

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ
С БОЛЬШИМ КОРОНОГРАФОМ САЯНСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИStudying the solar corona
with the Large Coronagraph of the Sayan Observatory

Abstract. We outline results obtained with the use of the Large Non-eclipse Coronagraph of the Sayan Observatory.

Одним из достоинств Большого внеэатменного коронографа (БВК) конструкции Никольского и Сазанова является большой стационарный спектрограф, дающий дисперсию в рабочем порядке $0.95\text{--}0.98 \text{ \AA}/\text{мм}$, что позволяет изучать детали профилей линий, гарантируя тем самым более высокий уровень исследования. По наблюдениям из космоса изучение деталей линий стало доступным только в самые последние годы. Спектроскопия короны с этим инструментом уже в первые годы после установки его в Саянах в 1967 г. привела к новым результатам, которые были подтверждены по наблюдениям с борта космических аппаратов только спустя более двух десятков лет – свидетельство того, что наземная оптическая корона не исчерпала свой потенциал. В настоящем докладе мы кратко коснёмся некоторых результатов, исторически полученных по наблюдениям в основном в доперестроечное время, т.к. с началом перестройки в стране началась и «перестройка» БВК, которая, к сожалению, растянулась на годы (модернизация механических узлов и приёмных устройств), и наблюдения были прерваны. Тем не менее, использование имеющегося архива наблюдений позволяет и сейчас получать новую информацию с опережением по отношению к той, которая добывается по наблюдениям из космоса.

Высокое спектральное разрешение БВК обусловило постановку, прежде всего, такой задачи, как исследование вращения короны спектроскопическим методом. В результате по наблюдениям в течение 1969–1972 гг. спектров красной корональной линии Fe X $\lambda 6374 \text{ \AA}$, лежащей на непрерывном участке спектра, свободном от блендов, впервые была построена кривая вращения корональной плазмы (Рис. 1–3), (Stepanov, V.E., Tyagun, N.F., 1976, *IAU Symp.* 71, 101). При интерпретации провалов на кривой в районах $\sim 35^\circ$ и $\sim 65^\circ$ впервые было выдвинуто предположение о существовании зональных течений на поверхности Солнца. Впоследствии Говардом и Ла Бонте (Howard, R., La Bonte, V.J., 1980, *ApJ*, **239**, L33) зональные течения были обнаружены по наблюдениям лучевых скоростей на уровне фотосферы, которые в (Yoshimura, H., *ApJ*, 1981, **247**, 1102; La Bonte, V.J., Howard, R., 1982, *Solar Phys.* **75**, 161) истолковывались как крутильные колебания. Kuklin G.V., Stepanov V.E. (1983, *Publ. Debrecen Obs.*, 389) показали, что положение максимумов сдвиговых скоростей и направленных течений в фотосфере и короне совпадают в пределах ошибок измерения лучевых скоростей.

В ходе исследования вращения выполнялись дополнительные исследования, приведшие к новой информации. Укажем на два из них.

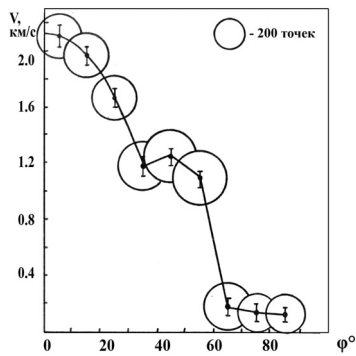


Рис. 1: Зависимость линейной скорости вращения от широты, 1969–1972 гг. Площади кружков пропорциональны количеству наблюденных контуров. Общее число определений равно 4976.

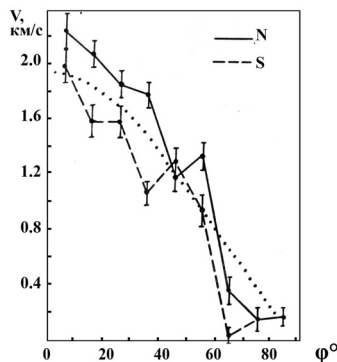


Рис. 2: Вращение 1969–1972 гг. Спектроскопический метод, N- и S-полушария.

