

Л.И.ШЕСТАКОВА, Б.И.ДЕМЧЕНКО, Ф.К.РСПАЕВ,
Г.С.МИНАСЯНЦ, А.И.ДУБОВИЦКИЙ

НАБЛЮДЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ПЫЛИ В F-КОРОНЕ ВО ВРЕМЯ ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 1.08.2008

В России, к западу от Барнаула проведены интерферометрические наблюдения внешней короны Солнца на расстояниях от 3 до 10 солнечных радиусов. По доплеровским смещениям линий поглощения вблизи линии $MgI \lambda 5184$ Е получено поле лучевых скоростей пыли в F-короне. В распределении наблюдаемых лучевых скоростей уверенно обнаруживается восточно-западная симметрия, соответствующая прямому кеплеровскому движению пылевых частиц.

Введение. Постановка задачи. Впервые задача наблюдения поля лучевых скоростей пыли во внешней короне Солнца была поставлена и реализована во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 года [1]. Объединенная экспедиция, в

состав которой входили ученые МГУ и Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова располагалась в п. Шортанды Целиноградской области.

На тот момент казалось, что выполнение подобных задач в принципе невозможно. Во-пер-

вых, из-за необходимости высокого спектрального разрешения ($0.5 - 1.0 E$) при кратковременности полной фазы затмения. Во-вторых, из-за существовавших тогда теоретических представлениях о частицах Зодиакального пылевого облака, как скоплении крупных частиц со средними размерами порядка 30 мкм . Если предположить, что подобные частицы существуют и в F-короне, то преобладающий вклад в суммарный результат на луче зрения должны давать пылевые частицы, расположенные ближе к Земле, чем к Солнцу. В - третьих, были большие опасения, что спектральный состав рассеянного света земной атмосферы во время затмения подобен солнечному, как и спектр рассеянного света межпланетной пыли. Более того, на элонгациях, превышающих 4 солнечных радиуса, яркость атмосферного фона превосходит яркость короны, и наблюдения более внешних частей короны теряют смысл.

В дальнейшем выяснилось, что размеры пылевых частиц в короне гораздо меньше частиц зодиакального облака. Кроме того, оказалось, что спектральный состав атмосферного фона не имеет аналогичных несмещенных линий, поскольку в нем преобладает непрерывный спектр, идентичный спектру яркой K-короны [1,2].

Таким образом, наши наблюдения солнечного затмения 31 июля 1981 года оказались успешными, благодаря применению интерферометра Фабри – Перо и коронографа с экранированием яркой короны, а также приемника высокой чувствительности. В результате было показано, что детальные спектральные наблюдения пылевой короны до больших расстояний от Солнца ($\sim 7R_c$, где R_c – радиус Солнца) все-таки возможны. В 1991 году 11 июля в Мексике проведена повторная попытка аналогичных наблюдений, но менее успешная, продвинуться дальше в область внешней короны не удалось [3,4]. После большого перерыва, успешные наблюдения поля лучевых скоростей при отличных погодных условиях проведены вновь в Казахстане вблизи п. Мугалжар Актюбинской области во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 года [5,6].

Обстоятельства затмения 2008 г. Наблюдения проводились в п. «Энергетик» немного к западу от центра полосы и от г. Барнаула. Геодезические координаты места наблюдения: $\phi = 53^\circ 18'$, $\lambda = 83^\circ 36'$, разность с всемирным временем в

месте наблюдения составляет 7 часов. Согласно нашим расчетам, начало полной фазы затмения по всемирному времени, или время наступления 2-го контакта $T_2 = 10^h 47^m 26^s$, продолжительность полной фазы составила $2^m 11^s$ или 131 секунду при высоте Солнца над горизонтом $29^\circ,5$. В день затмения с утра было пасмурно, но к моменту затмения небо практически очистилось от облаков.

