

УДК 547.7

## Фотометрическая и спектральная переменность сейфертовской галактики Akn 120 в 1992–2005 гг. по наблюдениям в Крыму

В.Т. Дорошенко<sup>1,2</sup>, С.Г. Сергеев<sup>2</sup>, В.И. Проник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Крымская лаборатория ГАИШ МГУ, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>2</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 15 декабря 2007 г.

**Аннотация.** На основе фотометрических наблюдений ядра сейфертовской галактики первого типа Аракелян 120 (Akn 120), сделанных в Крыму в 1996–2005 годах, прослежена кривая блеска в полосах *UBVRI* и выполнен анализ переменности. Изменения показателей цвета переменного компонента связаны, по-видимому, с изменением непрозрачности газа при температуре  $T > 15000$  К. Излучение в полосах *VRI*, вычисленное по пику CCF, запаздывает относительно излучения в фильтре *B* в интервале от 1.4 до 5.6 дней, систематически увеличиваясь от *V* к *I*. Запаздывание, вычисленное по центроиду CCF, составляет от 2.8–10.5 суток соответственно для полос *V–I*. Связь времени запаздывания с длиной волны хорошо аппроксимируется зависимостью  $\tau \propto \lambda^{4/3}$ , которая характерна для оптически толстых аккреционных дисков. Проведен анализ оптической переменности с помощью структурной функции. На большом временном интервале структурную функцию можно представить в виде степенной функции с показателем степени 0.8–0.9. Такой вид структурной функции соответствует нестабильным процессам в аккреционном диске. Исследование кривых блеска на периодичность выявило возможный период  $P = 430$  суток, который, по-видимому, существует в течение 13 циклов, если привлечь к анализу еще и спектральные данные по континууму с 1988 по 2005 гг. На основе спектральных наблюдений Akn 120, сделанных в Крыму в 1992–2005 годах, а также привлекая литературные данные 1988–1996 гг., исследована переменность линии  $H\beta$  и континуума вблизи нее. Запаздывание изменений потоков в линии относительно изменений потоков в континууме в 1988–2005 гг. в целом составляет по пику CCF ( $55 \pm 9$ ) суток, а по центроиду CCF – ( $72 \pm 7$ ) суток. Запаздывание коррелирует с яркостью континуума: при возрастании потока в континууме запаздывание увеличивается. Эволюция контуров  $H\beta$  позволяет предположить наличие периодичности не менее 9000–10000 суток или 25–27 лет, что характерно для вращающейся BLR, если BLR имеет форму диска. Размер BLR, вычисленный по этому периоду, соответствует реверберационному времени не менее 31 дня, что не противоречит результатам кросс-корреляционного анализа.

**Ключевые слова:** активные ядра галактик, сейфертовские галактики, спектры

---

## 1 Введение

Аракелян первым обнаружил сейфертовский тип этой галактики в 1974 г. Красное смещение равно  $z = 0.03269$ , расстояние  $D = 13$  Мрс. Светимость в рентгеновской области (2–10 Кэв) составляет

$L_x = 7.2 \times 10^{44}$  эрг/с; светимость в оптической области –  $L_{opt} = 1.4 \times 10^{44}$  эрг/с. Среди сейфертовских галактик первого типа Акн 120 характеризуется значительной переменностью потока не только в континууме, но и в эмиссионных линиях, существенной переменностью профиля водородных линий, а также присутствием в оптическом спектре сильных линий ионизованного железа (Fe II). Определено время запаздывания изменения потока в линии  $H\beta$  относительно изменения потока в континууме, которое оказалось довольно большим ( $\sim 39$ – $60$  суток) и, возможно, переменным во времени (Петерсон, Гаскелл, 1986; Гаскелл, Петерсон, 1987; Петерсон, Кота, 1987; Петерсон, 1988; Петерсон, 1989; Петерсон, Гаскелл, 1991; Петерсон, 1998а; Дорошенко и др., 1999). Исходя из запаздывания  $\tau = 39$  суток, была определена масса центрального тела  $M_{rev} = 1.93 \times 10^8 M_\odot$  (Вондел, 1999).

В Крымской лаборатории ГАИШ (КЛ ГАИШ) и в Крымской астрофизической обсерватории (КраО) давно проводятся исследования долговременной спектральной и фотометрической переменности Акн 120 и опубликован ряд статей (например, Дорошенко, Лютый, 1999; Дорошенко и др., 1999). В настоящем обзоре приводится сводка результатов фотометрических и спектральных наблюдений сейфертовской галактики Акн 120 с 1992 г.

## 2 Наблюдения

*UBV*-фотоэлектрические наблюдения проводились с фотометром на 60-см телескопе КЛ ГАИШ с апертурой  $A = 27.5''$ . Приемником излучения служил фотоэлектрический умножитель. В этой работе использовались только *UBV*-наблюдения Дорошенко, начиная с 1996 г.

*BVRI*-наблюдения с матрицей Ар7р с размером чипа  $512 \times 512$  пикселей выполнялись в прямом фокусе ( $f = 282$  см) 70-см телескопа КраО с января 2002 г. Все измерения матричных изображений проводились методом апертурной фотометрии с круглой диафрагмой диаметром  $15''$ .

Спектральный мониторинг Акн 120 проводился на 2.6-м телескопе им. Шайна в КраО. Начиная с 1992 г., спектральные наблюдения проводились в нэсмитовском фокусе телескопа на спектрографе СПЭМ с ПЗС-приемником излучения. Спектральное разрешение с решеткой 650 штр/мм составляло  $8 \text{ \AA}$ , а длина спектров –  $1200 \text{ \AA}$ . Ширина щели спектрографа была  $3''$  и позиционный угол щели всегда был  $90^\circ$ . Для учета спектральной чувствительности аппаратуры и теллурических линий поглощения проводились наблюдения стандартной звезды 23 Ориона, спектры которой обрабатывались таким же образом, как и спектры галактики. Стандартная звезда служила также для измерения потока в линии [OIII] $\lambda 5007$  (N1), а эта линия впоследствии использовалась для масштабирования спектров. Наши спектральные измерения покрывают интервал 4816 суток, и за это время было получено 89 спектров в линии  $H\beta$  в разные даты.

## 3 Результаты фотометрических наблюдений и их анализ

### 3.1 Фотометрические кривые блеска

Фотоэлектрические и ПЗС-наблюдения в полосах  $B, V$  часто проводились в близкие моменты времени. Это позволило сопоставить фотоэлектрические оценки блеска в диафрагме  $A = 27.5''$  в полосах  $B, V$  с результатами ПЗС-наблюдений на 70-см телескопе в тех же полосах в диафрагме  $A = 15''$ . В полосе  $U$  имелись только фотоэлектрические наблюдения в диафрагме  $A = 27.5''$ . Однако в некоторые ночи проводились фотоэлектрические наблюдения в двух диафрагмах  $A = 27.5$  и  $A = 15.0''$ . В этом случае был определен средний поток в кольце  $(27.5$ – $15.0)''$ , который затем был вычтен из потоков в полосе  $U$  в  $A = 27.5''$ . На рис. 1 приводятся кривые блеска в фильтрах  $U, B, V, Rc, Ic$  в апертуре  $A = 15''$ . Как и для других сейфертовских галактик, переменность видна на разных временных масштабах и амплитуда изменений блеска уменьшается от  $U$  к  $Ic$ :  $\Delta U = 1.1^m$ ;  $\Delta B = 0.8^m$ ;  $\Delta V = 0.6^m$ ;  $\Delta Rc = 0.5^m$ ,  $\Delta R1 = 0.5^m$  и  $\Delta Ic = 0.4^m$ .