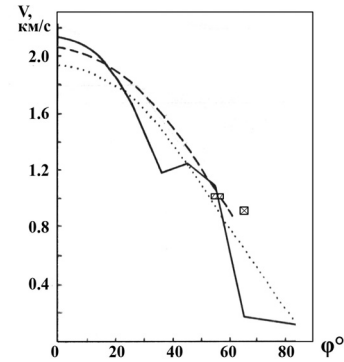


Рис. 3: Сравнение результатов определения вращения, полученных различными авторами: Хансен и др., К-корона, «трассеры», 1969 г. Говард и др., фотосфера, спектр. метод, 1966–1968 гг.; Купер и Биллингс, λ 5303, «трассеры», 1962 г.; Вальдмайер, λ 5303, «трассеры», 1950 г.; Степанов и Тягун, спектр. метод, λ 6374, 1969–1972 гг.

Во-первых, была уточнена длина волны красной корональной линии Fe X λ 6374 Å, точность которой, известная ещё со времён Лио (Lyot, В., MNRAS, 1939, **99**, 580), (6374.51 ± 0.03) Å, не удовлетворяла поставленной задаче (Тягун Н.Ф., 1977, Письма в АЖ, **3**, № 12, 559). Искомое значение определялось согласно

$$\lambda_0 = (\lambda_W + \lambda_E)/2,$$

где λ_0 – несмещённая длина волны, λ_W и λ_E – средние длины волн, определённые по достаточно большому числу наблюдений отдельно на западном и восточном краях в короне. Мы определили λ_0 по двум выборкам объёмом ~ 1500 и ~ 5000 доплеровских сдвигов. При подсчёте среднего применялся критерий 2σ . По первой выборке мы получили для λ_0 значение 6374.5501 ± 0.0013 и по второй 6374.5492 ± 0.0011 . Увеличение материала в три раза практически не повысило точности определения. Это значит, что используемое количество материала уже в первом варианте было достаточным. На Рис. 4 представлены гистограммы распределений отдельных значений λ_W и λ_E (~ 5000 определений). Таким образом, найденная длина волны красной линии отличается от принятой на величину 0.039 Å, почти равную той погрешности, с которой было проведено её определение Лио (Lyot, В., MNRAS, 1939, **99**, 580). Для изучения лучевых скоростей в короне это весьма существенная величина, соответствующая в нашем случае скорости 2 км/с, т.е. ожидаемой скорости вращения на экваторе.

Во-вторых, было установлено, что *фраунгоферовы линии в спектре рассеянного света неба сдвинуты относительно линий в спектре центра диска Солнца на величину 0.019 Å на экваторе, которая меняется с широтой в близком соответствии с законом дифференциального вращения*. Можно полагать, что сдвиг этот обусловлен рассеянием в инструменте от края солнечного диска, вблизи которого располагается щель спектрографа. Поскольку атмосферное рассеяние не должно давать смещения, то сумма

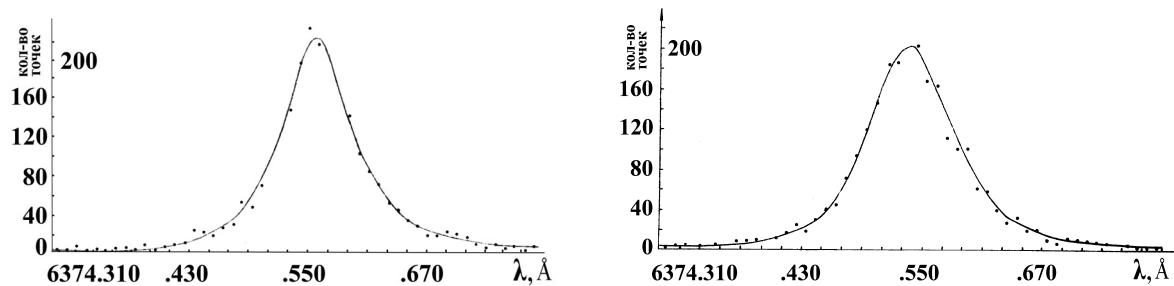


Рис. 4: Гистограммы распределений значений λ_W и λ_E .