Аппаратура и наблюдения. Использовался коронограф со светосилой 100:1000, фокальная плоскость которого совмещена с плоской поверхностью линзы поля, на которой проектируется первичное изображение объекта. Зеркальная искусственная луна, нанесенная с помощью вакуумного напыления на линзу поля (100:300), закрывает внутреннюю корону до $2.6R_c$. Этalon Фабри Перо и интерференционный фильтр помещены в параллельных пучках вблизи выходного зрачка телескопа, расположенного сразу после коллиматорной линзы (100:300), фокальная плоскость которой совмещена с плоской поверхностью линзы поля. Использовался интерференционный фильтр полушириной $20 E$ с максимумом пропускания на $l \approx 5202 E$. Спектр, который воспроизводится с помощью эталона Фабри – Перо имеет форму концентрических колец, длина волны спектральных линий-колец убывает с ростом радиуса кольца. Толщина разделителя эталона Фабри-Перо равна 70 мкм . Соответствующий толщине этого разделителя аппаратный профиль $\delta\lambda_{1/2} \approx 1E$. Камерный объектив – «Гелиос-40» (56:85). В качестве приемника изображения использована CCD – матрица Apogee Alta-10 с размером пикселя 14 мкм . Поскольку продолжительность полной фазы затмения 1.08.2008 меньше, чем затмения 29.03.2006 примерно на 30%, мы были вынуждены воспользоваться процедурой бинирования, которая позволяет увеличить чувствительность матрицы за счет объединения 4-х пикселей в один. При бинировании 2×2 , эффективный размер пикселя составил 28 мкм . Диаметр поля зрения превысил 5° , что позволило получить информацию о лучевых скоростях пыли во внешней короне Солнца до расстояний $\sim 10R_c$.

В результате наблюдений получены интерферограммы, которые имеют вид концентрических колец, представляющих собой линии поглощения солнечного спектра вблизи зеленой линии Mg I $\lambda 5184 E$. Положение Солнца совмещено с центром колец.

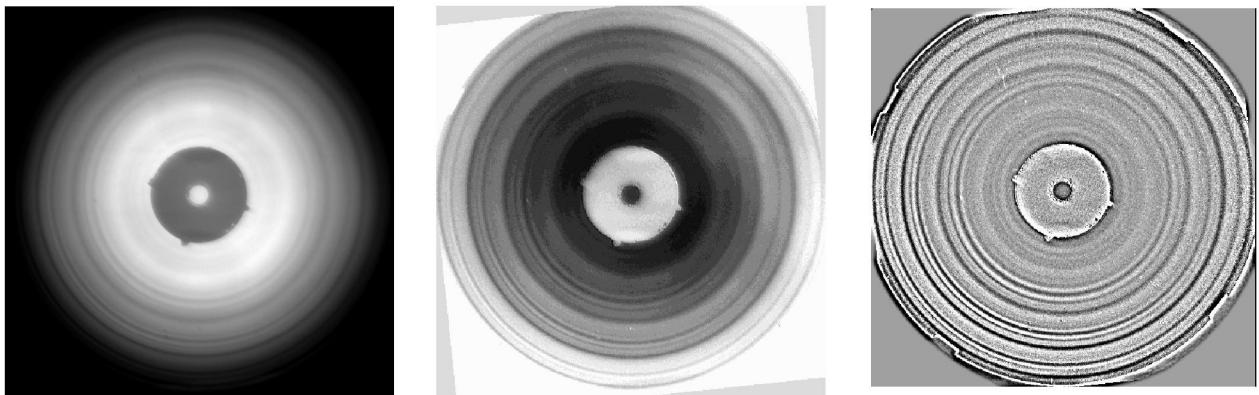


Рис. 1. Снимок дневного неба на разных этапах обработки, слева направо: исходный кадр, кадр с учетом функции поля и кадр, подготовленный для обработки методом корреляций.

Измеряя радиус кольца в каждой точке поля зрения, можно определить длину волны и, следовательно, доплеровскую скорость пыли на луче зрения. Чтобы получить доплеровские смещения линий, удобно использовать идентичные снимки рассеянного света дневного неба, содержащие те же линии с нулевым смещением. Лучше всего такие снимки сравнения сделать до и сразу после полной фазы затмения, не меняя положение телескопа.

