризации коронального излучения. Сопоставление структурного рисунка с рассчитанной конфигурацией поверхности $Br=0$ показало, что три наиболее протяженных корональных луча располагаются в местах больших складок поверхности $Br=0$. Сказанное иллюстрирует рис. 6, составленный по материалам М.М. Молоденского [Кучми и др., 1997]. Все же совокупность имеющихся сейчас наблюдательных данных по корональным стримерам указывает на то, что в большинстве случаев мы имеем дело с реальными структурными образованиями внешней солнечной короны. Что касается построений М.М. Молоденского, то они, конечно же, действуют, но играют вторичную роль.

6. ОБНАРУЖЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СУБЛИМАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЫЛИ

Известно, что рассеяние солнечного света на пылевых частицах в межпланетном пространстве порождает явления F -короны и зодиакального света. Из-за особенностей дифракционного рассеяния на пылевых частицах (сильно вытянутая индикатриса рассеяния) внутренняя часть межпланетного пылевого облака ($r < 20 R_{\odot}$) недоступна для прямых наблюдений в видимой области спектра. Но есть нетривиальные возможности исследования указанной области. Прежде всего, это регистрация собственного теплового излучения нагретой пыли в инфракрасном (2–5 мкм) диапазоне (T -корона).

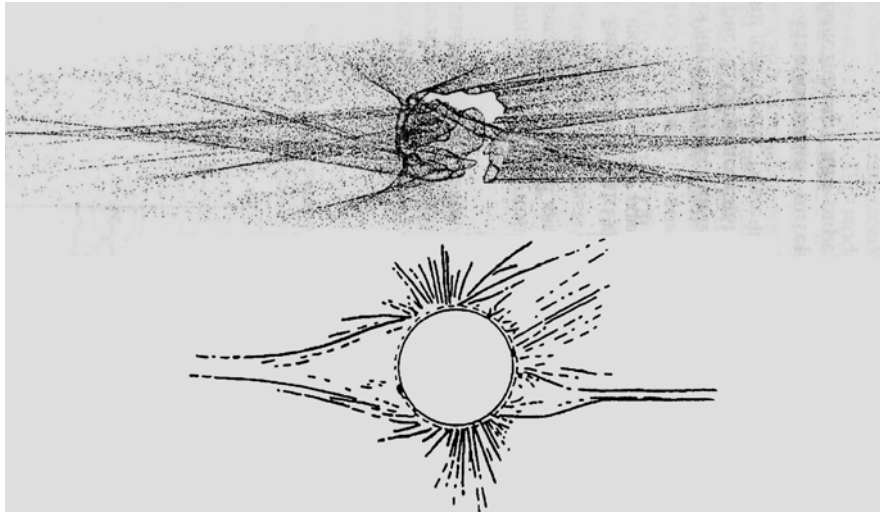


Рис. 6. Сопоставление конфигурации гелиосферного слоя со структурой короны по М.М. Молоденскому. Вверху – рассчитанное изображение поверхности $Br = 0$, внизу – структурный рисунок реальной короны 3 ноября 1994 г.

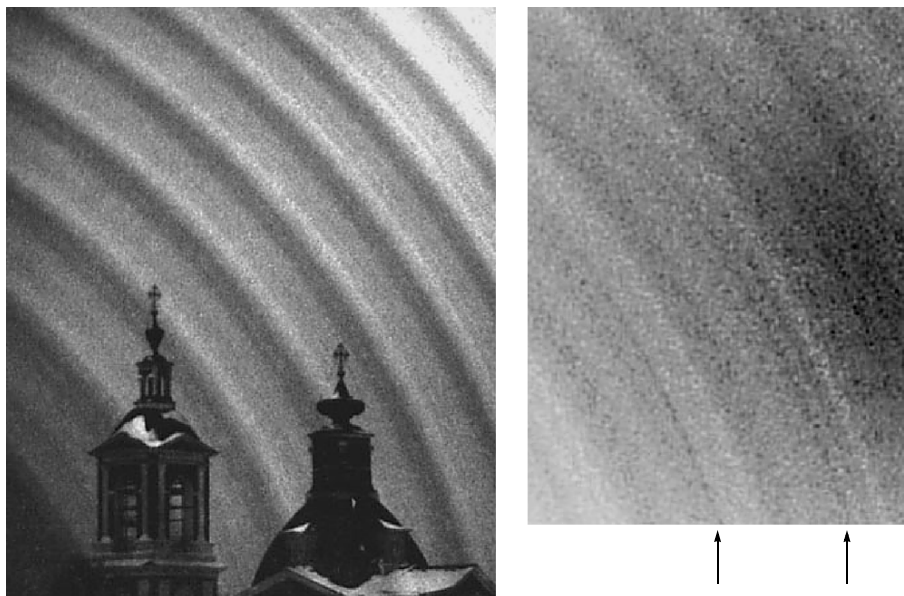


Рис. 7. Интерферограммы свечения неба в области линии K Ca II. Слева – снимок свечения дневного неба вне затмения; справа – негативный фрагмент снимка свечения неба во время затмения 28 февраля 1998 г. Стрелками показаны два эмиссионных образования, относящихся к искомому свечению Ca II.