инструментального рассеяния с атмосферным может дать сдвиг по величине меньший, чем даст сам край солнечного диска.

Таким образом, при исследовании лучевых скоростей в короне с наземными коронографами следует учитывать поправку на сдвиг линий ореола, относительно которых определяется положение корональной линии.

Материал обработки более 5000 контуров за 1969–1972 гг., использованный для изучения лучевых скоростей, в дальнейшем был использован для изучения взаимосвязи полуширин ($\Delta\lambda$) и интенсивностей (W) линии Fe X $\lambda 6374 \text{ \AA}$.

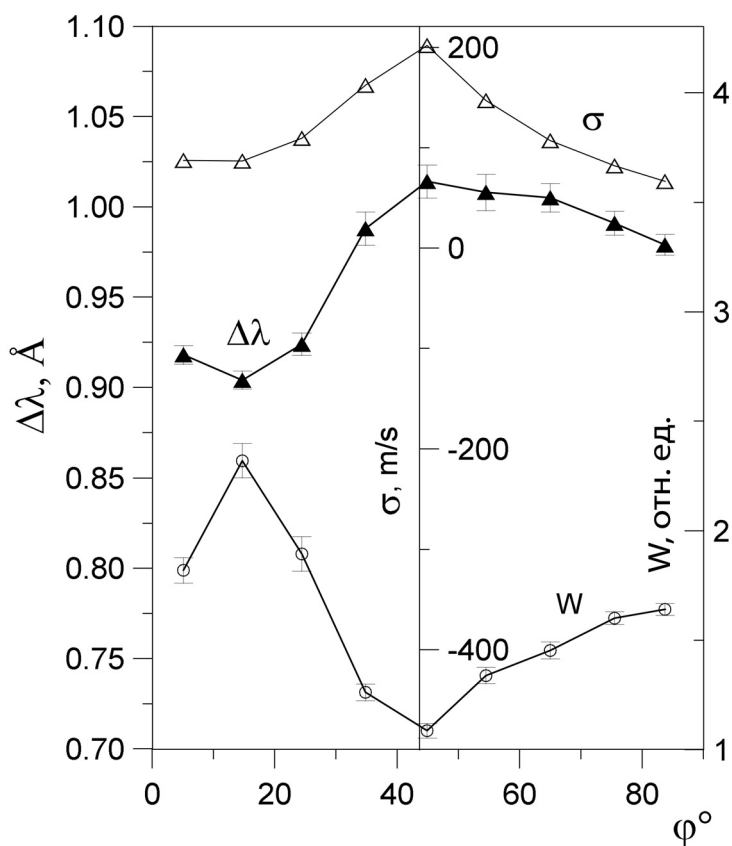


Рис. 5: Взаимосвязь ширин $\Delta\lambda$ и интенсивностей W для красной корональной линии 1968–1972 гг., ~ 5500 контуров, σ – дисперсия лучевых скоростей.