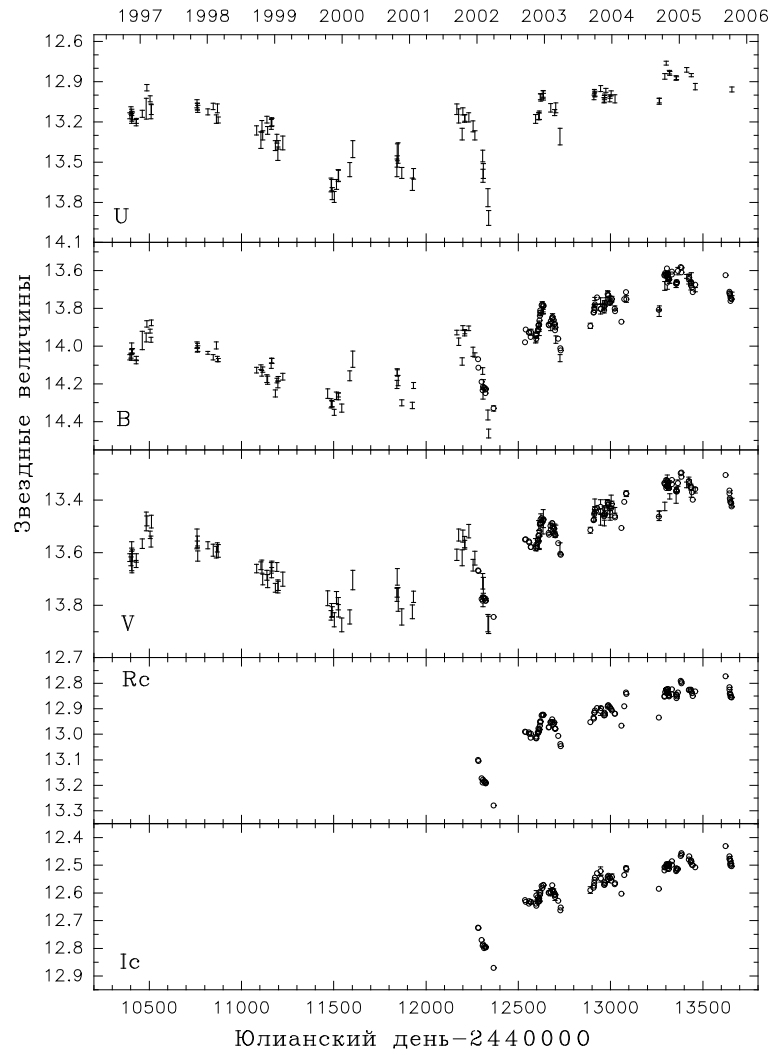


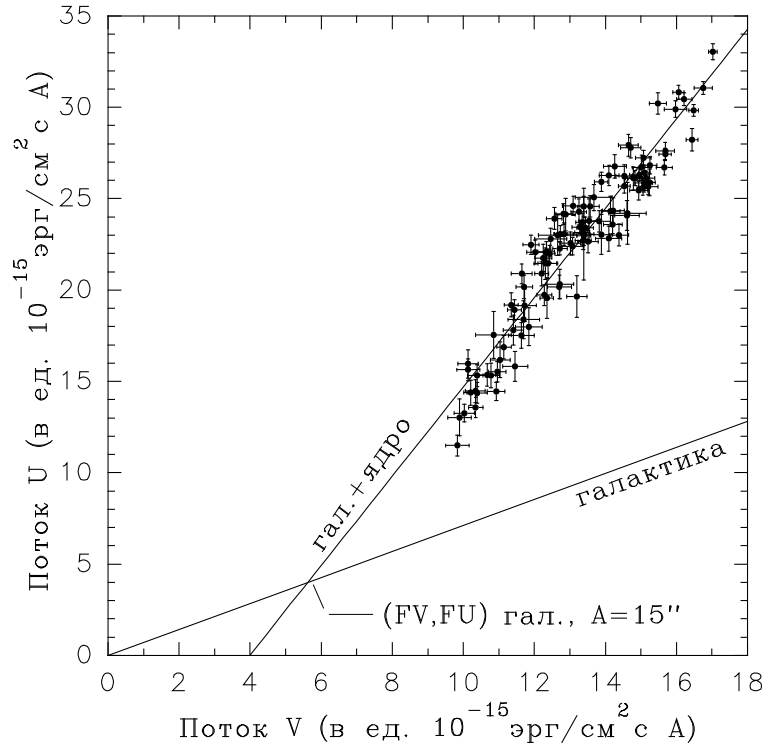
Рис. 1. Сводные кривые блеска ядра Akn 120 в апертуре  $A = 15''$ . Фотоэлектрические данные показаны штрихами, ПЗС-данные – открытыми кружками

### 3.2 Вклад ядра и галактики в апертуре $A = 15''$

Эти наблюдения позволили отделить в диафрагме  $A = 15''$  излучение ядра от излучения подстилающей галактики.

С одной стороны, на основе взаимосвязи потоков излучения в двух фильтрах на диаграммах, называемых в дальнейшем диаграммами «поток-поток», можно вычислить показатели цвета переменного источника, исходя (в качестве первого приближения) из предположения, что распределение энергии в переменном источнике в видимой области спектра остается неизменным при изменении блеска ядра (Холоневский, 1981). В этом случае показатели цвета переменного источника можно определить по наклону уравнений регрессии.

Кроме того, по фотоэлектрическим наблюдениям в течение 1975–1977 гг. в двух диафрагмах  $A1 = 27.5''$  и  $A2 = 14.3''$  (Дорошенко, Лютый, 1999) был вычислен средний поток и показатели цвета  $(U-B)_g$  и  $(B-V)_g$  от галактики в кольце  $r1 = (27.5-14.3)''$ . В то же время по ПЗС-наблюдениям в самые лучшие фотометрические ночи были измерены потоки и показатели цвета  $((B-V)_g, (V-Rc)_g$  и  $(V-Ic)_g$  от галактики в кольцевой диафрагме  $r2 = (8-15)''$ . Оказалось, что показатели цвета



**Рис. 2.** Диаграмма «поток  $V$  – поток  $U$ » для Акн 120 в апертуре  $A = 15''$ . Иллюстрация к определению потока от переменного компонента (ядра) и постоянного компонента (галактики) в разных фильтрах

$B - V$  в двух кольцевых диафрагмах  $r1$  и  $r2$  близки в пределах вычисленных неопределенностей. Это давало нам некоторое основание игнорировать возможные изменения показателей цвета галактики с расстоянием от ядра и взять в качестве показателей цвета галактики в диафрагме  $A = 15''$  такие значения, какие были получены в кольцах, а именно:  $(U - B)_g = -0.13 \pm 0.24^m$ ,  $(B - V)_g = 0.80 \pm 0.03^m$ ,  $(V - Rc)_g = 0.57 \pm 0.02^m$  и  $(V - Ic)_g = 1.20 \pm 0.02^m$ .

Кроме корреляционного соотношения наблюдаемых потоков в  $A = 15''$  от суммарного излучения ядра и галактики в двух фильтрах, на обсуждавшихся выше диаграммах «поток-поток» мы можем построить еще и прямую, являющуюся характеристикой самой галактики. Эта прямая должна проходить через ноль и иметь наклон, обусловленный соответствующим показателем цвета галактики, который мы только что обсуждали. Точка пересечения этих двух прямых дает нам поток от галактики в двух соответствующих фильтрах. Такой метод был успешно применен в работе Винклера (1992) по фотометрии 35-ти южных сейфертовских галактик. Предложенный метод уверенно работает только в том случае, когда показатели цвета переменного источника (ядра) и подстилающей галактики сильно различаются. В противном случае точка пересечения будет очень чувствительна к ошибкам в показателях цвета. Такие диаграммы были построены для разных сочетаний фильтров. В результате мы смогли получить потоки от галактики в диафрагме  $A = 15''$ , причем в фильтре  $U$  мы получили 4 оценки потока, а в фильтрах  $B, R, I$  по две оценки, которые были потом усреднены. Усредненные потоки от галактики в диафрагме  $A = 15''$  в единицах  $10^{-15} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$  получились такими:  $FU_g = 4.48 \pm 0.23$ ,  $FB_g = 6.45 \pm 0.59$ ,  $FV_g = 7.084$ ,  $FRc_g = 8.89 \pm 0.26$  и  $FIc_g = 7.12 \pm 0.02$ . Это соответствует показателям цвета  $U - B = -0.10^m$ ,  $B - V = 0.76^m$ ,  $V - Rc = 0.76^m$  и  $V - Ic = 1.18^m$ . Показатели цвета галактики в диафрагме  $A = 15''$  получились близки к таковым в кольцах, за исключением показателя цвета  $(V - Rc)$ , который оказался более красным, чем в кольцевой диафрагме. Причина этого расхождения пока неясна. Иллюстрация этого метода показана на рис. 2. Оценки показателей цвета переменного компонента

и окружающей галактики Akn 120 в апертуре  $A = 15''$  приводятся в таблице 1. Полученные нами

**Таблица 1.** Показатели цвета переменного источника и окружающей галактики и оценки вклада галактики в апертуре  $A = 15''$

Показатель цвета	Переменный комп.	Галактика
$U - B$	$-1.015 \pm 0.018$	$-0.10 \pm 0.10$
$B - V$	$+0.021 \pm 0.009$	$+0.76 \pm 0.09$
$V - R$	$+0.351 \pm 0.009$	$+0.76 \pm 0.04$
$V - I$	$+0.527 \pm 0.011$	$+1.18 \pm 0.02$
$V(15'')$		$14.27 \pm 0.02$

показатели цвета галактики указывают на принадлежность галактики к морфологическому типу Sc-Sd, подтверждая более ранние исследования Лютого (1978), что не совсем обычно для сейфертовских галактик, которые считаются галактиками типа Sa-Sb.