Во время полной фазы получена серия снимков с экспозициями 100, 15, 2 и 1 секунда. На первом и втором кадре, содержится информация о лучевых скоростях пыли в F-короне. Основная информация о лучевых скоростях пыли в F-короне получена после суммирования 1-го и 2-го кадров. Третий кадр не использован в обработке, так как большая часть этого кадра содержит только шумовую компоненту. На четвертом кадре, полученном в конце полной фазы, зарегистрированы эмиссионные кольца и едва различимы слабые линии поглощения. По-видимому, как и в 2006 году эмиссионные кольца образованы рассеянным в оптике светом зеленой корональной линии $\lambda 5303\text{E}$. По окончании полной фазы было сделано несколько снимков неба. Для обработки выбран лучший из них (без бликов от близкого Солнца), сделанный через 7 минут после окончания полной фазы затмения. Положение центра интерференционных колец «затменных» снимков получено по 3-м кольцам эмиссионной линии $\lambda 5303\text{E}$, проявившейся на 4-м кадре. Смещение центра интерференционных колец для снимка дневного неба определялось отдельно и учиты-

валось в обработке. В обработку включен также снимок непрерывного спектра лампы накаливания, полученный сразу после окончания полной фазы, он использован в качестве функции поля. Аппаратный профиль $\delta\lambda_{1/2} = 1\text{E} \pm 0.1\text{E}$ определен по эмиссионным линиям $\lambda 5303\text{E}$.

Обработка наблюдений. Материалы затмения 01.08.2008 обработаны с помощью специально составленного блока программ, включающего в себя несколько этапов:

1. После вычета темновых снимков, выполнено исключение «горячих» и «холодных» пикселей с помощью нелинейного кругового медианного фильтра.

2. Учет функции поля. В качестве функции поля использован снимок рассеянного света от лампы накаливания, полученный сразу после полной фазы затмения. Интенсивности всех кадров, выбранных для обработки, включая снимок дневного неба, делятся на интенсивности кадра, взятого в качестве функции поля.

3. Устранение двумерного тренда, или дополнительное выравнивание поля, с использованием линейного кругового фильтра типа «скользящее среднее». Фильтр применяется итеративно до достижения нужной степени сглаживания. Результатом этой обработки является разность $I(x,y) = F(x,y) - F_0(x,y)$, где $F_0(x,y)$ – функция тренда, полученная сглаживанием исходного кадра $F(x,y)$.

4. Фильтрация шумов двумерным фильтром – гауссианой с $\sigma = 1.3$ пикселя, что согласуется с полушириной аппаратного профиля. Этот фильтр устраняет высокочастотную составляющую