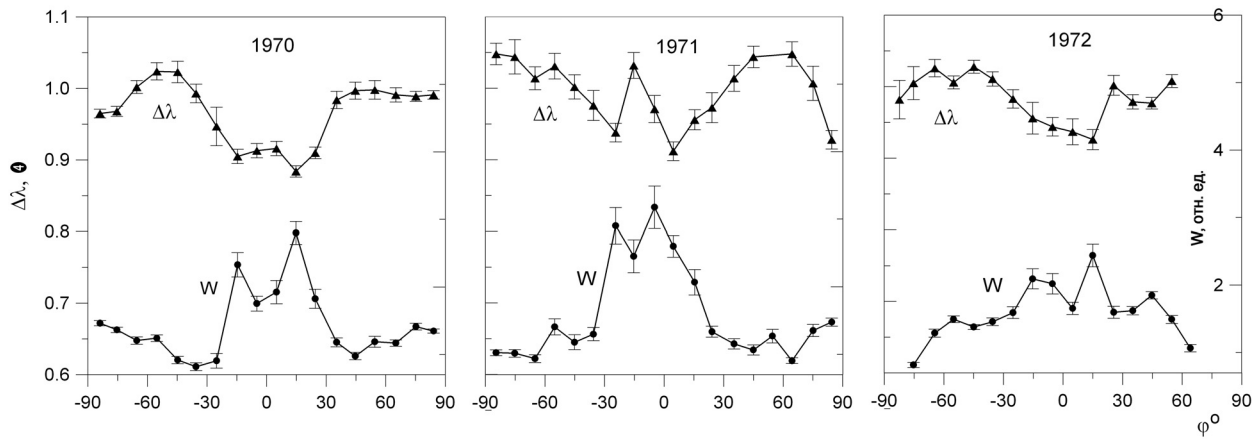


Рис. 6: Изменение во времени широтных характеристик красной корональной линии, 1970–1972 гг.

В результате впервые было установлено, что ширины и интенсивности красной корональной линии находятся в обратной зависимости на всех широтах в короне (Рис. 5, Тягун, Н.Ф., Степанов, В.Е., 1975, Солнечные данные, Бюлл. № 2, 56). Рис. 6 иллюстрирует поведение $\Delta\lambda$ и W с широтой в каждом полушарии для отдельных лет (Тягун, Н.Ф., Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. М.: Наука, 1977, вып. 42, 73). Подтверждение обратной зависимости ($\Delta\lambda$) и (W) для красной линии было получено и по наблюдениям активных областей и их окрестностей (Тягун, Н.Ф., 2004, Солнечно-земная физика, вып. 6, 104; Tyagun, N.F., 2004, *223rd IAU Symp.*, 403). (см. Рис. 7, низ), а также в зависимости от высоты в короне (Tyagun, N.F., 2004, *223rd IAU Symp.*, 403), Рис. 8. Проведённые исследования взаимосвязи ($\Delta\lambda$) и (W) для зелёной линии Fe XIV λ 5303 Å в активной области и по высоте в короне показали прямую зависимость (Рис. 7, верх, и Рис. 8 соответственно).

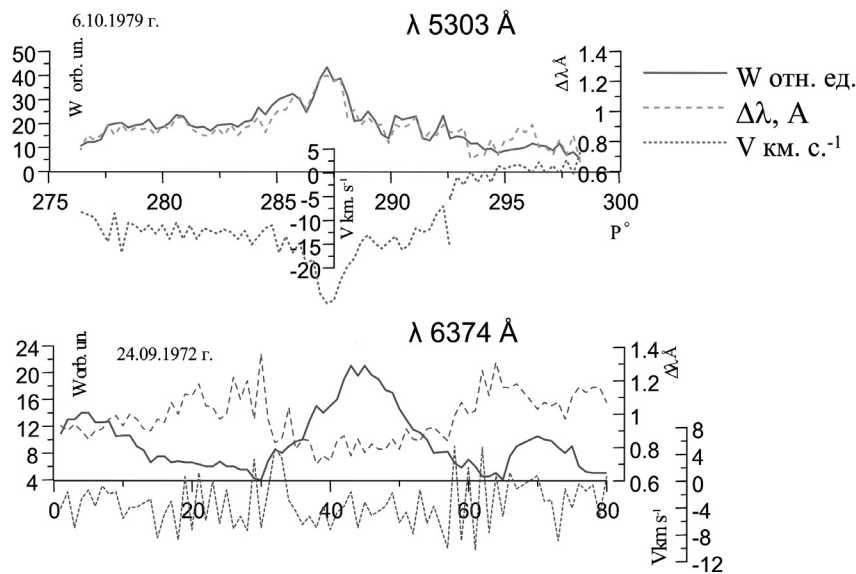


Рис. 7: Примеры распределений параметров линий в активных областях.

