

УДК 547.7

Исследование сейфертовских галактик по спектрам, полученным К.К. Чуваевым на ЗТШ в течение 1972–1992 гг.

В.Т. Дорошенко^{1,2}

¹ Крымская лаборатория ГАИШ МГУ, 98409, Украина, Крым, Научный

² НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 15 декабря 2007 г.

Аннотация. Представлен обзор результатов исследования 4-х сейфертовских галактик NGC 7469, Mkn 509, Akn 120 и Mrk 6 по спектрам, полученным на ЗТШ в 1972–1992 гг.

Ключевые слова: активные ядра галактик, сейфертовские галактики, спектры

1 Введение

Полученный К.К. Чуваевым спектральный материал является уникальным в мире в смысле однородности данных и временного охвата. Наблюдения проводились с одной аппаратурой на одном и том же телескопе в течение 20-ти лет.

Работать с К.К. Чуваевым по обработке спектров я начала с октября 1987 г. По моей просьбе К.К. Чуваев выделил мне для обработки спектры сейфертовской галактики NGC 7469. В 1994 г., когда К.К. Чуваев был уже очень болен, он разрешил закончить начатую им работу по галактике Mkn 509. Впоследствии, в основном мною и С.Г. Сергеевым, были обработаны спектры других сейфертовских галактик (Akn 120, Mkn 6 и NGC 5548). Эта статья является обзором результатов нашей работы по сейфертовским галактикам на основе спектров, полученных К.К. Чуваевым в 1972–1992 гг.

2 Наблюдения

Все спектры были получены в фокусе Нэсмита на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории на спектрографе СПЭМ с ЭОП с магнитной фокусировкой. В основном использовалась решетка 651 штрих/мм. Иногда применялась решетка 1200 штрих/мм. Ширина щели спектрографа составляла 1.6–2'' в проекции на небо и выбиралась в зависимости от качества изображения, которое определялось визуально. Спектральное разрешение с решеткой 651 штрих/мм было порядка 8 Å. Спектры расширялись до 0.3–0.5 мм перемещением изображения вдоль щели, а щель ориентировалась по позиционному углу 90°. За одну экспозицию охватывалась область спектра около 1200 Å, поэтому при одном угле поворота решетки в центре устанавливалась линия H β , а при другом – H α . В течение ночи получались в среднем по 2–3 спектрограммы в H α и H β областях для

нескольких галактик. Для учета спектральной чувствительности аппаратуры наблюдались звезды сравнения с известным распределением энергии в спектре. Однако звезды сравнения наблюдались не каждую ночь. Кроме того, трудно было сделать так, чтобы положение решетки при наблюдении звезд в точности соответствовало тому, какое было при наблюдении галактики. Это обстоятельство, в сочетании с наличием виньетирования рабочего поля спектрографа, сильно затрудняло обработку спектров и было источником значительных ошибок.

3 Обработка

3.1 Оцифровка спектров

Прежде всего нужно было перевести фотографические изображения в цифровой вид. До 1994 г. перевод спектров из почернений в интенсивности проводился в Лаборатории физики звезд и туманностей на микрофотометре “Сова” в сочетании с мини-ЭВМ Искра-1256. Спектры на очень узких кусочках астрономических пленок и шкалки ступенчатого ослабителя к ним, полученные на спектрографе, сканировались на микрофотометре, а отсчеты микрофотометра с помощью вычислительной машины переводились на магнитные кассеты в цифровом виде и рисовались самописцем на ленточный носитель. Вся дальнейшая обработка (привязка к длинам волн, учет чувствительности аппаратуры и виньетирования света в спектрографе, вычисление эквивалентных ширин эмиссионных линий, нахождение центра масс линий и пр.) выполнялась вручную вплоть до 1989 года. Нарисованные самописцем спектры объектов уже в рабочем кабинете измерялись с помощью линейки, палеток и планиметров. Так начиналась обработка спектров NGC 7469.

Оцифровка большей части спектров Mrk 509 и NGC 5548 проводилась тоже на микрофотометре “Сова”. Однако в 1995 г. микрофотометр “Сова” был разобран, и оцифровывать спектры было не на чем. Кроме того, мы не смогли прочитать часть уже оцифрованных записей с магнитной пленки. В начале 1997 г. я получила грант на обработку этих спектров и ездила оцифровывать спектры в Москву. На автоматическом микроденситометре (АМД) в Москве в ГАИШ была оцифрована часть изображений со спектрами сейфертовской галактики NGC 5548 в районе линии $H\beta$ (почти 700 изображений), а также 150 спектров Mrk 509 в районе линии $H\alpha$, полученных за период с 1972 по 1992 гг., и около 600 изображений со ступенчатым ослабителем. Этот АМД был изготовлен еще в 1987 г., а в 1997 году оставался единственным действующим прибором такого рода среди всех обсерваторий бывшего СССР. Микрофотометры постепенно ломались, а комплектующих деталей для ремонта не было. В некоторых случаях микрофотометры не были оснащены компьютерами, что и не предполагалось делать в связи с полным переводом наблюдений на работу с новыми приемниками излучения, работающими в цифровом режиме. Через месяц работы в ГАИШе оцифровка спектров была прекращена из-за того, что перегорели лампочки в рабочем канале АМД. Подобные лампочки, используемые в 80-х годах в киноаппаратуре, в 1997 г. уже не выпускались. Похожие лампочки из старых запасов удалось купить на рынке только к концу лета 1997. Но воспользоваться ими не пришлось, так как в сентябре 1997 г. во время ремонта в ГАИШе был выведен из строя компьютер к АМД, а потом и сам АМД был демонтирован.

Поэтому позже оцифровка спектров Akn 120 и Mrk 6 проводилась на двухкоординатном микрофотометре солнечного отдела КрАО (“Муравей”), который начал работу в 1997 г. на базе микрофотометра МФ-6.

3.2 Последующая обработка спектров

Сотрудником Крымской астрофизической обсерватории Сергеевым С.Г. к 1997 г. был разработан пакет программ для учета фона пленки, учета характеристической кривой, для исправления кривизны ЭОП-ных спектров, чего раньше не делалось. Учет кривизны спектров увеличил точность их обработки. С 1994 г. на остальных этапах обработки был использован блок программ, написанный Сергеевым С.Г. еще в 1992 г. Этими программами теперь пользуются не только все сотрудники

Крымской обсерватории, но и сотрудники других обсерваторий. Получили они хождение и за рубежом.