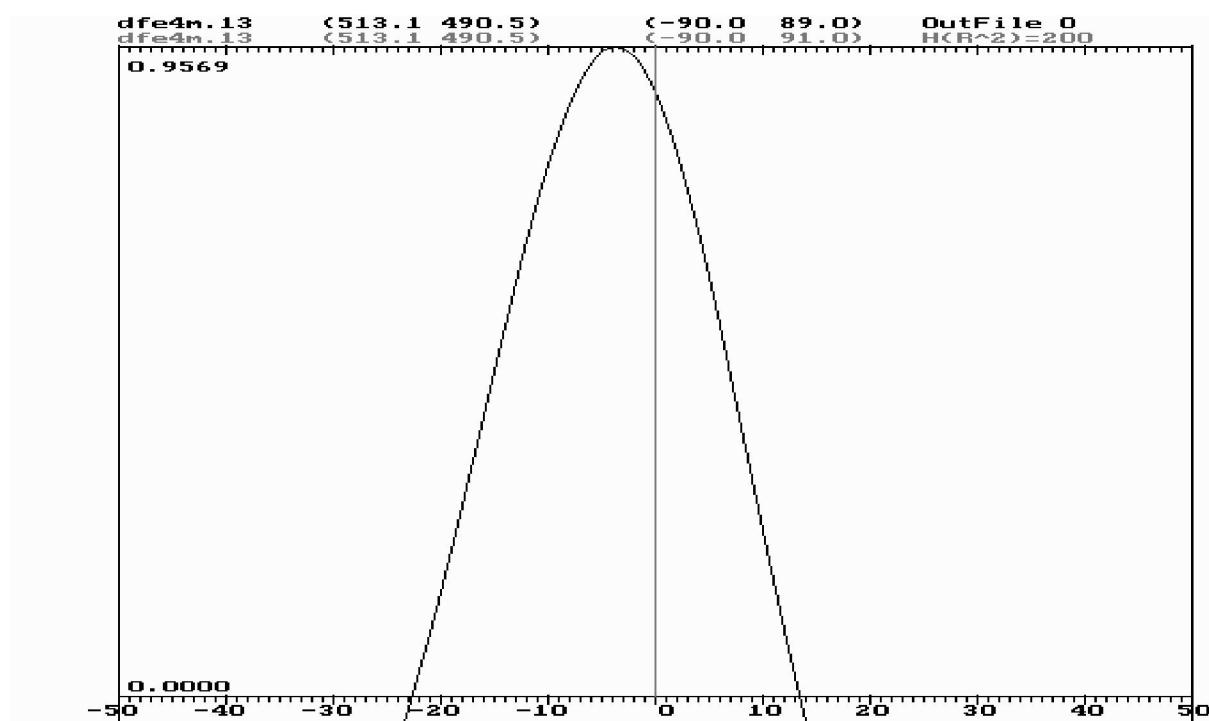


Рис. 2. Корреляционная функция правой и левой половин четвертого кадра, на котором обнаружены эмиссионные кольца. По оси « x » - смещение в единицах $\langle r^2 \rangle$, цена деления 200 единиц. Координата x_0 центра специально смешена на 1 пиксель (задано $x_0 = 513.1$ вместо точного значения $x_0 = 514.1$), вызвавшее сдвиг корреляционной функции на 4 деления влево

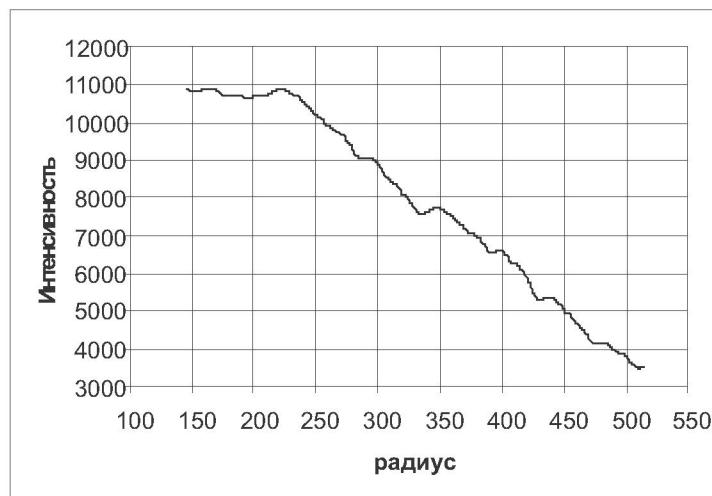


Рис. 3. Исходный спектр дневного неба. Интенсивность дана в отсчетах с приемника CCD в зависимости от радиуса в пикселях. Соответствует 1-му изображению рисунка 1

шума, но не может привести к существенной потере полезной информации.

В результате получен качественный спектр, пригодный для обработки методом корреляций со снимком дневного неба, предварительно обработанным подобным же образом (рис.1).