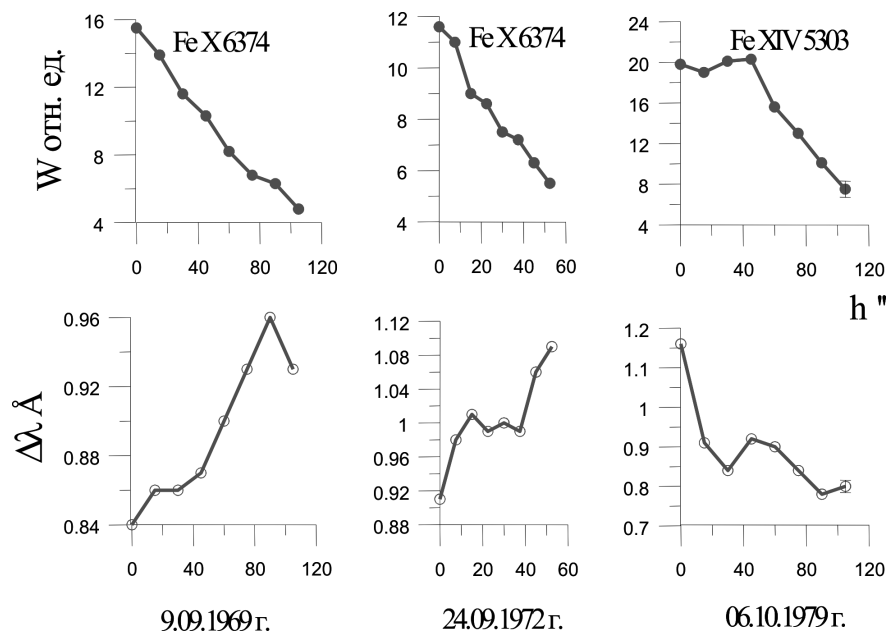


Рис. 8: Изменение параметров контуров линий с высотой в короне.