Привязка исследуемых спектров по длинам волн осуществлялась по линиям в спектре сравнения от специальной лампы накаливания. Однако во время наблюдений спектр лампы накаливания впечатывался не всегда. В этом случае привязка по длинам волн осуществлялась по узким линиям в спектре галактики и по линиям в спектре ночного неба, а также по эмиссионным линиям ртути и неона от уличных ламп ночного освещения.

Исторически получилось так, что в семидесятые, а порой и в восьмидесятые годы еще не осознавали необходимости чрезвычайно жестких условий наблюдений ядер активных галактик по определенной схеме: “наблюдение галактики и звезды сравнения, затем поворот решетки спектрографа на другую спектральную область и опять наблюдения галактики и звезды сравнения и т. д.”. После этого можно было переходить к другому объекту. Причем нужно было, чтобы галактика и звезда находились на одинаковом зенитном расстоянии. Такая схема наблюдений значительно расширяла возможности получения полезной информации из спектров, однако сильно увеличивала время наблюдения одного объекта на телескопе. Без такой схемы наблюдений в условиях сильно виньетированного поля спектрографа полученные спектры пригодны были лишь для измерения эквивалентных ширин линий или для изучения контуров эмиссионных линий, что обычно и делалось. Однако для измерения потоков в линиях и континууме эти спектры нельзя было использовать.

3.3 Учет спектральной чувствительности аппаратуры

Как уже упоминалось выше, в спектрографе СПЭМ сильно виньетирование поля, т. е. к краям кадра чувствительность по спектру сильно падает. Поэтому очень важно было делать коррекцию за виньетирование поля в камере спектрографа и за спектральную чувствительность ЭОПа. Обе эти коррекции можно объединить под одним названием – учет спектральной чувствительности аппаратуры. Для этого обычно проводились наблюдения звезд с известным распределением энергии в спектре (стандартных звезд) до и после наблюдения основного объекта. Для основной массы спектров, полученных с ЭОП, стандартные звезды сравнения наблюдались крайне редко или не наблюдались вовсе. Поэтому с учетом спектральной чувствительности аппаратуры возникли трудности. Их удалось обойти лишь тогда, когда было сделано предположение, что относительное распределение энергии в оптическом спектре самого ядра галактики меняется мало, несмотря на существенные изменения полного потока в континууме. Основанием для такого предположения послужили результаты исследования переменности блеска ядер галактик в широкополосной UVV-системе, представленные в ряде работ, например, в работе Холоневского (1981). При таком предположении для определения спектральной чувствительности аппаратуры можно было использовать относительное распределение энергии в спектре самого исследуемого объекта. А найти это относительное распределение энергии можно было по более точным наблюдениям с ПЗС-приемником, которые проводились уже в 1990–1997 гг. с тем же спектрографом и на том же телескопе. При этом в наблюдениях с ПЗС-приемником были устранены многие недочеты предыдущих наблюдений. Таким образом, для определения кривой спектральной чувствительности аппаратуры часто использовалось относительное распределение энергии в спектре самого ядра галактики. Поскольку предположение о постоянстве относительного распределения энергии в непрерывном спектре в оптической области все же может и не выполняться на большом временном интервале, то в целях повышения точности, для ядра галактики NGC 5548 относительное распределение энергии в континууме было сопоставлено с разным уровнем активности ядра. Применение этой методики позволило максимальным образом использовать все полученные спектры для создания базы данных по потокам и контурам эмиссионных линий в спектре ядер сейфертовских галактик Mkn 509 и NGC 5548.

После учета кривой спектральной чувствительности аппаратуры следовало определить уровень континуума по нескольким зонам, свободным от эмиссионных линий, чтобы вычислять потоки в эмиссионных линиях. Это делалось по спектру, усредненному за все время наблюдения с привлечением среднеквадратичного спектра.

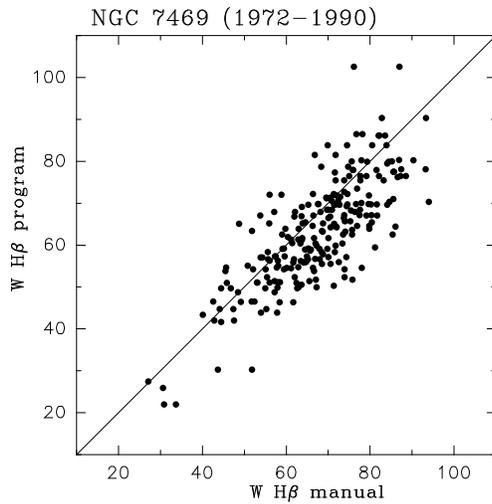


Рис. 1. Сравнение эквивалентных ширин линии $H\beta$ в NGC 7469, измеренных планиметром и по программе SPE

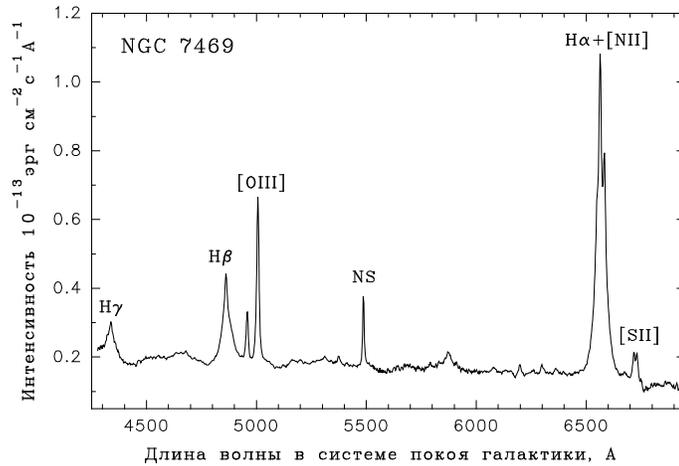


Рис. 2. Спектр NGC 7469, совмещенный по двум областям $H\alpha$ и $H\beta$ и усредненный по нескольким датам наблюдения

3.4 Масштабирование спектров

Одним из очень важных этапов обработки спектров является масштабирование спектров по потокам в абсолютных энергетических единицах. В качестве калибровочного источника в области 4300–5600 \AA обычно используется линия запрещенного кислорода $[OIII]5007 \text{ \AA}$, поскольку она образуется в области с довольно низкой плотностью и настолько далеко от центрального переменного источника, что поток в узких запрещенных линиях остается постоянным на протяжении нескольких десятков лет. Значение потока в линии $[OIII]5007 \text{ \AA}$ в абсолютных единицах получается из специальных наблюдений в самые хорошие в фотометрическом отношении ночи. Такой способ масштабирования достаточно прост и надежен и позволяет иметь все потоки в абсолютных единицах. Применяемый способ калибровки по запрещенной линии страдает тем недостатком, что ошибки при измерении потока в линии $[OIII]5007 \text{ \AA}$ одинаково искажают измерения потока как в исследуемых линиях, так и в континууме, что может приводить к коррелированным ошибкам. В свою очередь, ошибки в проведении непрерывного спектра тоже искажают потоки в эмиссионных линиях, и это может привести к антикоррелированным ошибкам. Поэтому требуются специальные исследования на коррелированность ошибок или их отсутствие. Кроме того, к исходному ряду спектров применялась процедура оптимизации, позволяющая приводить спектры к одному спектральному разрешению. В результате получался новый ряд спектров, у которых не только потоки, но и полуширины линии $[OIII]5007 \text{ \AA}$ одинаковы.