Другая возможность – регистрация резонансного излучения атомов и низкозарядных ионов, освобождающихся в процессе сублимации частиц твердого вещества [Шестакова, 1990]. Это направление стало развиваться лишь в конце XX века благодаря усилиям ГАИШ МГУ и ИЗМИРАН.

Наиболее эффективный инструмент для поиска искомых эмиссий – интерферометр Фабри-Перо, позволяющий одновременно исследовать как спектральные свойства эмиссий, так и пространственное распределение областей излучения. П.В. Щеглов

(ГАИШ) разработал и изготовил портативную интерферометрическую установку для поиска резонансных эмиссий Ca II во время полных солнечных затмений. Во время затмения 26 февраля 1998 г. на ове Гваделупа нам удалось впервые провести успешные наблюдения с этим прибором [Гуляев и Щеглов, 1999]. Анализ затменной интерферограммы показал следующее. Все поле зрения покрыто интерференционными полосами, вызванными рассеянием в земной атмосфере солнечного света из области полутени. На этом фоне присутствуют тонкие эмиссионные детали в виде фрагментов интерференцион-

ных колец, соответствующих линии $K\text{Ca II}$ с доплеровским смещением от 2.2 до 3.7 Å. Такие смещения соответствуют лучевой скорости от 170 до 280 км/с, что близко к кеплеровским скоростям орбитального движения на рассматриваемых гелиоцентрических расстояниях (от 5 до 20 R_{\odot}). На рис. 7 слева представлен снимок свечения дневного неба в резонансных линиях CaII , справа — фрагмент снимка свечения неба во время затмения 1998 г. (негатив). Стрелками показаны два эмиссионных образования, относящихся к искомому свечению Ca II .

Наличие больших доплеровских смещений является аргументом в пользу того, что выявленные спектральные образования представляют собой искомые эмиссии, связанные с сублимацией движущейся пыли. Таким образом, можно констатировать обнаружение новой составляющей излучения солнечной короны (наряду с уже известными K -, E -, F - и T -составляющими). Мы предложили назвать ее S -короной (от слова *sublimation*) [Гуляев и Щеглов, 2001]. Новые наблюдения во время затмений 1999, 2006 и 2008 гг. подтвердили результаты 1998 г.

Важный результат наблюдений затмений 1998–2008 гг.: сублимационное свечение кальция (S -короны) не распределено изотропно вокруг Солнца, а локализовано в отдельных, более или менее компактных областях. Это свидетельствует о значительной неоднородности межпланетного пылевого облака. По-видимому, на гелиоцентрических расстояниях меньше $\sim 20 R_{\odot}$ однородно распределенная пыль (внутренняя часть зодиакального пылевого облака) практически отсутствует. Вместо этого наблюдаются дискретные спорадические образования (скопления пыли и/или и крупных фрагментов твердого вещества), возможно, связанные с потоками метеороидов и кометами типа *sungrazing*. По результатам наблюдений затмения 1998 г. были получены оценки количества атомов кальция и, затем, общего количества вещества, подвергнувшегося сублимации в отдельно взятой дискретной области. Характерное значение общей массы вещества составило $\leq 10^9$ г (1000 т). Если рассматривать сублимирующее родительское тело как одиночный камень с плотностью 5 г/см³, то диаметр такого камня составит ≤ 6 м [Gulyaev and Petrov, 2003].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе отражены наиболее существенные моменты исследований солнечной короны по наблюдениям затмений. Но предметом наблюдений во время затмений была не только корона, но и другие объекты: верхняя фотосфера, хромосфера, протуберанцы. Всего за период с 1945 по 2009 г. сотрудники ИЗМИРАН участвовали в 24-х экспедициях по наблюдению затмений. Информацию о затменных наблюдениях, не отражен-

ных в настоящем обзоре, можно найти на веб-сайте ИЗМИРАН: <http://www.izmiran.ru/projects/eclipses/>.

В течение 100 лет, начиная с середины XIX века, наблюдения затмений оставались единственным источником информации о солнечной короне. С развитием внеатмосферной астрономии ситуация кардинально изменилась. Тем не менее, как показывает опыт наблюдений последних лет, возможности использования затменных наблюдений для изучения солнечной короны еще далеко не исчерпаны. Например, есть вопросы по непрерывному излучению внутренней короны, недоступному для внезатменных наблюдений даже с космических аппаратов. Остается широкое поле деятельности в плане изучения процессов сублимации твердого вещества в ближнем околосолнечном пространстве. Есть и другие задачи.