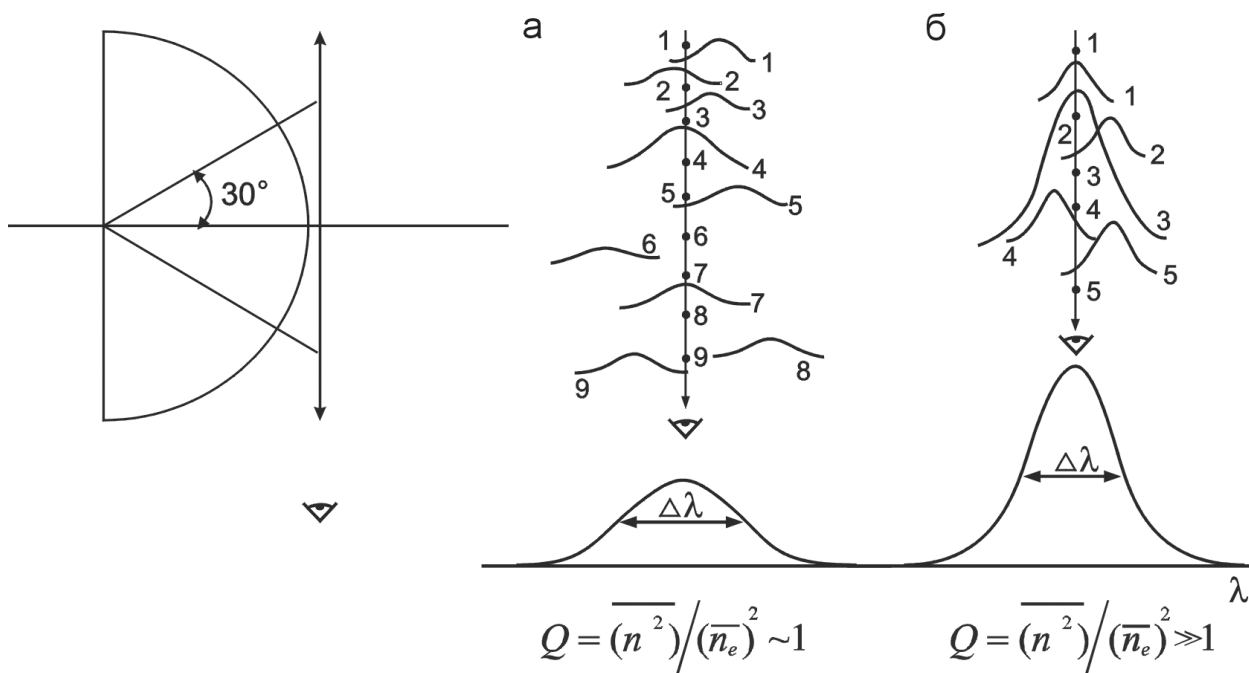


Рис. 9: Модельное представление образования наблюдаемых профилей в короне для случаев различной структурированности по лучу зрения: а) относительно равномерная тонкая структурированность, большая дисперсия лучевых скоростей на луче зрения; б) преимущественная локализация вещества в одном элементе на луче зрения.

Такое разное поведение двух эмиссионных линий, принадлежащих одному и тому же элементу, оказалось неожиданным и трудно объяснимым. Наши первые результаты по красной линии долгое время не находили подтверждений, пока не начались актив-

ные наблюдения спектров Солнца из космоса в коротковолновом диапазоне. В результате обратная взаимосвязь $\Delta\lambda$ и W была обнаружена для некоторых линий короны и переходного слоя по ходу высоты над лимбом. В дальнейшем наши результаты по красной и зелёной линиям нашли подтверждение в серии работ, выполненных индийскими учёными совместно с японскими коллегами по наземным наблюдениям на японской корональной станции Норикура (Singh, J. et al., *Solar Phys.*, 2006, **236**, 245, см. также ссылки). Общепринятого понимания разного нетермического уширения этих линий пока нет. В качестве возражения против волнового механизма, который часто привлекается в этом случае, как раз и может быть то, что эти линии ведут себя по-разному, тогда как распространяющиеся снизу вверх волны должны были бы расширить обе линии. Мы в своих исследованиях предлагаем подход, в котором за основу берётся *различная структурированность короны в разных линиях* (Tyagun, N.F., 1994, *IAU Colloquium 144*, 421). Поясним это с помощью Рис. 9, где вариант «а» отражает случай более низкотемпературной плазмы, светящейся в красной линии (ионизационная температура $T \sim 1$ МК): структурированность повсеместно более однородная и тонкая (коэффициент неоднородности Q близок к единице). Для зелёной линии (ионизационная температура $T \sim 2$ МК), которая, являясь индикатором активности на Солнце, мощно светится в относительно больших локализациях над активными областями с сильным магнитным полем (коэффициент неоднородности существенно больше единицы), характерен вариант «б» на рисунке. В пользу такого представления говорит и верхний график (σ) на Рис. 5, представляющий дисперсию скоростей. Наблюдения зелёной и красной линий над активной областью в короне на выходе её из-за края 29 июля 1983 г. и на заходе за край примерно через две недели 11 августа 1983 г. (Рис. 10) также говорят в пользу нашего подхода: с разрушением группы уменьшается её выраженная структурированность и отрицательная корреляция (R) между ($\Delta\lambda$) и (W) для красной линии увеличивается, а для зелёной из положительной становится отрицательной. Наиболее веским доказательством влияния структурированности на луче зрения в короне на форму контура являются наблюдения полярных областей в короне в сентябре, Рис. 11 (Tyagun, N.F., 2008, Труды Всерос. Ежегодн. конф. по физике Солнца, СПб, 122).