Точность измеренных значений потоков в линии $H\beta$ в среднем составляет 7–8 %, а точность потоков в $H\alpha$, получаемых в настоящее время с ПЗС-матрицами, составляет 2–3 %. Не следует, однако, забывать, что большая часть спектрального материала, полученного для сейфертовских галактик, относится к 1972–1986 гг., когда в астрономических учреждениях мира еще никто не работал с ПЗС-матрицами, и в те годы эти данные вполне соответствовали самым высоким мировым стандартам. Подробно описанная здесь процедура обработки спектров являлась только прелюдией к анализу потоков другими методами, например методом регрессионного, автокорреляционного (ACF) и кросс-корреляционного (CCF) анализа или методом реверберационного картирования.

На начальном этапе работы еще без компьютеров для измерения эквивалентных ширин эмиссионных линий использовался планиметр. Петр Григорьевич Куликовский подарил мне большой старинный планиметр, который позволял измерять площади с хорошей точностью. На рис. 1 при-

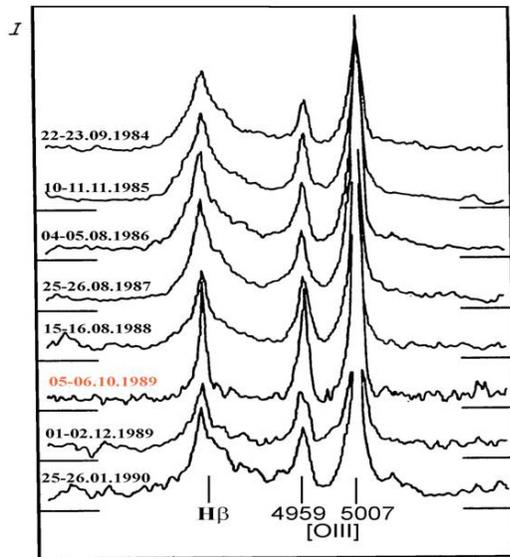


Рис. 3. Спектры NGC 7469 после исчезновения широкого компонента линии $H\beta$

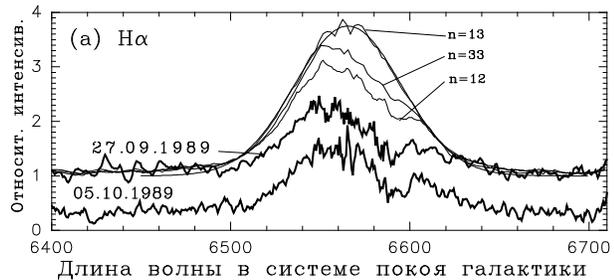


Рис. 4. Спектры NGC 7469 в области $H\alpha$ после вычета узких линий [NII]

водится сравнение эквивалентных ширин линии $H\beta$ в NGC 7469, выполненные и планиметром, и с помощью программы SPE, созданной С.Г. Сергеевым. Согласие вполне хорошее.

Но постепенно стали появляться персональные компьютеры. И обработка оцифрованных на микрофотометрах спектров с 1992 г. стала проводиться с помощью программы SPE.

Перейдем теперь к результатам исследования спектров, полученных на ЗТШ.

4 NGC 7469

Первые результаты обработки спектров NGC 7469 были доложены на конференции в Бюракане в 1988 г.

На рис. 2 приводится спектр NGC 7469, совмещенный по двум областям $H\alpha$ и $H\beta$ и усредненный по нескольким датам наблюдения.

4.1 Исчезновение широкого компонента в линии $H\beta$

Обычно в спектрах сейфертовских галактик первого типа (Sy1) эмиссионные линии водорода состоят как бы из двух компонентов: на широкой подложке возвышается довольно узкий пик. В спектрах сейфертовских галактик второго типа (Sy2) ширина водородных линий была сравнима с шириной запрещенных линий, например, [OIII]. В конце 70-х годов считалось, что эти два типа различны по всем физическим параметрам и переход из одного типа в другой в обозримое время весьма проблематичен. Однако в сентябре-октябре 1989 г. К.К. Чуваев обнаружил исчезновение широкой подложки в линии $H\beta$. Этот компонент появился вновь в декабре 1989 г. На рис. 3 показаны несколько спектров NGC 7469 до и после этого события (Чуваев и др., 1990).

Следует отметить, что в то время, когда в $H\beta$ был виден только узкий компонент, линия $H\alpha$ продолжала оставаться довольно широкой, хотя и несколько более узкой, чем обычно. Это видно на рис. 4.

Выяснилось, что эволюция линии $H\beta$ от вида, подобного галактикам Sy1 до вида, похожего на галактики Sy2, и обратно, произошла между концом августа и началом декабря 1989 г., т. е. эта