Полный алгоритм обработки оказался на удивление эффективным, позволяющим из за-

шумленных кадров выделить исходный спектр. Полученный спектр после разбиения на участки, содержащие линии поглощения, путем корреляций с аналогичными участками спектра дневного неба, позволяет получить доплеровские смещения в каждом участке спектра с высокой точностью. Координаты центра интерференционных колец легко определяются методом корре-

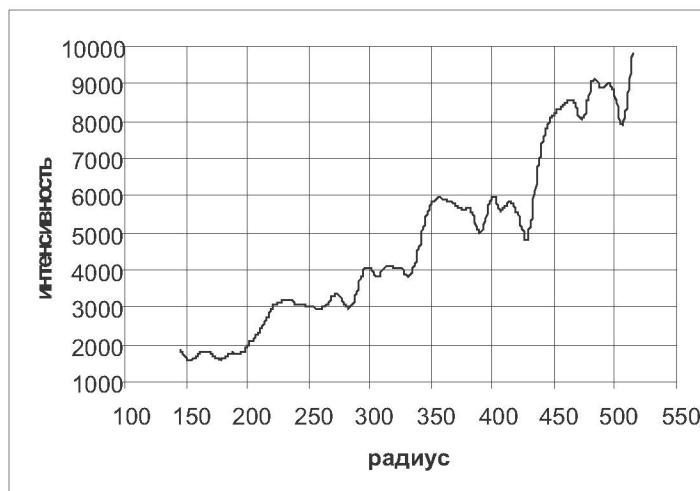


Рис. 4. Спектр дневного неба после деления на функцию поля. Интенсивность дана в условных единицах. Соответствует 2-му изображению рисунка 1

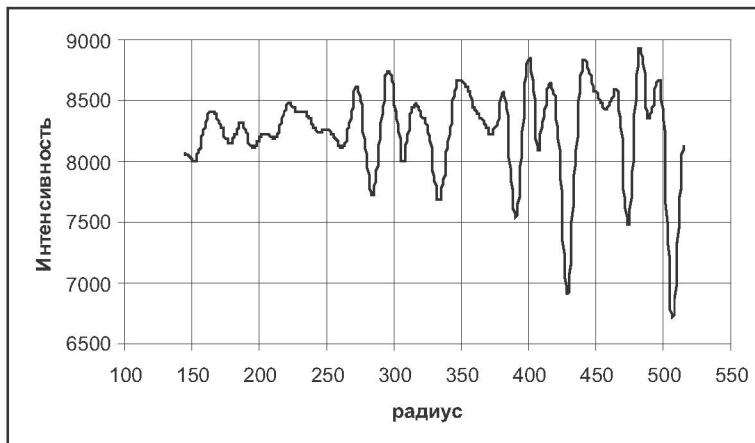


Рис. 5. Исправленный спектр дневного неба после устранения двумерного тренда и фильтрации шумов. Интенсивность дана в условных единицах. Соответствует 3-му изображению рисунка 1

ляций: правой и левой половин кадра для оси « x » (рис.2) и верхней и нижней половин для оси y . Числовые массивы файлов после определения центров представлены в полярных координатах (r, φ) и затем в (r^2, φ) . Такая процедура удобна для обработки спектров, поскольку для эталона Фабри-Перо длина волны $\lambda \sim r^2$.

На рисунках 3-5 представлены спектры дневного неба для трех главных стадий обработки, соответствующих рисунку 1. На рисунке 3 линии поглощения в спектре едва заметны, на 4-м рисунке они стали более рельефными, а на 5-м рисунке спектр подготовлен для поиска доплеровских смещений спектральных линий методом корреляций со спектрами, полученными во время полного солнечного затмения.

На рисунке 6 представлены снимки околосолнечной области, сделанные в начале (100 сек) и в конце (1 сек) полной фазы затмения. На первом снимке содержится основная информация о лучевых скоростях пыли в области около Солнца. Последний снимок играет важную служебную роль. По кольцам эмиссионной линии этого снимка определен центр интерференционной картины всех остальных снимков, полученных во время затмения. Исправленные спектры этих снимков представлены на рисунках 7 и 8.