Работа поддержана грантами РФФИ 09-02-00080, 09-02-92656.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Всехсвятский С.К., Никольский Г.М. Структура солнечной короны 30 июня 1954 года // Астрон. журн. Т. 32. № 4. С. 354–358. 1955.
- Гиц И.Д. О поляризации в корональных лучах // Астрон. журн. Т. 38. № 3. С. 474–477. 1961.
- Гуляев Р.А. Внешняя солнечная корона как оптическое проявление гелиосферного токового слоя // Успехи физ. наук. Т. 162. № 12. С. 155–159. 1992.
- Гуляев Р.А., Айманов Г.К. Распределение яркости корональной линии $\lambda 6374$ и непрерывного спектра вблизи лимба по наблюдениям во время затмения 30 июня 1973 г. // Солнечные данные. № 11. С. 80–86. 1978.
- Гуляев Р.А., Филиппов Б.П. Структура солнечной короны и гелиосферный токовый слой // Докл. АН СССР. Т. 322. № 2. С. 268–271. 1992.
- Гуляев Р.А., Щеглов П.В. Эмиссионные образования в F -короны // Докл. РАН Т. 366. № 2. С. 199–201. 1999.
- Гуляев Р.А., Щеглов П.В. Наблюдения резонансного свечения атомов в областях сублимации твердого вещества в ближнем околосолнечном пространстве // Успехи физ. наук. Т. 171. № 2. С. 217–219. 2001.
- Коржов Н.П. Трехмерная структура межпланетного магнитного поля // Астрон. журн. Т. 55. № 1. С. 96–106. 1978.
- Кучми С., Молоденский М.М., Виал Ж.-К. О трехмерной структуре корональных лучей // Астрон. журн. Т. 71. № 4. С. 925–929. 1994.
- Кучми С., Молоденский М.М., Старкова Л.И., Кутвицкий В.А., Ершов А.В., Мацура О. Гелиосферный слой и структура короны 3.11.1994 г. // Письма в Астрон. журн. Т. 23. № 12. С. 939–948. 1997.
- Лившиц М.А., Обридко В.Н., Пикельнер С.Б. Радиоизлучение и строение атмосферы над пятнами // Астрон. журн. Т. 43. № 6. С. 1135–1142. 1966.

- Сикора Ю., Бадалян О.Г., Лившиц М.А., Обридко В.Н. Солнечная корона по наблюдениям полных солнечных затмений 1973–1999 гг. // Изв. РАН, сер. физ. Т. 64. № 9. С. 1817–1822. 2000.
- Шестакова Л.И. Существует ли область резонансного свечения атомов и ионов вокруг Солнца? // Письма в Астрон. журн. Т. 16. № 6. С. 550–559. 1990.
- Athay R.G., Roberts W.O. Coronal line intensities at the Khartoum eclipse // *Astrophys. J.* V. 121. № 1. P. 231–240. 1955.
- Baumbach S. Strahlung, Ergiebigkeit und Elektronendichte der Sonnenkorona // *Astron. Nachrichten.* B. 263. № 6294. S. 121–134. 1937.
- Eddy J.A. Observation of a possible neutral sheet in the corona // *Solar Phys.* V. 30. № 2. P. 385–394. 1973.
- Gulyaev R.A. The solar corona: flat formation. // *Solar Phys.* V. 142. № 1. P. 213–216. 1992.
- Gulyaev R.A. The solar corona as a quadric surface in three-dimensional space // *Astrophys. J.* V. 437. № 2. P. 867–869. 1994.
- Gulyaev R.A., Petrov N.I. Brightness of calcium emission regions associated with the solid material sublimation in the near circumsolar space // *Astron. Astrophys. Transactions.* V. 22. № 4–5. P. 617–620. 2003.
- Gulyaev R.A., Vanyarkha N.Ya. Regularities of variation of the heliospheric current sheet orientation during the solar activity cycle // *Solar Phys.* V. 140. № 2. P. 369–378. 1992.
- Kanno M., Tsubaki T., Kurokawa H. On the coronal lines in the chromosphere at the 1970 eclipse // *Solar Phys.* V. 21. № 2. P. 314–324. 1971.
- Nikolsky G.M., Sazanov A.A., Kishonkov A.K. The polarization of the inner solar corona at the eclipse of 10 July 1972 // *Solar Phys.* V. 53. № 1. P. 79–96. 1977.
- Saito T., Akasofu S.-I., Kozuka Y., Takahashi T., Numazawa S. The solar coronal sheet during the period of sunspot maximum // *J. Geophys. Res.* V. 98. № A4. P. 5639–5644. 1993.
- Svalgaard L., Wilcox J.M., Duvall T.L. A model combining the polar and the sector structured solar magnetic fields // *Solar Phys.* V. 37. № 1. P. 157–172. 1974.
- Waldmeier M. Die Sonnenkorona vom 28. Juli 1851 // *Zs. Astrophysik.* B. 30. № 1. S. 1–7. 1951.