Все графики на Рис. 11 демонстрируют *прямую взаимосвязь* ($\Delta\lambda$) и (W) для красной линии. В то же время июньские наблюдения полярных областей дают в основном как обычно отрицательную корреляцию. В чём же разница наблюдений полярных областей осенью и летом? Рассмотрим такую модельную картину. Представим, что на полюсе расположена корональная дыра, края которой отстоят от оси Солнца на $\pm 7^\circ$. Тогда летом, когда угол наклона оси Солнца $B_0 \sim 0$, луч зрения, направленный по касательной к краю Солнца, ближе всего к его поверхности проходит в центре дыры. Полярные щётки, заселяющие корональную дыру, располагаются с равным весом в сторону к наблюдателю и от наблюдателя относительно оси Солнца и плоскости неба. Осенью или весной, когда угол $B_0 \sim 7^\circ$, на лимбе будет располагаться граница корональной дыры и пространство по лучу зрения будет заселено щётками на 50%. Щётки все будут находиться в полушарии, обращённом к наблюдателю (осень N; весна S) или от наблюдателя (весна N; осень S). Наибольший вклад в наблюдаемый контур будут давать те щётки, которые находятся на границе корональной дыры, т.к. луч зрения просекает их в самой нижней, наиболее плотной части. Т.е. осенью мы будем наблюдать пограничные щётки в более чистом виде. В модельном представлении областей с

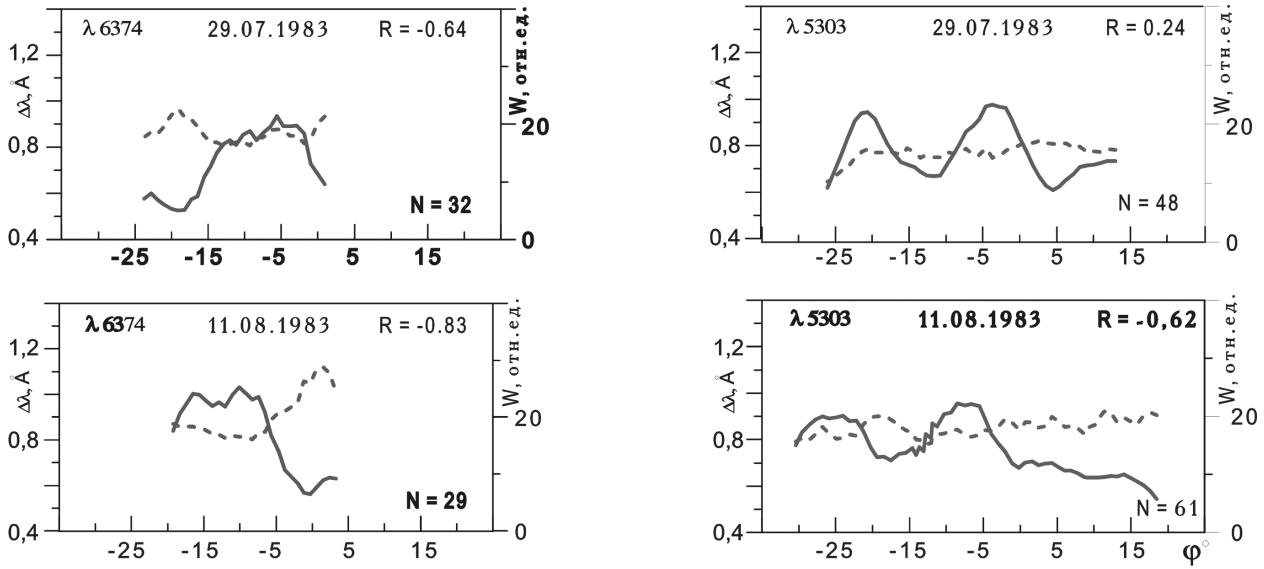


Рис. 10: Наблюдение активной области в короне в июле–августе 1983 г.