Результаты обработки наблюдений. Обработка проведена в полярной системе координат усреднением радиальных разрезов по секторам в пределах $\pm 10^\circ$ от центрального направления. Сделано 36 радиальных разрезов с интервалом

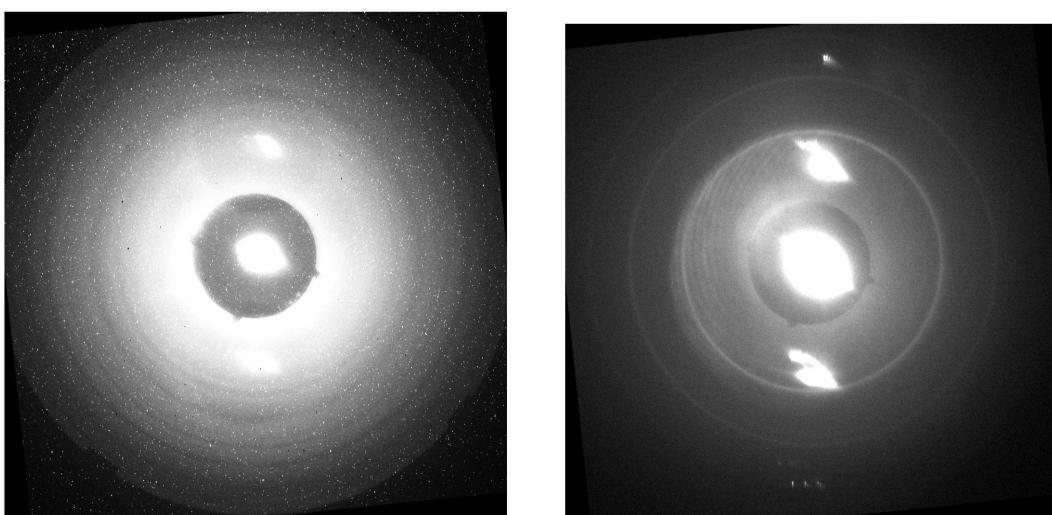


Рис. 6. Исходные интерферограммы околосолнечной области, полученные во время полного солнечного затмения 01.08.2008 в Барнауле. Солнце в центре за экраном.

На первом снимке (эксп. 100 секунд) виден спектр пылевой F-короны в виде колец.
На втором снимке (эксп. 1 секунда) видны эмиссионные кольца от рассеянного света внутренней короны.



Рис. 7. Исправленный спектр 100-сек. интерферограммы околосолнечной области (1-й на рис.6), подготовленный для определения доплеровских смещений путем сравнения корреляционным методом со спектром дневного неба (рис.5).

10°. Нумерация позиционных углов начинается от северного полюса эклиптики против часовой стрелки. Восточное направление соответствует 90°, западное - 270°. Общий объем измерений составляет 9 участков спектра, соответствующих разным расстояниям от Солнца, вдоль каждого из 36 радиальных направлений.

На рисунке 9 представлены средние значения измеренных лучевых скоростей в зависимости от расстояния до Солнца для всех направлений (средняя кривая) и для западной и восточной по-

ловин кадра (верхняя и нижняя кривая). Очевидно, что различие запад-восток можно объяснить орбитальным движением пыли в направлении, соответствующем направлению движения планет вокруг Солнца. Об этом же свидетельствует поведение кривой на рисунке 10.

Если в распределении пыли в пространстве отсутствуют сильные центральные асимметрии относительно Солнца, то все возможные скорости, соответствующие орбитальному движению пыли вокруг Солнца, при полном усреднении по



Рис. 8. Исправленный спектр последнего 1-сек. снимка (2-й на рис.6) , полученного в конце полной фазы затмения.
Хорошо видны три спектральных порядка линии FeXIV $\lambda 5303\text{\AA}$.