### 3.3 Двухцветная диаграмма $\ll U - B, B - V \gg$

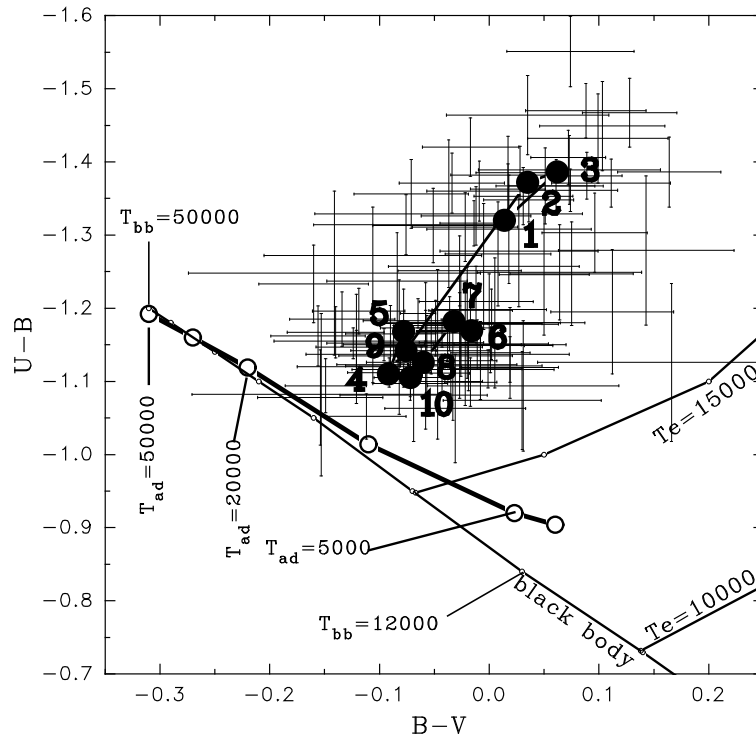
Далее мы можем оценить потоки только переменного источника, вычтя из суммарных наблюдаемых потоков в диафрагме  $A = 15''$  потоки от галактики, полученные выше. После учета межзвездной экстинкции, которая согласно базе данных NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu>) невелика ( $A_V = 0.43^m$ ), можно построить двухцветную диаграмму  $\ll (U - B), (B - V) \gg$ . Расположение показателей цвета  $(U - B)$  и  $(B - V)$  на двухцветной диаграмме показано на рис. 3, и видно, что показатели цвета переменного источника эволюционируют, переходя от положения, соответствующего водородной плазме с температурой около 20000 K, до состояния, которое приближается к непрозрачному аккреционному диску с температурой около 12000 K.

### 3.4 Кросс-корреляционный анализ фотометрических данных

Считается, что непрерывное излучение в оптической области спектра излучается аккреционным диском, в котором перерабатывается рентгеновское излучение, нагревающее этот диск. При значительных размерах аккреционного диска в нем происходит стратификация излучения вследствие того, что температура в диске падает с удалением от центра диска. Это обстоятельство может проявиться в запаздывании одного и того же сигнала, идущего из центральных областей диска и перерабатываемого в последовательно более удаленных от центра и более холодных областях. Работы по определению времени запаздывания сигнала в полосах  $V, R, I$  по сравнению с полосой  $B$  для Akn 120 проводились ранее, см., например, работу Сергеева и др. (2005). Мы повторили эти расчеты на более широком наблюдательном материале. Использовалась интерполяционная кросс-корреляционная функция (CCF) и вычислялись запаздывания по пику CCF ( $\tau_{pk}$ ) и по центроиду CCF ( $\tau_{cn}$ ). Ошибки в оценке запаздываний определялись методом Монте-Карло с применением FR/RSS техники (Петерсон и др., 1998b) и использованием 3000 симуляций кривых блеска в каждом фильтре. Результаты приводятся в таблице 2. Следует отметить, что запаздывание, вычисленное по центроиду CCF несколько больше, чем в работе Сергеева и др. (2005). Однако разница составляет всего 2–2.2 $\sigma$ . Различие в запаздывании, определяемом по пику CCF, и того меньше, и составляет в  $R, I$  полосах порядка 1 $\sigma$ .

### 3.5 Анализ фотометрических данных с помощью структурной функции

Для анализа временных рядов  $x(t)$  часто применяют структурную функцию первого порядка ( $SF$ ), которая является аналогом спектра мощности в частотной области. Структурная функция для

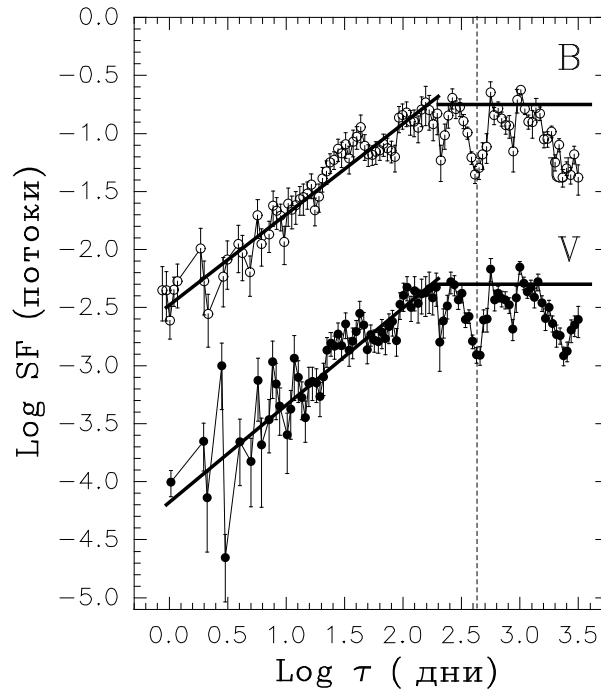


**Рис. 3.** Диаграмма  $\ll (U - B)-(B - V) \gg$ . Черное тело представлено в диапазоне температур от 40000 до 10000 K (линия “black body”). Приведена локализация цвет-индексов для аккреционных дисков, показанная жирной линией в диапазоне температур 3000–50000 K. Показаны также линии, соответствующие излучению водородной плазмы непрозрачной в бальмеровском континууме, температура которой  $T_e = 15000$  и 10000 K. В показатели цвета переменного компонента Akn 120 внесены поправки за поглощение света межзвездной средой нашей Галактики. Для индивидуальных значений приводятся бары ошибок по  $U - B$  и  $B - V$ , а данные, усредненные по наблюдательным сезонам, показаны заполненными кружками. Цифры возле кружков соответствуют последовательным сезонам, начиная с 1996–1997 гг. и заканчивая наблюдениями в конце 2005 г.

**Таблица 2.** Кросс-корреляционный результат

	$\tau_{pk}$	$\tau_{cn}$	$\tau_{max}$
$V/B$	$1.40^{+1.19}_{-0.74}$	$2.83^{+1.69}_{-1.72}$	0.991
$Rc/B$	$4.10^{+2.09}_{-2.20}$	$7.37^{+2.10}_{-2.07}$	0.972
$Ic/B$	$5.60^{+2.04}_{-2.85}$	$10.54^{+2.52}_{-2.42}$	0.961

случайного стационарного процесса однозначно связана с автокорреляционной функцией соотношением:  $SF(\tau) = 2D[x(t)] \times [1 - ACF(\tau)]$ , где  $D[x(t)]$  – дисперсия процесса,  $ACF$  – его автокорреляционная функция, а  $\tau$  – временной сдвиг. Ключевыми параметрами структурной функции, которые определяются природой переменности источника, являются амплитуда переменности, наклон структурной функции в логарифмических осях и время выхода на плато со стороны больших временных смещений, хотя оно определяется довольно грубо. Обычно структурные функции пред-

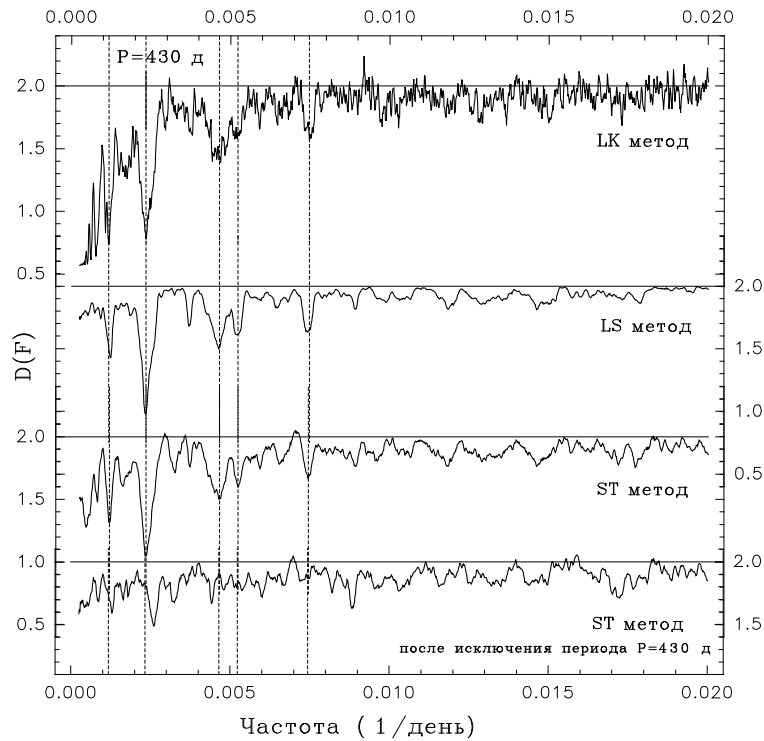


**Рис. 4.** Структурные функции, скорректированные за ошибки наблюдений и после вычета долговременного тренда, построены для кривых блеска по фотоэлектрическим и ПЗС-наблюдениям. Бар ошибок определялся на основе 1000 кратных Монте-Карло симуляций кривых блеска с применением FR-RSS-метода (Петерсон и др., 1998b). Для наглядности структурные функции показаны со смещением по вертикальной оси. Жирной линией на рисунке представлена подгонка наблюдаемой  $SF$ -функцией  $f(\tau) = a \times \tau^b$ . Горизонтальная линия соответствует плато  $SF$