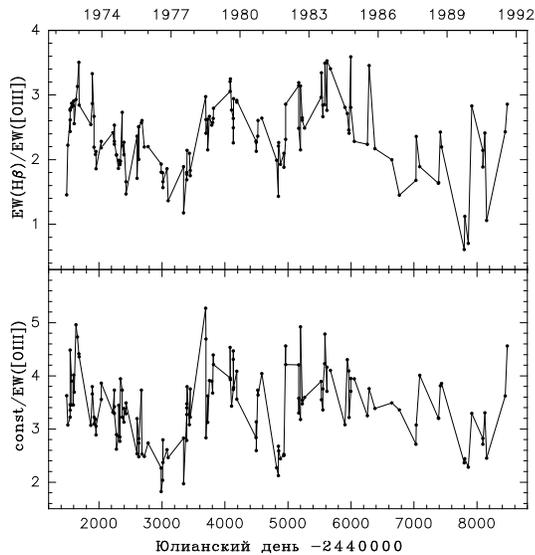


Рис. 5. NGC 7469. “Кривые блеска” в линии $H\beta$ и в континууме

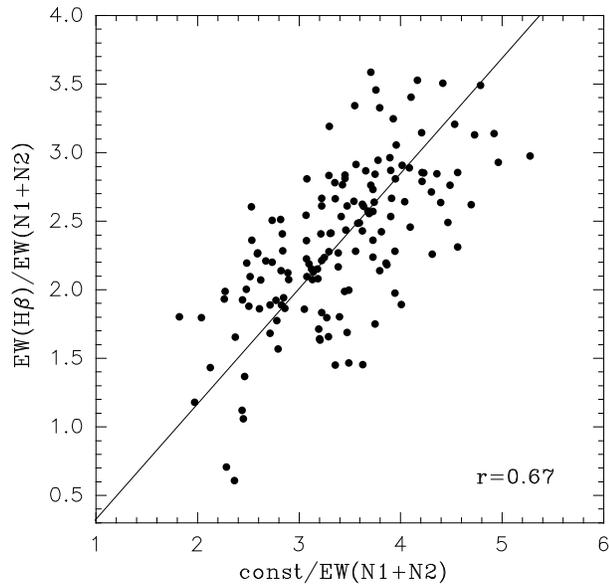


Рис. 6. NGC 7469. Корреляция между величинами, пропорциональными потокам в линии $H\beta$ в континууме

перестройка спектра длилась не более 3.5 месяцев. К этому времени было известно 6 объектов, которые могли быть то Sy1, то Sy2: NGC 7603 (Толайн и Остерброк, 1976), NGC 4151 (Лютый и др., 1984; Пенстон и др., 1984), 3C 390.3 (Хекман и др., 1981) NGC 1566 (Аллоин и др., 1985), Mrk 1018 (Козэн и др., 1986). Но у NGC 7469 время перехода из одного состояния в другое было самым коротким.

4.2 Исследование спектров, полученных в 1972–1990 гг.

Дальнейшее исследование спектров 1972–1990 гг. касалось поведения водородных эмиссионных линий. Всего в обработку вошли 156 спектрограмм. Была сделана попытка получить интенсивности эмиссионных линий водорода и соединить спектры в голубом и красном участках. Масштабирование спектров осуществлялось по интенсивностям узких линий [SII] и [OIII], которые были взяты из опубликованных работ. В некоторых случаях спектры совмещались по перекрывающимся участкам. Пример спектра, совмещенного из двух участков, показан на рис. 2.

В результате исследования водородного спектра NGC 7469 по наблюдениям 1972–1990 гг. (До-рошенко и др., 1994) было получено, что в NGC 7469 меняется:

1. Не только интенсивность, но и вид контуров разрешенных эмиссионных линий (рис. 3 и 4).
2. Меняется степень асимметрии широкого компонента водородных линий, уменьшаясь к более высоким членам водородной серии. Корреляции степени асимметрии с яркостью ядра не обнаружено. Широкая линия $H\alpha$ иногда выглядит симметричной, но в большинстве случаев (70 %) она асимметрична: синее крыло спадает круче красного (рис. 4). Асимметрия линии $H\beta$ наблюдалась в половине случаев, а $H\gamma$ была почти всегда симметрична. Исследования Вестина (1984, 1985) показали, что в эмиссионной линии $Ly\alpha$ в NGC 7469 голубое крыло **всегда** спадает круче красного.

Асимметрия контура связана со структурой и кинематикой газа в области образования широких линий. Распределены ли облака сферически-симметрично, или собраны в диск, или имеют

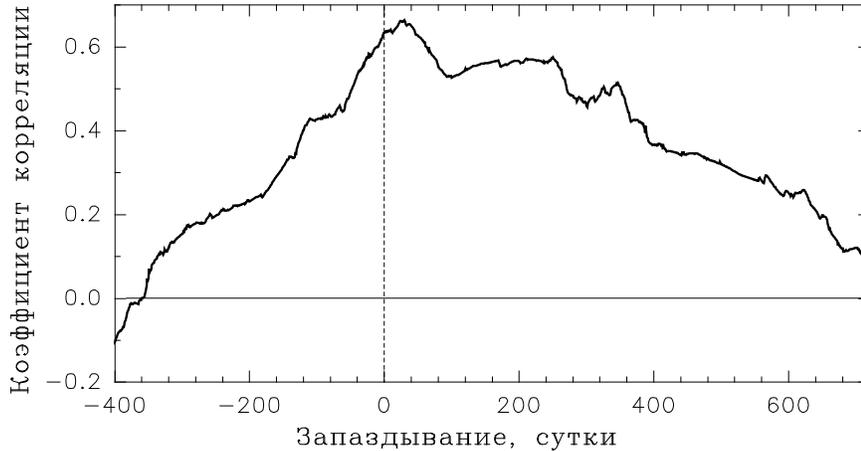


Рис. 7. NGC 7469. Кросс-корреляционная функция для линии $H\beta$ и континуума

одномерное распределение в виде струй, наблюдаем ли мы разлет облаков, их вращение или аккрецию – все это может существенно влиять на профиль широких линий. Непрозрачные облака также способны обеспечивать асимметрию контура.

3. Возможно, что полуширины широких компонентов более высоких членов бальмеровской серии больше, чем полуширины низких членов. В среднем $\text{FWHM}(H\alpha) \approx 3100$ км/с, $\text{FWHM}(H\beta) \approx 3700$ км/с, а $\text{FWHM}(H\gamma) \approx 3900$ км/с. Некоторые исследователи объясняли это существованием 2-х подобластей с разными физическими условиями. Однако, возможно, это связано с высокой плотностью газа в облаках ($n_e > 10^9$ см $^{-3}$), а облака с более высокой плотностью расположены ближе к центральному источнику и эффективнее излучают в высоких членах бальмеровской серии.
4. Широкие компоненты линий смещены относительно узких в красную сторону на 100–170 км/с. Возможно, у более высоких членов бальмеровской серии смещение больше, чем у низких членов. Предполагается, что это связано с динамическим различием областей образования узких и широких линий.
5. Изменение величин $W(H\beta)/W([OIII]5007)$ и $\text{const}/W([OIII]5007)$ в зависимости от времени представлено на рис. 5. Эти отношения являются аналогом кривых блеска в линии $H\beta$ и в континууме, поскольку предполагается, что поток в линии $[OIII]5007 \text{ \AA}$ не меняется в течение рассматриваемого временного интервала.