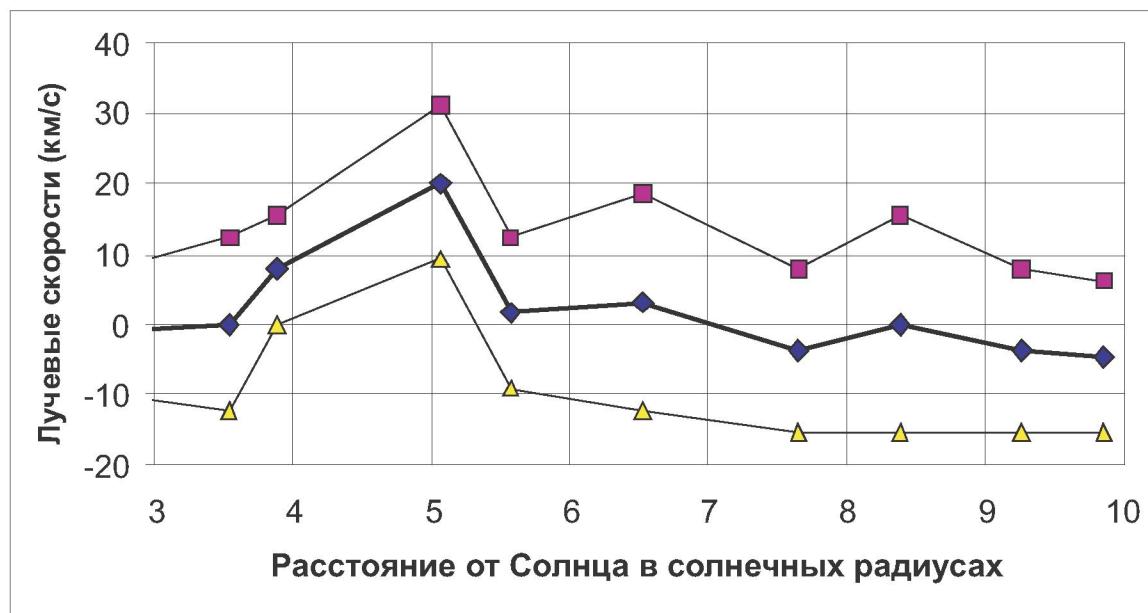


Рис.9. Усредненные по позиционным углам лучевые скорости в зависимости от расстояния до Солнца: верхняя кривая – западная половина кадра, нижняя кривая – восточная половина, средняя – усреднение по всем направлениям

всем направлениям должны компенсироваться. Таким образом, средняя кривая на рисунке 9 отражает, в основном, радиальные движения пыли относительно Солнца, которые близки к нулю.

На рисунке 10 представлены средние значения лучевых скоростей в зависимости от позиционного угла. Такой способ усреднения позволяет выделить влияние орбитального движения пыли. При орбитальном движении пыли, близком к круговому, на востоке (вблизи $P=90^\circ$) должны наблюдаться отрицательные доплеровские

скорости, а на западе (вблизи $P=270^\circ$) – положительные, как это было по результатам наблюдения 1981 года [1].

Результаты новых наблюдений подтверждают наличие упорядоченного кеплеровского движения пыли, соответствующего направлению движения планет в Солнечной системе, как это было по наблюдениям 1981 года. Заметим, что по результатам наблюдения затмения 29.03.2006 распределение наблюдавшихся лучевых скоростей отличается от полученного 1 августа 2008 года и