ставляются в логарифмических осях. Структурные функции для кривых блеска в полосах  $B, V$  по совмещенным фотоэлектрическим и ПЗС-данным были рассчитаны для временных смещений, равноотстоящих в логарифмическом масштабе. Они скорректированы за ошибки наблюдений, и предварительно из наблюдаемых кривых блеска был удален тренд в виде свертки кривых блеска с гауссианой с  $\sigma = 150$  суток. Ошибки структурной функции вычислялись в результате многократных Монте-Карло симуляций с применением зашумления кривых блеска и многократных случайных выборок из наблюдаемых данных. Эта процедура, известная в литературе как FR-RSS-метод, использовалась Петерсоном и др. (1998b). Структурные функции показаны на рис. 4. Видно, что они имеют практически идеально стандартную форму: линейный тренд и выход на плато. Жирная линия представляет аппроксимацию степенной функцией  $f(\tau) = a \times \tau^b$ . При этом показатель степени на временном интервале до 100 суток равен  $b \sim 0.8-0.9$ . Этот показатель степени близок к оценке, сделанной Колье и др. (2001) по независимым наблюдениям в обсерватории Университета штата Огайо в 1988–1996 гг. Выход на плато намечается в районе около 100 суток. Как показали исследования Кавагучи и др. (1998), такой наклон  $SF$  соответствует нестабильным процессам в аккреционном диске.

### 3.6 Анализ кривых блеска на возможную периодичность

Анализ фотометрических данных с помощью автокорреляционной и структурной функции показал наличие некоторых особенностей, а именно: повышение корреляции на автокорреляционной функции и понижение дисперсии на структурной функции на временных смещениях около 430 суток. Такие особенности можно связать с наличием периодического процесса с  $P = 430$  суток. Поэтому



**Рис. 5.** Периодограммы по совмещенным бестрендовым фотоэлектрическим и ПЗС-данным в полосе  $V$ , вычисленные по методу наименьших квадратов (LS), Лафлера-Кинмана (LK) и Стеллингверфа (ST). По оси  $y$  отложен параметр  $D(F)$ , который в каждом методе имеет индивидуальные особенности, но всегда при значимом периоде принимает минимальное значение. Нижняя периодограмма вычислена для данных, из которых, помимо тренда, исключены колебания с периодом  $P = 430$  суток

был выполнен периодограммный анализ фотометрических данных разными методами – Диминга, Лафлера-Кинмана, Стеллингверфа и др. Все они показали наличие периода  $P = 430$  суток (рис. 5). Причем, когда убирается колебание с периодом  $P = 430$  суток, то исчезают и другие частоты, оказавшиеся ложными, наведенными этим основным периодом, что видно в нижней части рис. 5.

Период  $P \sim 430$  суток выявляется отдельно и по фотоэлектрическим, и по ПЗС-данным, т. е. по совсем независимым временным рядам, полученным в разное время и на разных телескопах. Свернутые с этим периодом фазовые кривые блеска в полосах  $U$ ,  $B$  и  $V$  показаны на рис. 6. Фазовые кривые очень похожи, хотя одна получена по совмещенным фотоэлектрическим и ПЗС-данным в полосе  $V$ , а две других – по независимым временным рядам в полосах  $U$  и  $B$ .

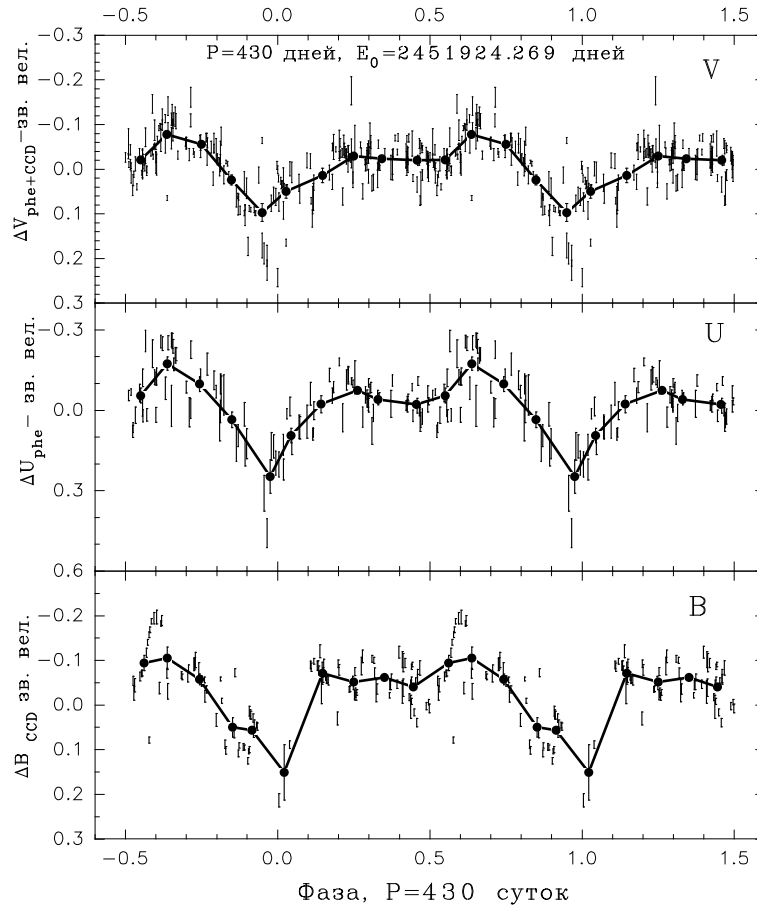
Итак, кривые блеска Akn 120 в 1996–2006 гг. показывают возможное присутствие периодических изменений с периодом  $430 \pm 10$  суток и амплитудой  $\Delta U = 0.^m42 \pm 0.^m07$ ,  $\Delta B = 0.^m27 \pm 0.^m03$ ,  $\Delta V = 0.^m17 \pm 0.^m02$ ,  $\Delta Rc = 0.^m17 \pm 0.^m04$  и  $\Delta Ic = 0.^m14 \pm 0.^m04$ .

### 3.7 Анализ на периодичность в Akn 120 на основе численного моделирования

Значимость периодов конкретного временного ряда можно оценить путем многократного численного моделирования реализаций случайного процесса, который имел бы такое же среднее значение, дисперсию и автокорреляционную функцию и был бы рассчитан на такое же распределение моментов времени, что и наблюдаемая кривая блеска Akn 120.

Для этого сначала мы генерировали массив независимых гауссовых случайных величин  $\xi_i$ ,  $i = 1 \dots n$  с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, где  $n$  равно числу





**Рис. 6.** Бестрендовые кривые блеска по совмещенным фотоэлектрическим и ПЗС-данным в полосе  $V$ , только по фотоэлектрическим наблюдениям в полосе  $U$  и только по матричным наблюдениям в полосе  $B$ , свернутые с периодом  $P = 430$  суток. Заполненные кружки соответствуют усредненной по фазе кривой блеска

моментов наблюдений. Затем с помощью линейного преобразования  $x_k = \sum_i A_{ki} \xi_i$  мы получили систему уже взаимокоррелированных гауссовых случайных величин  $x_k$ , которые тоже имеют нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию, и где  $x_k$  есть отсчеты в соответствующие моменты времени наблюдений  $t_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ), а матрица  $(A_{ki})$  находится из наблюдаемой корреляционной матрицы  $(r)$ , которая, по определению, симметрична и главные диагональные элементы которой равны 1. Заметим, что наблюдаемая корреляционная матрица  $(r_{ij}) = \text{ACF}(\tau_{ij}) = \text{ACF}(t_i - t_j)$ , где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  есть моменты наблюдений. Здесь  $\text{ACF}$  – полученная из наблюдений автокорреляционная функция, которую мы сгладили, исключив все пики, чтобы моделируемый случайный процесс был заведомо непериодическим. Поскольку матрица  $(r)$  является симметричной, то можно положить:  $A_{ij} = 0$  при  $j > i$ . Тогда  $x_1 = A_{11} \xi_1$ , но  $A_{11} = 1$ , так как дисперсия равна единице. Остальные элементы матрицы  $(A)$  находим рекуррентным способом:  $A_{sl} = r_{sl} - \frac{1}{A_{ll}} \sum_{i < l} A_{li} A_{si}$ , если  $s > l$  и  $A_{ll} = \sqrt{1 - \sum_{i < l} A_{li}^2}$  в противном случае, то есть  $A_{21} = r_{21}$ ,  $A_{22} = \sqrt{1 - r_{21}^2}$  и так далее.

Таким способом мы сгенерировали систему зависимых гауссовых случайных величин, совместное распределение которых определяется корреляционной матрицей  $(r_{ij})$  с положительным детерминантом (см., например, Прохоров, Розанов, 1967).