Интенсивность широких водородных линий меняется коррелированно с изменением континуума (рис. 6). Запаздывание, определяемое по этим данным, составляет примерно 10 дней: 9.1 дня по центроиду CCF и 10 дней по пику CCF. Кросс-корреляционная функция показана на рис. 7. Во время очень плотного 2-х месячного оптического мониторинга NGC 7469 в рамках международной программы в июне-июле 1996 г. по ПЗС-спектрам в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ было получено запаздывание относительно континуума, равное 5.0 ± 1.3 и 4.8 ± 1.1 день (Колье и др., 1998). Как видим, запаздывание, определенное нами, и полученное другими исследователями по спектрам более высокого качества, вполне сопоставимо.

6. Когда удавалось совместить часть спектров в области $H\alpha$ и $H\beta$, то мы смогли оценить бальмеровский декремент (BD), который представлен на рис. 8. Бальмеровский декремент, определяемый по узким линиям (кружки на рис. 8), подобен BD SyG 2-го типа. Он существенно отличается от BD, определяемого по широким линиям (треугольники), который более пологий, чем декремент по узким линиям. Действительно,
 - BD по узким линиям в NGC 7469 после учета небольшого поглощения до NGC 7469 ($E(B - V) = 0.17$) составляет $H\alpha:H\beta:H\gamma = 3.8:1:0.34$.
 - BD по широким линиям после учета поглощения составляет $H\alpha:H\beta:H\gamma = 2.2:1:0.66$.

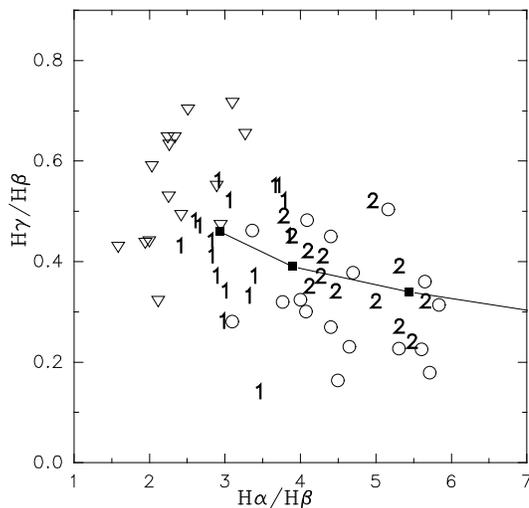


Рис. 8. NGC 7469. Бальмеровский декремент для широкого (треугольники) и узкого (кружки) компонентов водородных линий. Сплошная линия, проходящая через квадраты, показывает рекомбинационный бальмеровский декремент для случая B и $A_V = 0, 1, 2^m$. Значками 1 и 2 представлены декременты в некоторых сейфертовских галактиках 1 и 2 типов

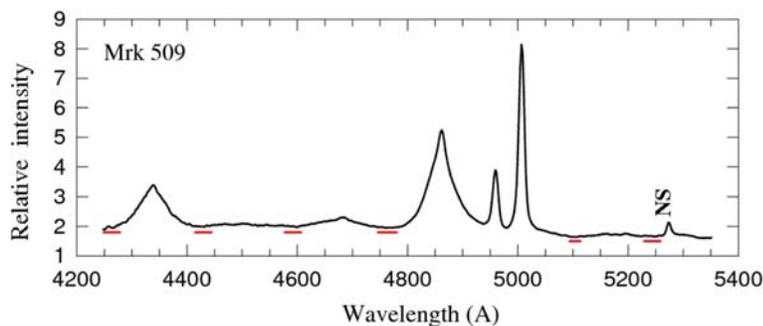


Рис. 9. Мкп 509. Спектр, усредненный по всем наблюдениям 1972–1993 гг.

На основании расчетов Ферланда и Мушотского (1982), Квана и Кролика (1981), Занга и Пуэттера (1990) мы заключили, что декремент, определяемый по широким компонентам, свидетельствует о высоких плотностях ($n_e \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$) в зоне образования водородных эмиссионных линий.

5 Маркарян 509 в 1972–1993 гг. Спектрофотометрия в районе линии $H\beta$

Значительную часть этой работы Константин Константинович Чуваев докладывал на совещании рабочей группы “Активные ядра галактик” в октябре 1992 г. Но тяжелая болезнь не позволила ему самому довести работу до публикации. Мы всего лишь закончили ее. За 156 дат наблюдений было получено 254 спектрограммы в области $H\beta$. На рис. 9 показан вид спектра Мкп 509 ($z = 0.0355$). Средний спектр Мкп 509 в области $H\beta$ довольно похож на средний спектр NGC 7469, только в Мкп 509 линии FeII более слабые, а линия $H\beta$ пошире, чем в NGC 7469. Проведенный анализ спектра ядра Мкп 509 в области 4250–5350 Å в течение 1972–1993 гг. (Чуваев и др., 1997) позволил сделать следующие выводы :