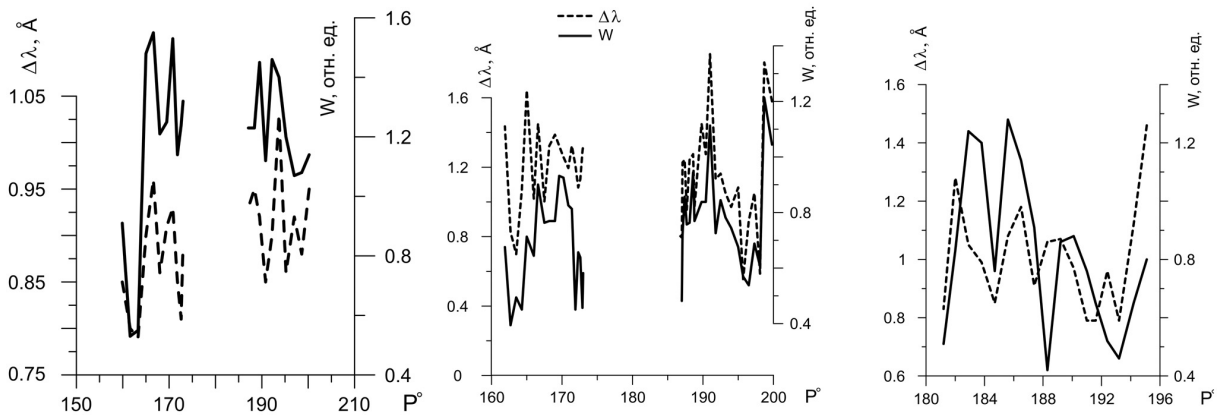


Рис. 11: Наблюдения полярной короны в сентябре.

разной структурированностью по лучу зрения, показанном на Рис. 9, этот случай будет ближе к обозначенному как «б», то есть, к варианту активной области в зелёной линии, когда также наблюдается прямая связь $\Delta\lambda$ и W . У нас нет доказательств, что в приведённых сентябрьских наблюдениях на полюсе были корональные дыры диаметром 7° , но рассмотренная модельная ситуация может быть близка к действительности и позволяет сделать следующие выводы.

1. Полярные щётки должны больше концентрироваться к границам корональных дыр, или пограничные щётки должны быть более крупными и плотными.
2. Солнечный ветер «дует» из щёток, а не из промежутков между ними.

3. Если наблюдается прямая корреляция между ширинами и интенсивностями для красной линии, то на краю Солнца или вблизи него может находиться граница корональной дыры.
4. При интерпретации форм контуров линий излучения оптически тонкой плазмы короны следует учитывать прежде всего структурированность по лучу зрения.

Последний из приведённых выше выводов следует иметь в виду при изучении *асимметрии контуров* корональных линий. Целенаправленный анализ профилей Fe X λ 6374 Å, наблюдаемых на всех широтах, показал, что в массе своей они асимметричны и асимметрия эта *преимущественно синяя*, независимо от того, наблюдаем ли мы на восточном, или на западном краю Солнца, хотя, казалось бы, что на западном краю можно ожидать проявления красной асимметрии (из-за вращения) (Tyagun N.F., 2010, Geomagn. Aeron., **50**, No. 7, 860). *Синяя асимметрия* была обнаружена и для зелёной линии Fe XIV λ 5303 Å по наблюдениям с интерферометром Фабри–Перо во время затмения (Raju, K.P., 2010, ApJ, **736**, 164). Она также наблюдается как на западном, так и на восточном краях Солнца. Однако последнее наше изучение контуров Fe X λ 6374 Å, наблюдаемой с БВК в 1974 г., неожиданно показало подавляющее преимущество *красной асимметрии* (Тягун, Н.Ф., 2012, Труды Всерос. Ежегодн. конф. по физике Солнца, СПб, 349) как по всему лимбу, так и над активными областями по высоте в короне. Явление пока не получило объяснения, и необходим дальнейший поиск. Для этого возможно использование имеющегося архива наблюдений спектров короны с БВК.

ИСЗФ СО РАН Россия, 664033,
Иркутск, Лермонтова, 126-а
tyagun@mail.ru

Н.Ф. Тягун
N.F. Tyagun

Поступила 24 января 2013 г.