Наконец, мы применили экспоненциальное преобразование  $y(x) = a e^{bx}$  к массиву величин  $x$ ,

определяя коэффициенты  $a$  и  $b$  таким образом, чтобы от нулевого математического ожидания и единичной дисперсии перейти к наблюдаемому среднему потоку и наблюдаемой амплитуде переменности, а также, чтобы избежать отрицательных величин, не имеющих физического смысла. При этом мы несколько исказили начальное распределение случайных величин и их корреляционную матрицу, однако при амплитуде переменности много меньшей, чем средний поток, искажения будут несущественными.

Было сделано 1000 таких реализаций, которые в реально наблюдаемые моменты времени симулировали наблюдаемую кривую блеска в полосе  $V$  по совмещенным фотоэлектрическим и ПЗС-наблюдениям на временном интервале JD 2450395–2453658 суток. Из них для 89 симулированных кривых автокорреляционные функции показали наличие горбов на разных временных смещениях. Из этих 89-ти кривых был удален линейный тренд, а для бестрендовых кривых были построены периодограммы. Далее были отобраны те кривые блеска, которые имели максимумы на периодограмме, значимые на уровне  $\leq 5\%$ . Таких кривых блеска оказалось 47 штук. Если теперь отбросить те кривые, максимумы периодограммы которых соответствуют периоду  $P \geq \Delta T/3$ , где  $\Delta T$  – полное время наблюдений, т. е. отбросить те периоды, которые трудно считать реальными, то останется 27 кривых блеска. Среди оставшихся 27-ми кривых блеска только 20 показали фазовые кривые, действительно чем-то напоминающие периодический процесс. На рис. 7 представлены пять из этих 20-ти кривых, которые показали наличие значимого пика и наиболее выразительные фазовые кривые.

Таким образом, из 1000 реализаций случайного неперiodического процесса только в 2% случаев мы получили кривые, в которых, возможно, просматривается “периодическая” составляющая.

## 4 Результаты спектральных наблюдений и их анализ

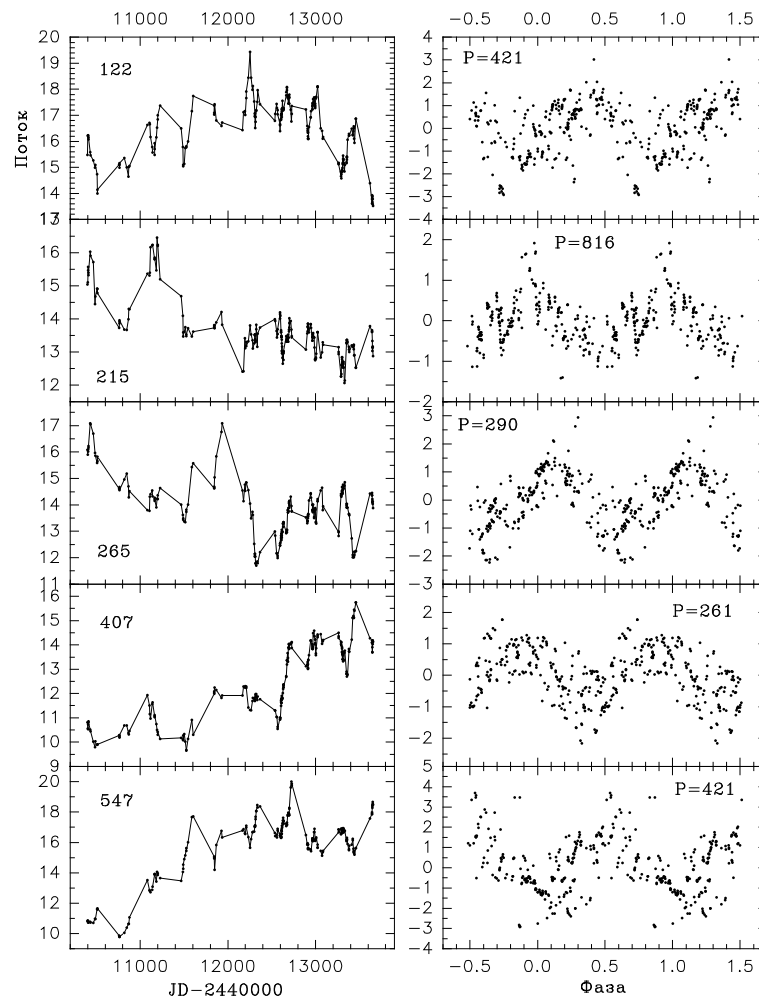
Акн 120 принадлежит к галактикам с сильными линиями ионизованного железа. На рис. 8 показано расположение линий Fe II в спектральной области  $\lambda 4200\text{--}5500 \text{ \AA}$ . Длины волн линий железа взяты из таблиц мультиплетов Мур (1945). На рис. 8 совершенно отчетливо видно, что две широкие эмиссионные детали в области длин волн  $\lambda 4450\text{--}4650 \text{ \AA}$  (общепринятое название FeII4570) и  $\lambda 5100\text{--}5550 \text{ \AA}$  (или FeII5250) связаны с высокой концентрацией линий Fe II разных мультиплетов.

### 4.1 Кривые блеска

Для каждой даты были измерены потоки в линиях и континууме вблизи линии  $H\beta$ . Помимо потока в линии  $H\beta$  были измерены потоки в линии  $H\gamma$  вместе с запрещенной линией [OIII]4363, потоки в бленде линий ионизованного железа FeII4570 вместе с линией HeII4686, и в бленде FeII5250, а также потоки в шельфе, выделенном в красном крыле линии  $H\beta$ , смоделированном из 10-ти линий мультиплетов FeII (m42, m36 и m25) (Дорошенко и др., 2008). Световые кривые в континууме и линиях представлены на рис. 9, где поток в линии  $H\beta$  дан только для широкого компонента, т. е. после исключения вклада узкой составляющей и вклада шельфа. На рис. 9 видна высокая коррелированность потоков в линии  $H\beta_{br}$  и в континууме ( $r = 0.82$ ), а также потоков в  $H\gamma + [\text{OIII}]4363$  и в континууме ( $r = 0.74$ ). Бленда FeII4570 хорошо коррелирует с линией  $H\beta$  ( $r = 0.72$ ) и хуже – с континуумом ( $r = 0.59$  при уровне достоверности 99.9%). Хорошая коррелированность всех линий FeII с линией  $H\beta$  свидетельствует о том, что оптические линии FeII образуются тоже в BLR-области.

### 4.2 Запаздывание потока в $H\beta_{br}$ относительно потока в континууме

Корреляция потоков в континууме и линиях  $H\beta$  и  $H\gamma$  оказывается выше, если учесть запаздывание изменений потока в линиях относительно потока в континууме вблизи линии  $H\beta$ . Запаздывание, вычисленное по пику кросс-корреляционной функции между потоками в  $H\beta$  и в континууме по всем данным, включая спектральные и фотометрические наблюдения, составляет  $55 \pm 9$  суток при максимальном коэффициенте корреляции  $r = 0.875$ , а по центроиду CCF –  $72 \pm 7$  световых дня.



**Рис. 7.** Пять из 1000 симулированных кривых, которые показали наиболее значимые максимумы на периодограмме Диминга и наиболее выразительные фазовые кривые, свернутые с этими периодами (периоды указаны цифрами на фазовых кривых). Фазовые кривые получены после удаления линейного тренда из симулированных кривых

Запаздывание, вычисленное по пику CCF для линии  $H\gamma$  и континуума вблизи  $H\beta$  составляет 19 суток при коэффициенте корреляции в максимуме CCF, равном  $r = 0.79$ , а по центроиду – около 30 суток (рис. 10).

Возможно, запаздывание переменено во времени, что просматривается в верхней части рис. 11. Кроме того, намечается корреляция ( $r = 0.71$ ) между яркостью континуума и запаздыванием: при увеличении яркости континуума запаздывание, определяемое по центру масс CCF, т. е.  $\tau_{cm}$ , увеличивается, что видно в нижней части рис. 11.

#### 4.3 Нарушение характера корреляции между потоками в $H\beta$ и в континууме

С одной стороны, мы показали, что поток в широком компоненте хорошо коррелирует с потоком в континууме, что изменения потока в линии запаздывают относительно изменений потока в континууме и что, возможно, запаздывание меняется со временем. Однако не все так просто. Уже на рис. 9 видно, что максимальный поток в континууме наблюдался в 2005 г., а максимальный поток