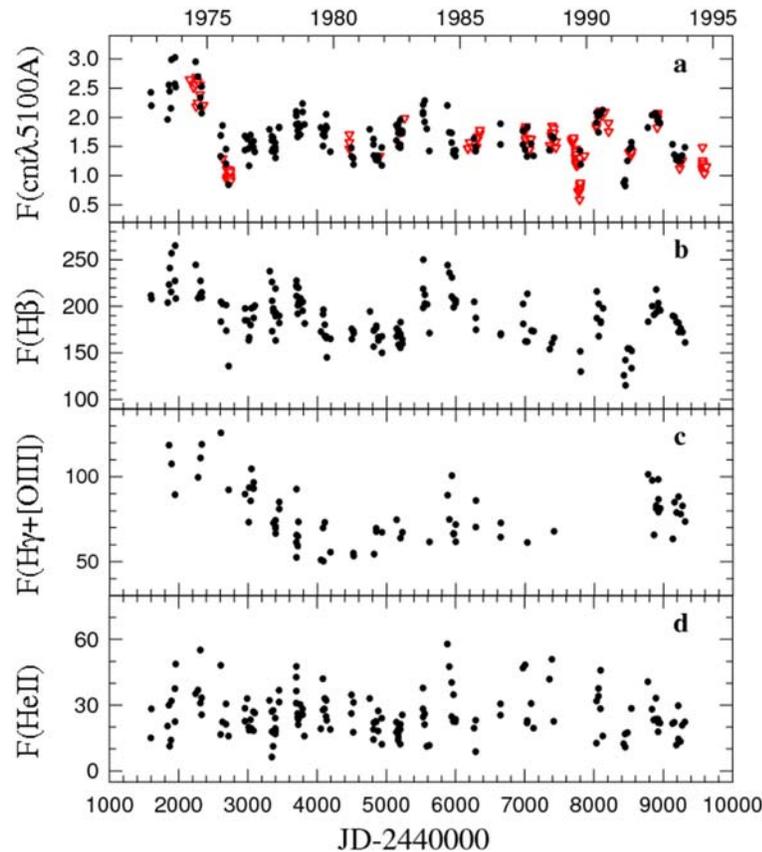


Рис. 10. Мкп 509. Сверху вниз: световая кривая в континууме на $\lambda 5100 \text{ \AA}$ (a), полученная по спектрам (заполненные кружки) и по фотометрии в полосе B (треугольники); световая кривая в линиях $H\beta$ (b), $H\gamma + [\text{OIII}] 4363$ (c) и $\text{HeII} 4686$ (d)

1. Поток в континууме и в эмиссионных линиях $H\beta$, $H\gamma$, $\text{HeII}4686$ переменен. Относительные изменения в континууме выше, чем в линиях $H\beta$ и $H\gamma$; переменность в линии HeII выше, чем в линиях водорода (рис. 10)
2. После учета вклада линии $[\text{OIII}]4363$ отношение потоков $H\gamma/H\beta$ (BD), усредненное по всему периоду наблюдений, равно 0.38 при разбросе значений от 0.22 до 0.67. Возможно, BD меняется со временем. Среднее значение BD соответствует значению для облачной модели BLR по расчетам Квана и Кролика (1981).
3. Время запаздывания, оцениваемое по центроиду CCF для всего периода наблюдений (1972–1993 гг.), равно 52 ± 11 суток, а по пику CCF – 25 ± 11 суток (рис. 11). Кросс-корреляционный и регрессионный анализы световых кривых в линии $H\beta$ и в континууме указывают, что взаимосвязь между центральным источником и областью образования широких линий (BLR) в ядре Мкп 509 меняется в течение нескольких лет. Например, запаздывание в 1977–1983 гг. оценивается $\tau_{pk} = 34\text{--}56$ дней, в 1984–1991 – $\tau_{pk} = 87$ дней и в 1992–1993 гг. – $\tau_{pk} = 70$ дней. В пределах указанных неопределенностей наши оценки неплохо согласуются с оценками запаздывания, имеющимися в литературе. Так, Кораткар и Гаскелл (1991), анализируя ультрафиолетовые спектры Мкп 509 за 1978–1987 гг., оценили запаздывание по центру масс CCF $\tau_{cn} = 74$ дня, а по максимуму CCF $\tau_{pk} = 50$ дней. С другой стороны, Петерсон и др. (1998) по оптическим спектральным наблюдениям 1988–1996 гг. получили оценку запаздывания $\tau_{cn} = 79 \pm 6$ суток и $\tau_{pk} = 86^{+1}_{-20}$ суток.
4. Как можно видеть на рис. 11, разница в запаздывании по синему и красному крылу линии $H\beta$

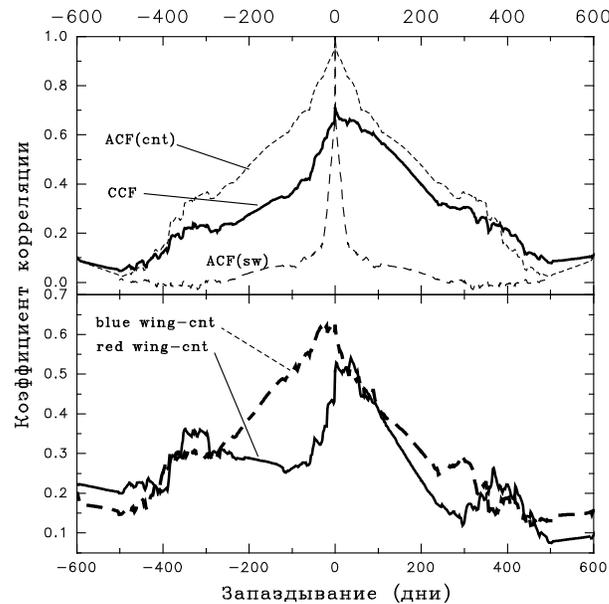


Рис. 11. Mkn 509. В верхней части рисунка представлены автокорреляционные функции континуума по спектральным данным (ACF(cnt)) и окна выборки (ACF(sw)), а также кросс-корреляционная функция между световой кривой в линии $H\beta$ и в континууме (CCF). В нижней части рисунка представлены кросс-корреляционные функции для голубого крыла линии $H\beta$ ($-5000, -1500$ км/с) с континуумом и для красного крыла линии $H\beta$ ($+1500, +5000$ км/с) с континуумом.

составляет около 30 суток: синее крыло реагирует раньше красного, т. е. присутствуют признаки радиальных движений наружу.

5. При существенных изменениях потока профили водородных линий меняются мало. Постоянная часть контура составляет по потоку более половины от всей линии (рис. 12). Переменный компонент имеет небольшую асимметрию: красное крыло немного выше синего. Максимум широкого компонента слегка смещен в коротковолновую сторону относительно стандартной волны. И так, контуры линий $H\beta$ и $H\gamma$ похожи, и при изменении потока профиль остается подобным самому себе. Другими словами, вариации полного потока доминируют над вариациями профиля линии, что можно объяснить большой толщиной BLR.
6. Линия $HeII4686$ асимметрична (рис. 12), что, возможно, обусловлено блендированием с неучтенными линиями других элементов. CCF-анализ показывает, что изменения потока $HeII4686$, возможно, на 10 суток опережают изменения потока в $H\beta$.

6 Исследование Akn 120 по наблюдениям 1974–1990 гг.