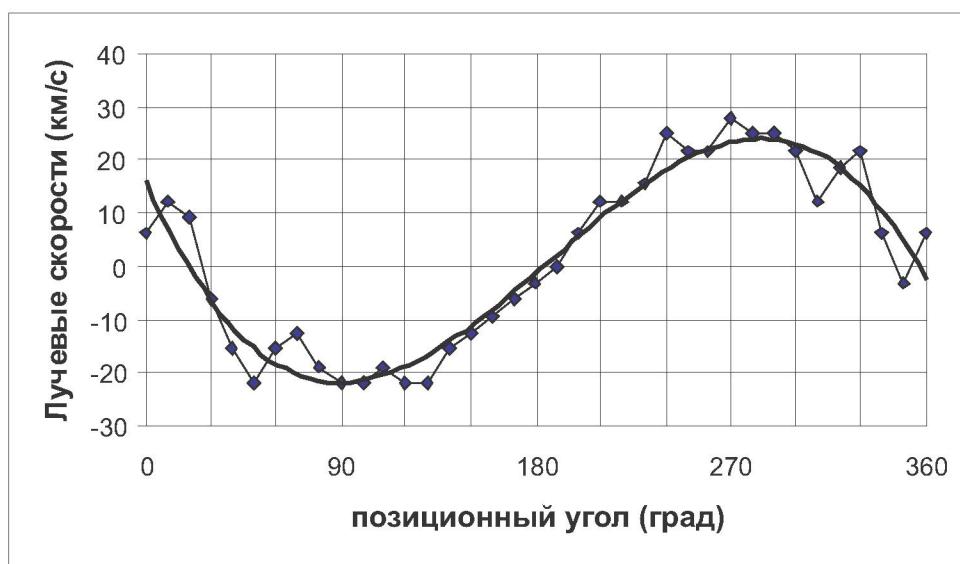


Рис.10. Усредненные по всем расстояниям лучевые скорости в зависимости от позиционного угла.

Начало отсчета- северный полюс эклиптики. 90° - восток, 180° - юг, 270° - запад.

Жирная линия – аппроксимация наблюдений полиномом 4-го порядка

кеplerовского движения вблизи плоскости эклиптики не обнаружено [5,6].

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shcheglov, P.V., Shestakova, L.I., Ajmanov, A.K.. Results of interferometric observations of the F-corona radial velocity field between 3 and 7 solar radii // Astron. & Astrophys.. 1987. V.173. P.383-388.
2. Shestakova, L.I.. Interpretation of F-corona radial velocity observations // Astron.& Astrophys.. 1987. V.175. P.289-291.
3. Айманов А.К., Айманова Г.К. и Шестакова Л.И.. Лучевые скорости в F-короне 11 июля 1991 года // Письма в Астрономический Журнал. 1995. Т.21. № 3. С.222-225.
4. Ajmanov, A.K., Ajmanova, G.K., Shestakova, L.I.. Radial Velocities in the F-corona on July 11, 1991 // Astronomy Letters. 1995. V.21. № 2. P.196-198.
5. Шестакова Л.И., Рспаев Ф.К., Минасянц Г.С., Дубовицкий А.И., Шалабаев А. Лучевые скорости пыли в F-короне по наблюдениям полного солнечного затмения 29 марта 2006 года. //Известия МОН РК, Серия физ-мат. 2007. № 4. С.86-89.
6. Shestakova L.I., Rspaev F.K., Minasyants G.S., Dubovitskiy A.I., Chalabaev A. The observation of total solar

eclipse on March 29, 2006 in Kazakhstan. //Odessa Astronomical Publications. 2007. V.20. P.203-204.

Резюме

Ресейде Барнаулдың батысында 3-тен 10 Күн радиусына дейінгі аралықтарда Күннің сыртқы тәжінің интерферометрлік бақылаулары өткізілді. $MgI \lambda 5184$ Е сызыққа жақын жерде жұтуы сызықтарының доплер ығысулыры бойынша F- тәжісіндегі тозаңның сәулелік жылдамдықтарының өрісі алынды. Бақыланған сәулелік жылдамдықтардың үлестірілуінде тозаң болшектердің Кеплер түзу козгалысына лайықты шығыс-батысты симметриясы сенімді табылады.

Summary

Interferometric observations of the outer solar corona at the distances from 3 to 10 solar radii were carried out in Russia to the West from Barnaul. The field of dust radial velocities in the F-corona was obtained on the Doppler shifts of absorption lines near $Mg\lambda 5184$ E. The east-west symmetry, corresponding to the direct Keplerian motion of dust particles around the Sun is evident in distribution of observed velocities.

Астрофизический институт им.

В.Г. Фесенкова НЦ КИТ РК,

г.Алматы

Поступила 20 апреля 2009 г.