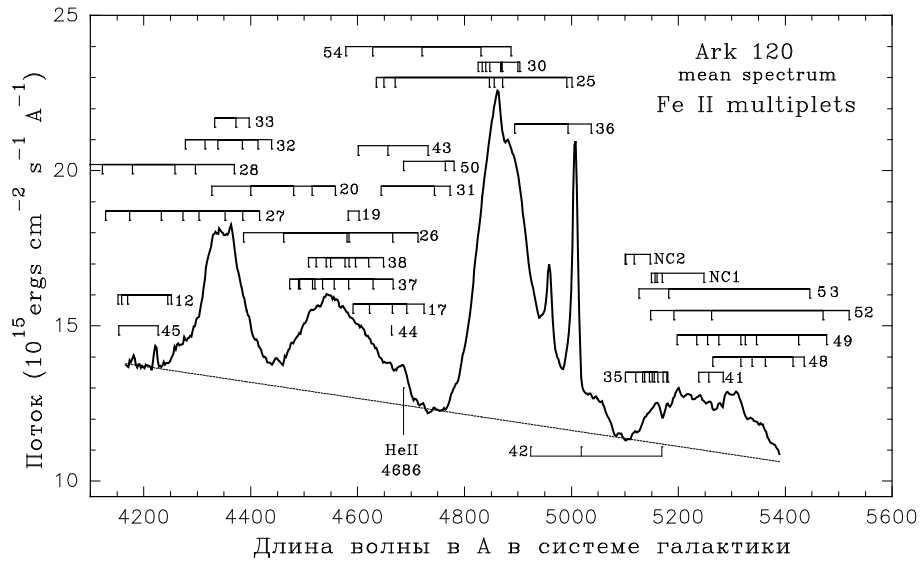


Рис. 8. Вид спектра Akn 120 в районе линии H $\beta$

в линии H $\beta$  наблюдался в 1991 г., т. е. соотношение потоков в линии и в континууме менялось. На диаграммах «поток-поток» можно видеть расщепление корреляции «линия-континуум» на две последовательности (рис. 12). Уравнение регрессии для интервала JD 2452557–2453446 заметно отличается от общего хода регрессии для интервала JD2447524–2452321. Причина такого поведения пока неясна. Однако это явление наблюдалось и в других активных ядрах: NGC 4151, NGC 5548 и Mrk 6 (Сергеев и др., 1994, 1999а, 1999b; Малькова и др., 1997).

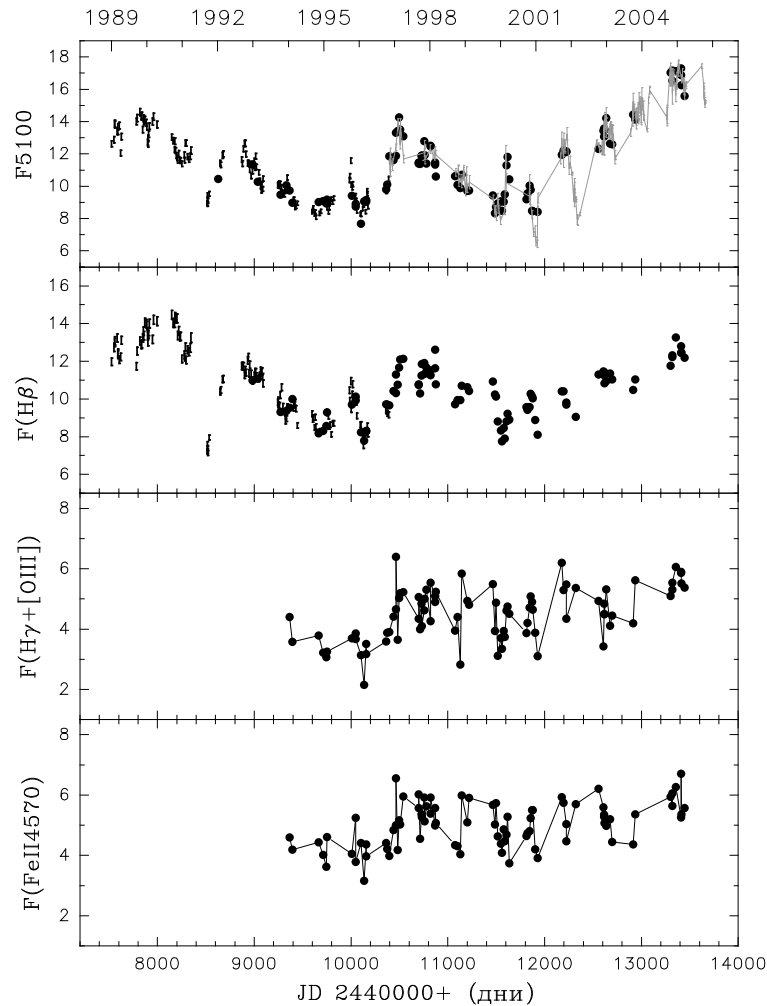
#### 4.4 Переменность профиля широкого компонента H $\beta$

Средний и RMS-профили широкого компонента линии H $\beta$  в трех временных интервалах показаны на рис. 13. Средний профиль асимметричен, максимум его слегка смещен в коротковолновую часть спектра относительно нулевой скорости на 11.3 Å или на 700 км/с. RMS-профиль, определяющий переменную часть H $\beta$ , также асимметричен и имеет два пика: пик почти на нулевом красном смещении и пик, смещенный в красную сторону. Расстояние между максимумами составляет 23.4 Å или 1400 км/с. Эти данные подтверждают факты уже известные из зарубежных публикаций 1977–1985 гг.

И средний профиль, и RMS-контур заметно меняются. Однако, как можно видеть на рис. 13, при одинаковом потоке в континууме (в данном случае минимальном потоке) и средние, и RMS-профили могут значительно различаться. Поток в континууме на рис. 13 для интервалов 1, 2 и 3 соответственно был равен  $8.93 \times 10^{-15}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$  Å $^{-1}$ ,  $8.94 \times 10^{-15}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$  Å $^{-1}$  и  $9.14 \times 10^{-15}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$  Å $^{-1}$ , т. е. усредненные потоки в континууме практически одинаковы. Потоки в широком компоненте H $\beta$  в эти периоды времени различаются не более, чем на 10 %. Однако сами средние профили весьма различны. Различие в RMS профилях в этих трех эпизодах еще существеннее.

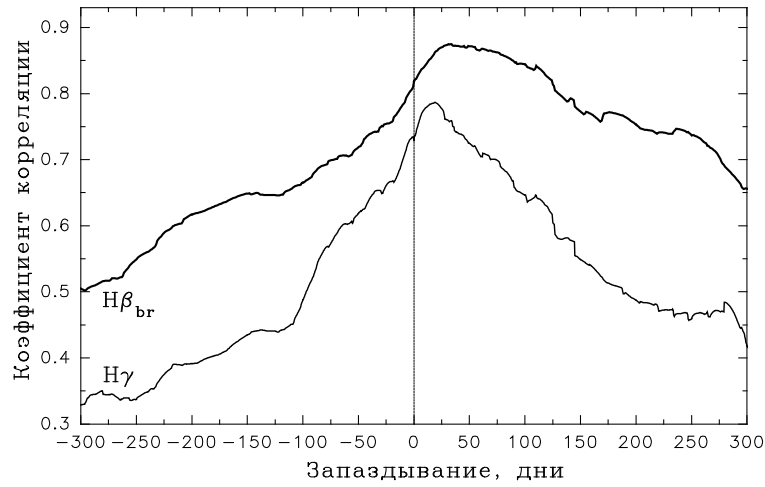
#### 4.5 Эволюция нормированных профилей

Рассматривая изменения профиля во времени мы видим, что интегральный поток в линии за все время наблюдений менялся почти на 70 %. Чтобы исследовать переменность контура, при условии, если бы полный поток в линии оставался постоянным, мы провели нормировку всех профилей

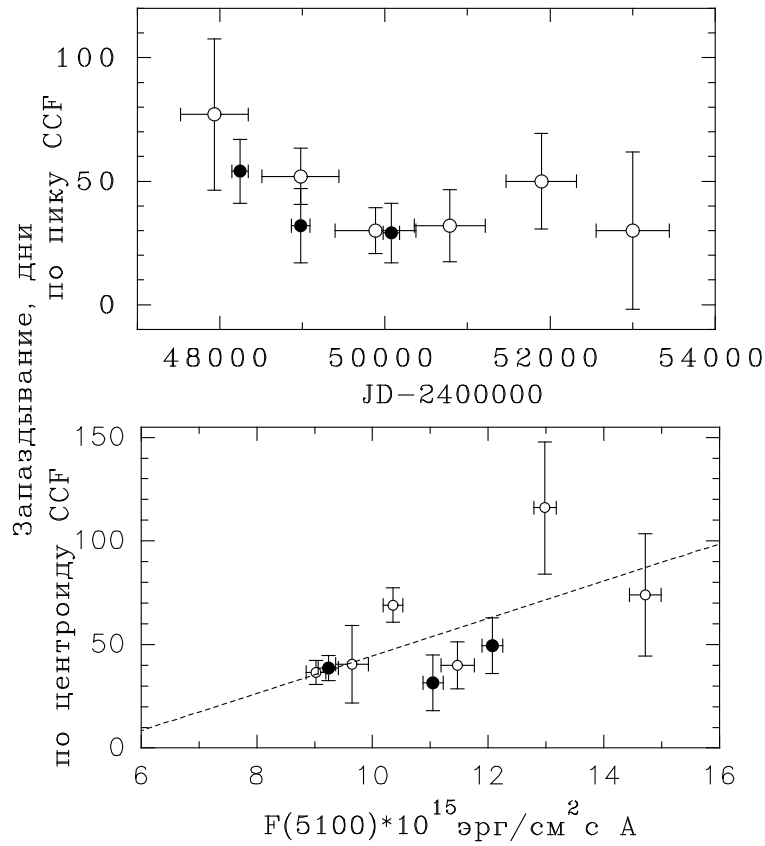


**Рис. 9.** Заполненными точками показаны световые кривые в континууме, центрированном на  $\lambda 5100 \text{ \AA}$  в системе покоя галактики, а также в широком компоненте эмиссионной линии  $H\beta$ , в линиях  $H\gamma + [\text{OIII}]4363$  и бленде линий  $\text{FeII}4570 + \text{HeII}4686$ . Поток в континууме дан в единицах  $10^{-15} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ , а потоки в линиях – в единицах  $10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Штрихами представлены данные Петерсона и др. (1998а). Серой тонкой линией обозначены оценки потока в континууме по нашим фотометрическим наблюдениям в полосе  $V$ , приведенные в соответствии со спектральными наблюдениями