Анализ 100 спектров в районе линии $H\beta$ за 56 дат наблюдений, выполненный в работе Дорошенко и др. (1999), показал:

1. Вид спектра совсем иной, чем для NGC 7469 и Mkn 509: очень сильны линии ионизованного железа и слабы линии [OIII] (рис. 13).
2. Кривые блеска в континууме вблизи $H\beta$ в широком компоненте линии $H\beta$ (без линий [OIII], но с шельфом), показывают согласованное наступление максимумов и минимумов. Коэффициент корреляции потоков в линии и континууме составляет $r = 0.71 \pm 0.06$ (рис. 14).
3. На основе наших наблюдений в течение 1974–1990 гг. запаздывание реакции линии $H\beta$ на изменения в континууме составляет 34–54 дня. Это не противоречит оценкам, по имевшимся на

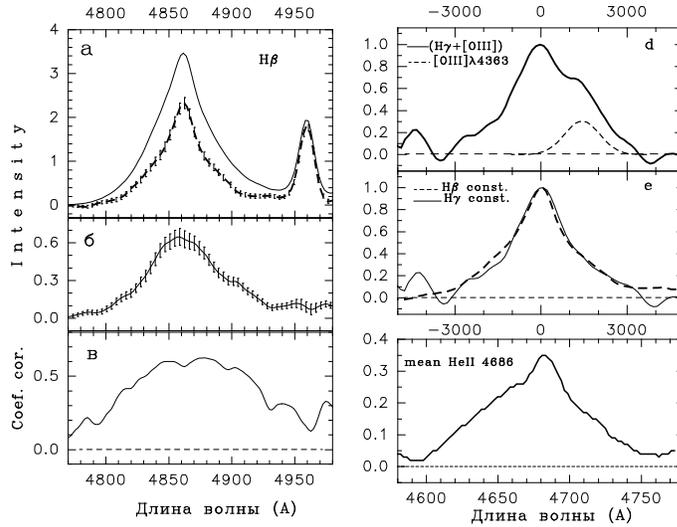


Рис. 12. Мкп 509. (а). Наблюдаемый средний контур $H\beta$. Жирной линией показана постоянная часть контура, не меняющаяся во времени. Часть контура $H\beta$, меняющаяся коррелированно с континуумом, и коэффициент корреляции вдоль линии $H\beta$ показаны на рис. (б) и (с). На рисунке (д) представлен контур линии $H\gamma + [\text{OIII}]4363$, а на рис. (е) – постоянная часть контура $H\gamma$ (тонкая линия), которая сравнивается с постоянной частью контура $H\beta$. Ниже представлен усредненный контур линии $\text{HeII} 4686$

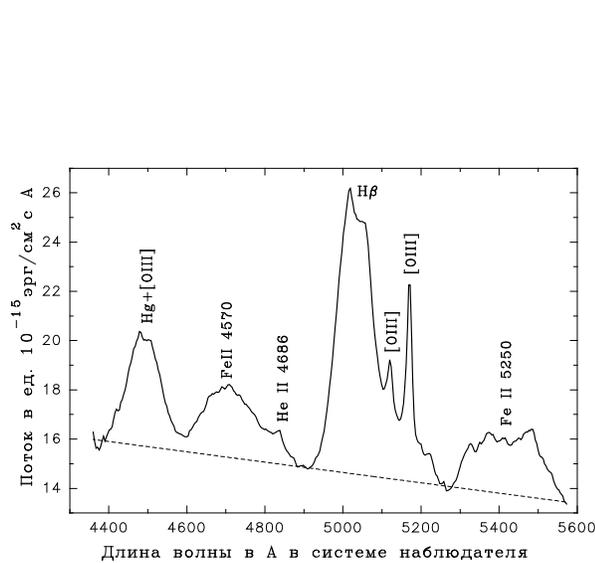


Рис. 13. Акп 120. Общий вид спектра

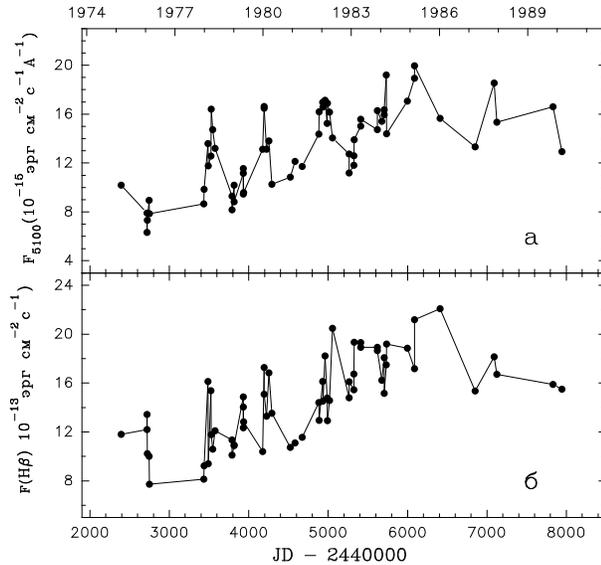


Рис. 14. Акп 120. Световые кривые в континууме (верхняя часть рисунка) и в линии $H\beta$

те годы литературным данным, а также последующим оценкам, основанным на матричных спектральных наблюдениях в 1989–1996 гг. (Петерсон и др., 1998). Кросс-корреляция потока в крыльях $H\beta$ по отношению к потоку в континууме дает указание на аккрецию вещества, ответственного за излучение в линии (рис. 15).

4. В контуре линии $H\beta$, даже после учета линий $[\text{OIII}]$, наблюдается заметная асимметрия: красное крыло всегда более протяженное. Контур систематически смещен в красную сторону на величине

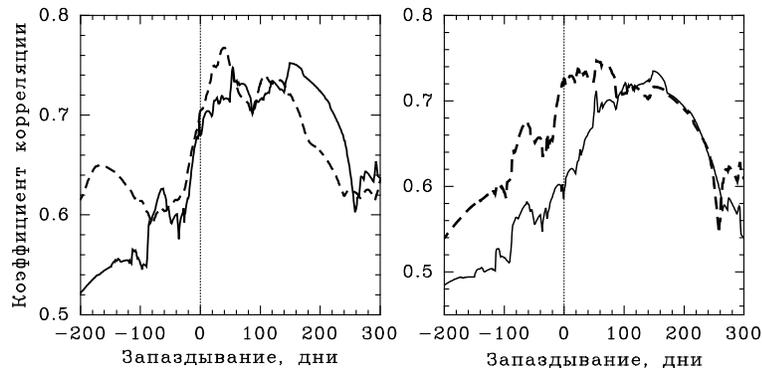


Рис. 15. Акн 120. Кросс-корреляции между потоком в линии $H\beta$ и континуумом вблизи $\lambda 5100 \text{ \AA}$. В левой части рисунка сплошной линией представлены ССФ только по нашим спектральным наблюдениям, а штриховой – ССФ по объединенным данным (нашим + данные Петерсона и др. (1989) + фотометрические данные в полосе V из работы Дорошенко и Лютого (1999). В правой части рисунка представлены корреляции для синего крыла линии $H\beta$ и континуума (сплошная кривая) и для красного крыла линии и континуума (штриховая кривая)