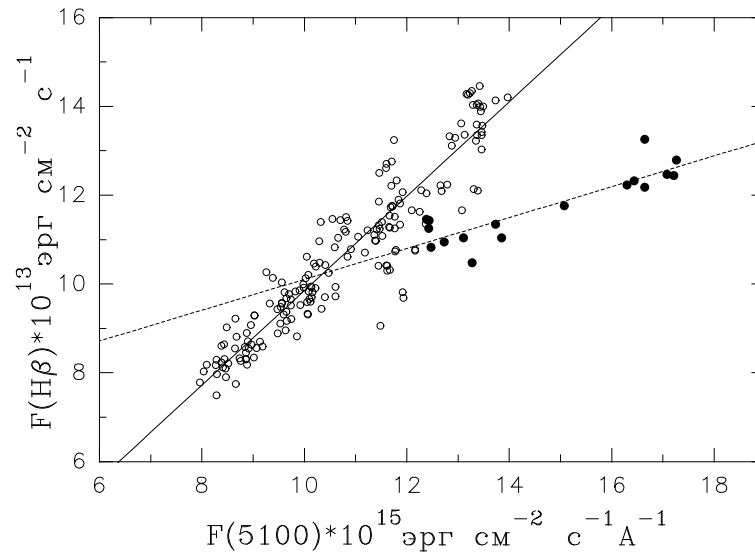
широкого компонента  $H\beta$  на произвольный постоянный поток, а затем получили средний нормированный профиль и вычли его из каждого индивидуального нормированного профиля. То, что получилось после вычитания, показано на рис. 14, где спектры упорядочены и по лучевой скорости (ось  $x$ ), и по времени (ось  $y$ ). На этом изображении светлые участки соответствуют превышению индивидуального профиля над средним профилем. Темные участки соответствуют противоположному эффекту, когда индивидуальный контур ниже среднего. На рисунке совершенно явно проявляются постепенные упорядоченные изменения контура во времени. Части контура, имеющие превышение над средним, постепенно перемещаются от отрицательных лучевых скоростей (в интервале от  $-3000$  до  $-500 \text{ км/с}$ ) в сторону положительных лучевых скоростей (в интервале от  $+3500$  до  $+5500 \text{ км/с}$ ). Эволюция участков пониженного излучения относительно среднего контура имеет противоположное направление. Такую картину можно было бы наблюдать при вращении BLR, которая имеет форму диска с неоднородностями в нем. Если принять такое предположение, то тогда мы наблюдаем



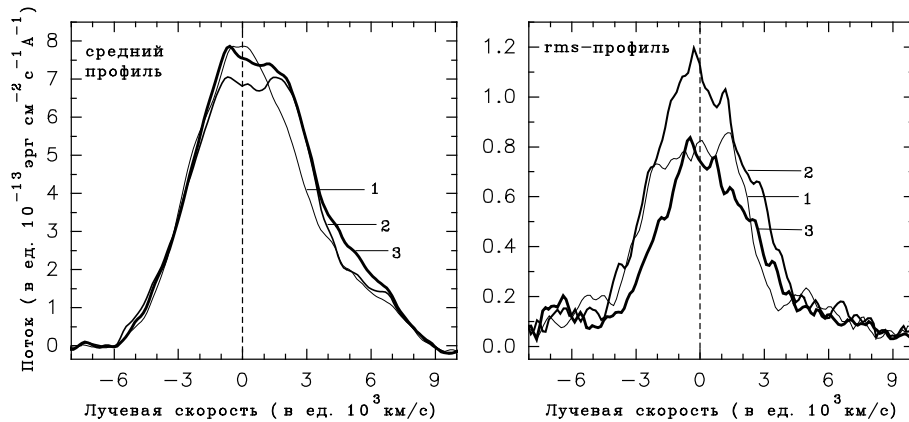
**Рис. 10.** Кросс-корреляция между кривой блеска в широком компоненте линии  $H\beta$  и кривой блеска в континууме (жирная линия) и то же самое в линии  $H\gamma$  и континууме (тонкая линия)



**Рис. 11.** Запаздывание в зависимости от времени, вычисленное по пику ССФ (верхняя часть рисунка), а также связь запаздывания, вычисленного по центру ССФ на уровне  $r \geq 0.8r_{max}$ , между потоком в  $H\beta$  и потоком в континууме (нижняя часть рисунка). Заполненными кружками представлены данные из работы Петерсона и др. (1998а)



**Рис. 12.** Диаграммы «поток-поток» для временного интервала JD2447524–2452321 (открытые кружки) и для интервала JD 2452557–2453446 (заполненные кружки). Диаграмма построена после учета запаздывания



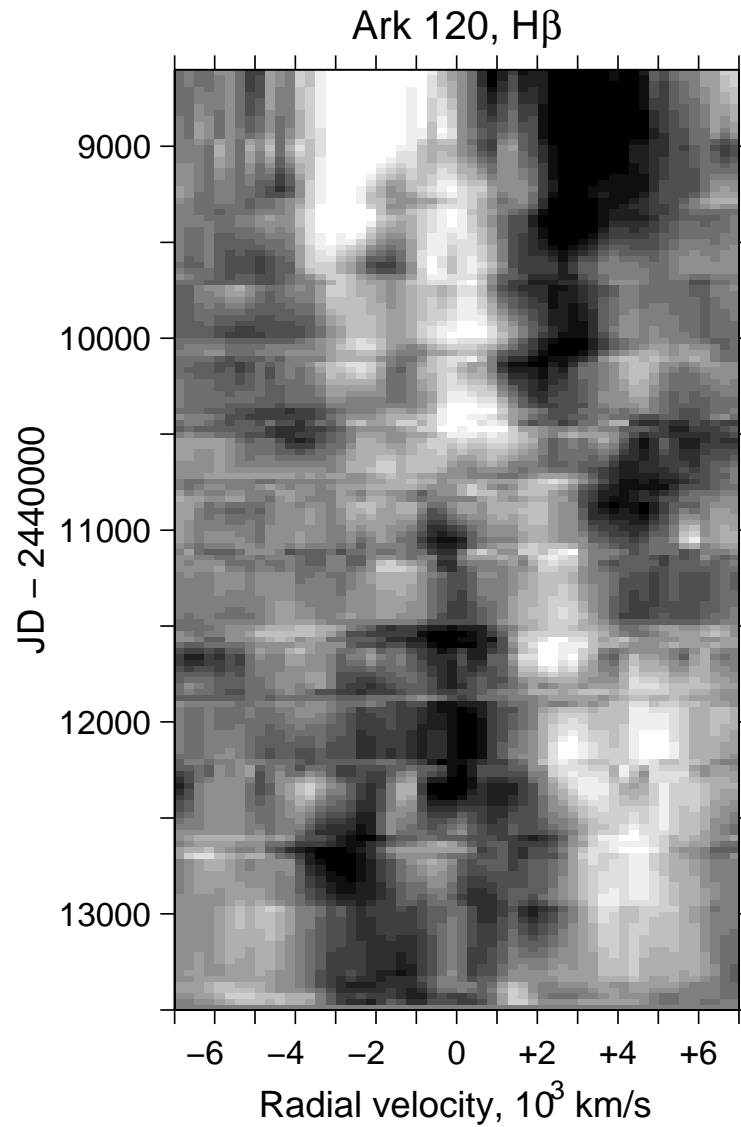
**Рис. 13.** Средние и RMS-профили линии H $\beta$  в трех временных интервалах вблизи минимального блеска в континууме: цифра 1 соответствует интервалу JD2449395–2450156, где усреднено 12 спектров; цифра 2 – интервалу JD2451465–2451587 (усреднено 8 спектров) и цифра 3 – интервалу JD2451810–2451926 (усреднено 8 спектров)

дали бы не меньше, чем половину вращательного периода, т. е.  $P/2 \sim (13000 - 8500) = 4500$  суток, или, возможно,  $P/4 \sim (12900 - 10400) = 2500$  суток. В этом случае период вращения диска BLR составил бы больше, чем  $P \sim 9000 - 10000$  суток или 24.6–27.4 года.

## 5 Заключение

Подведем итоги исследования ядра галактики Акн 120:

- Кривые блеска и в континууме, и в линиях демонстрируют неправильную переменность разных временных масштабов (годы-дни). В частности, видны события длительностью в несколько лет, похожие на вспышки с амплитудой, достигающей  $\sim 0.^m9$ . Наряду с этим на уровне значимости



**Рис. 14.** Эволюция разностей между индивидуальным нормированным контуром и нормированным контуром, усредненным за все время наблюдения. Светлые участки соответствуют превышению индивидуального контура над средним. Темные участки соответствуют состоянию, когда индивидуальный контур ниже среднего

около 2 % возможно присутствуют и периодические изменения блеска с периодом  $P \sim 430$  суток и амплитудой  $\Delta V = 0.^m17 \pm 0.^m02$ . Возможно, что этот период держится более 13 циклов, если привлечь и спектральные данные. Долговременная переменность может быть связана с переменностью темпа аккреции. Кратковременная переменность может быть обусловлена нестабильностью аккреционного диска. Периодический компонент может быть связан с долгоживущими крупномасштабными неоднородностями в аккреционном диске, вращающемся вокруг черной дыры и ответственным за излучение континуума. Согласно третьему закону Кеплера

$$P^2 = 4\pi^2 \left( \frac{r^3}{GM} \right)$$



при периоде  $P = 430$  суток и массе центрального тела  $1.93 \times 10^8 M_\odot$  (Вондел и др., 1999) возможные неоднородности должны находиться на расстоянии  $9.74 \times 10^{15}$  см, а свет будет проходить такое расстояние за 3.7 суток. Эта величина близка к характерному времени запаздывания, которое мы получили по широкополосным наблюдениям 14-ти сейфертовских галактик (Сергеев и др., 2005). Вопрос о том, смогут ли такие неоднородности существовать в течение столь длительного времени (более 13-ти циклов) остается открытым.

- Кросс-корреляционный анализ фотометрических наблюдений показывает запаздывание излучения в полосах  $VRI$  относительно излучения в фильтре  $B$  в интервале от 1.4 до 5.6 дней по пику ССФ и от 2.8 до 10.5 суток по центроиду ССФ. Запаздывание систематически увеличивается от  $V$  к  $I$ . В стандартной модели оптически толстого аккреционного диска температура  $T$  в диске связана с расстоянием  $R$  от источника как

$$T^4 = \frac{3G}{8\pi\sigma} \frac{M\dot{M}}{R^3},$$

где  $M$  – масса центрального тела, а  $\dot{M}$  – темп аккреции системы. Для чернотельного оптически толстого аккреционного диска ожидается, что  $\tau \propto R \propto T^{-4/3} \propto \lambda^{4/3}$  или

$$\tau = a_1(\lambda_i^{4/3} - \lambda_0^{4/3}),$$

где величина  $a_1$  однозначно связана с массой центрального тела  $M$  и с темпом аккреции  $\dot{M}$  (Колье и др., 1998). Подгонка этой модели к нашим наблюдениям показывает хорошее согласие. Если зависимость  $\tau \propto \lambda^{4/3}$  для Акн 120 экстраполировать на инфракрасную область, то можно предположить, что запаздывание в полосе  $K$  для этой галактики должно быть  $\geq 60$  суток. Этот вывод не противоречит величине запаздывания, полученного для BLR-области по линии  $H\beta$ .

- Запаздывание реакции в эмиссионной линии  $H\beta$  на изменения континуума, вычисленное с 1988 по 2005 гг. с привлечением данных Петерсона и др. (1998а), составляет  $55 \pm 9$  суток по пику ССФ и  $72 \pm 7$  суток по центроиду ССФ. Запаздывание, возможно, меняется со временем. Намечается корреляция между яркостью континуума и запаздыванием ( $r = 0.71$ ): при увеличении яркости континуума запаздывание, определяемое по центру масс ССФ, т. е.  $\tau_{cn}$ , увеличивается. Обычно  $\tau_{cn}$  связывают с размером BLR, взвешенным по светимости (Кораткар, Гаскелл, 1991). Известно, что эффективное излучение в каждой конкретной эмиссионной линии связано с определенным значением величины  $U \cdot n_H$ , где  $U$  – параметр ионизации, а  $n_H$  – плотность атомов водорода. Поскольку  $U \cdot n_H \propto \frac{L_{ion}}{r^2}$ , то размер излучающей зоны (или размер BLR) связан со светимостью как  $r \propto L_{ion}^{1/2}$ . Сопоставляя запаздывание с размером BLR, а размер BLR со светимостью (или потоком в континууме), мы получаем, что запаздывание должно коррелировать с потоком в континууме: чем выше яркость континуума, тем больше зона эффективного излучения водорода, что и приводит к увеличению запаздывания.
- Анализ переменности контуров  $H\beta$  во времени показал не только их большое разнообразие, но и присутствие деталей, повторяющихся через длительные промежутки времени. Изменения профиля  $H\beta$  не коррелируют с изменением потока в континууме и в целом кажутся неупорядоченными. Однако если анализировать эволюцию разностей между индивидуальным нормированным контуром и средним нормированным контуром, то проявляется систематическое движение избытков относительно среднего нормированного контура от отрицательных лучевых скоростей в сторону положительных лучевых скоростей. Эволюция участков профиля  $H\beta$  с пониженным излучением относительно среднего нормированного контура происходит в обратном направлении от красного крыла  $H\beta$  к синему. Эта картина очень похожа на присутствие вращения BLR. Если BLR имеет форму диска, то период вращения будет составлять не меньше, чем 9000–10000 суток или 25–27 лет. Тогда, согласно третьему закону Кеплера, при массе центрального источника  $1.93 \times 10^8 M_\odot$  и периоде  $P = 10000$  суток размер BLR получится не меньше, чем  $8 \times 10^{16}$  см. Время пересечения светом такой BLR составит более 31 суток, что по порядку величины согласуется с оценкой запаздывания по ССФ ( $\tau_{cn} = 72 \pm 7$  суток).

**Благодарности.** Мы благодарны штату сотрудников 2.6-м телескопа им. Шайна в Крымской астрофизической обсерватории и инженеру Н.Н. Охмату за помощь в работе, а также всем сотрудникам, принимавшим участие в наблюдениях на телескопах АЗТ-8 и ЗТШ: Сергеевой Е.А., Голубинскому Ю.В., Ефимову Ю.С. Эта работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) No 06-02-16843 и Американским грантом гражданского исследования и развития (CRDF) No UP1-2549-CR-03, на деньги которого были куплены матрицы для спектральных и фотометрических исследований на телескопах Крымской астрофизической обсерватории.

## Литература

- Винклер и др. (Winkler H., Glass I.S., F. van Wyk, et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1992. V. 257. P. 659.
- Вондел и др. (Wandel A., Peterson B.M., Malkan M.A.) // *Astrophys. J.* 1999. V. 526. P. 579.
- Гаскелл, Петерсон (Gaskell C.M., Peterson B.M.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1987. V. 65. P. 1.
- Дорошенко В.Т., Лютый В.М. // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. С. 883.
- Дорошенко В.Т., Сергеев С.Г., Проник В.И. // *Астрон. журн.* 2008. Т. 85. (в печати).
- Дорошенко В.Т., Сергеев С.Г., Проник В.И., Чуваев К.К. // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. С. 658.
- Кавагучи и др. (Kawaguchi T., Mineshige S., Umemura M. and Turner E.L.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 504. P. 671.
- Колье и др. (Collier S.J., Horne K., Kaspi S., et al.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 500. P. 162.
- Колье и др. (Collier S.J., Horne K., Kaspi S., et al.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 500. P. 162.
- Кораткар, Гаскелл (Koratkar A.P., Gaskell C.M.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1991. V. 75. P. 719.
- Лютый В.М., Владимиров С.Б. // *Астрон. циркуляр.* 1978. Т. 1007. С. 1.
- Мальков и др. (Malkov Yu.F., Pronik V.I., Sergeev S.G.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 324. P. 904.
- Мур (Moore C.E.) // *A Multiplet Table of Astrophysical Interest.* / Ed. Princeton N.J. Princeton University Observatory. 1945.
- Петерсон (Peterson B.M.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1988. V. 100. P. 18.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Korista K.T., Wagner R.M.) // *Astron. J.* 1989. V. 98. P. 500.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Wanders I., Bertram R., et al.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 501. P. 82.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Wanders I., Horne K., et al.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1998. V. 110. P. 660.
- Петерсон, Гаскелл (Peterson B.M., Gaskell C.M.) // *Astron. J.* 1986. V. 92. P. 552.
- Петерсон, Гаскелл (Peterson B.M., Gaskell C.M.) // *Astrophys. J.* 1991. V. 368. P. 152.
- Петерсон, Кота (Peterson B.M., Cota S.A.) // *Astron. J.* 1987. V. 94. P. 7.
- Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. // *Теория вероятностей.* М.: Наука. 1967.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Doroshenko V.T., Golubinskiy Yu.V., et al.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 622. P. 129.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Malkov Yu.F., Chuvaev K.K., Pronik V.I.) // *Reverberation Mapping of the Broad-Line Region in Active Galactic Nuclei.* / Eds Gondhalekar P.M., Horne K., Peterson B.M. San Francisco: ASP Conf. Ser. 1994. V. 69. P. 199.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., Sergeeva E.A., Malkov Yu.F.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1999. V. 121. P. 159.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., Sergeeva E.A.) // *Astron. J.* 1999. V. 118. P. 2658.
- Холоневский (Choloniewski J.) // *Acta Astron.* 1981. V. 31. P. 293.