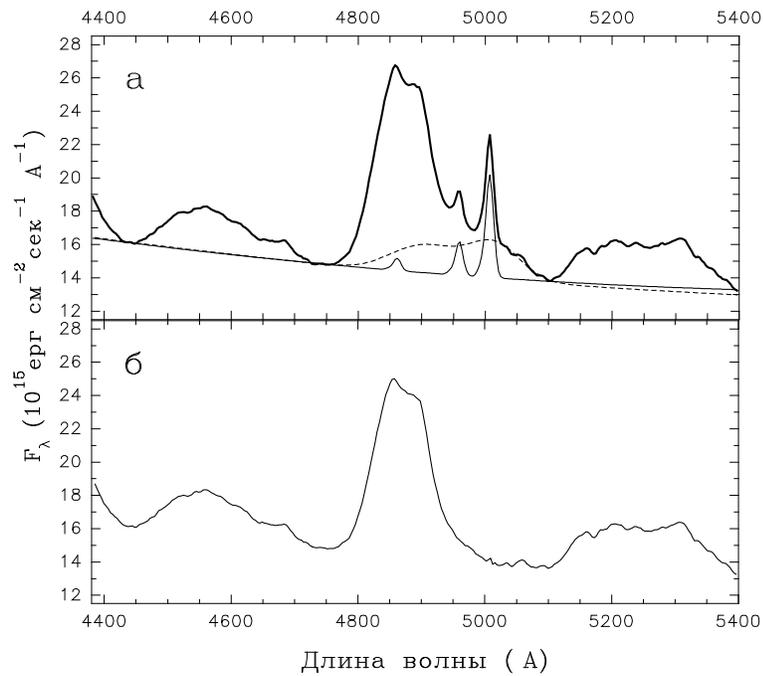


Рис. 16. Акн 120. Иллюстрация выделения линий $[OIII]$ и узкого компонента $H\beta$, а также шельфа, представляющего бленду мультиплетов $m42$, $m35$ и $m25$ линий $Fe II$. На верхней части рисунка тонкой линией показаны модель узких линий вместе с континуумом и модель шельфа $Fe II$ вместе с континуумом. На нижней части рисунка – спектр в районе $H\beta$ после вычета узких линий и шельфа

ну $370\text{--}490 \text{ км/с}$. Асимметрия контура обусловлена дополнительным излучением линий ионизованного железа ($m42$, $m36$ и $m25$). Этот вклад был учтен и выделен шельф (рис. 16). Потоки в линиях ионизованного железа, образующие шельф, а также потоки в бленде $FeII(\lambda 4570)$ меняются коррелированно с потоками в линии $H\beta$, что свидетельствует о пространственной близости зоны образования $H\beta$ и линий $FeII$.

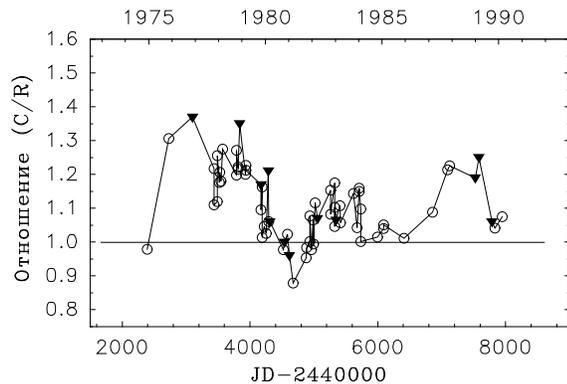


Рис. 17. Акн 120. Отношение высот центрального и красного пиков в линии $H\beta$ в зависимости от времени

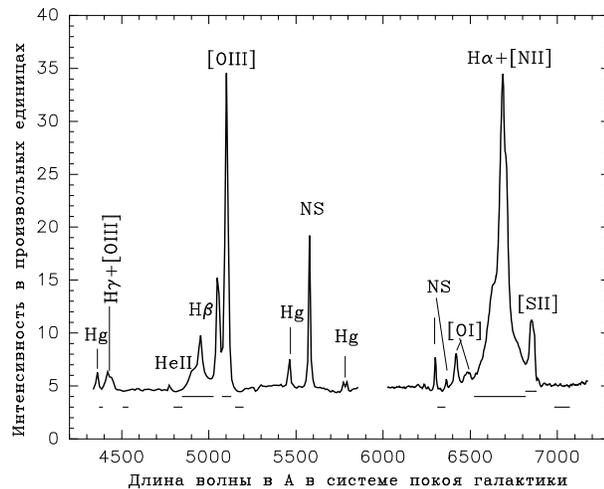


Рис. 18. Mrk 6. Общий вид спектра

5. Наши данные подтверждают переменность контура $H\beta$, известную по литературе. Переменная часть профиля имеет 2 пика. Изменения профиля $H\beta$ проявляются прежде всего в переменности соотношения интенсивностей двух главных деталей контура – двух пиков. На рис. 17 показано, как меняется во времени отношение (C/R) интенсивности центрального пика к красному пику линии $H\beta$, вычисленное в 18-ти ангстремной зоне по нашим данным (открытые кружки), а также по контурам, которые приведены в публикациях (заполненные треугольники). На рис. 17 видно, что в среднем с 1977 г. по 1981 г. отношение пиковых интенсивностей компонентов плавно менялось от состояния, когда доминировал центральный пик (1975–1976 гг.) до состояния, когда интенсивность красного пика стала преобладать (1981 г.). Следовательно, если поток в линии $H\beta$ следует за изменениями континуума, то изменения профиля происходят иначе и не коррелируют с изменениями потока в континууме или в линии. Долговременные изменения формы профиля линии $H\beta$ не могут быть связаны с эффектом реверберации. В рамках стандартной облачной модели BLR совершенно естественно существует идея об анизотропном распределении ионизованного вещества в BLR. Воспроизводимость контуров на интервале в несколько лет в большей степени может свидетельствовать в пользу повторения пространственного распределения степени ионизации газа, поскольку и распределение газа в BLR, и его кинематика вряд ли могут измениться на временах 1–2 года в такой толстой оболочке, какая, возможно, существует в Акн 120.
6. Была сделана попытка аппроксимировать контуры $H\beta$ тремя гауссовскими компонентами: коротковолновым компонентом, смещенным относительно центра на -750 км/с; длинноволновым компонентом, смещенным на $+2270$ км/с и более широким компонентом, смещенным от центра в длинноволновую сторону на 1450 км/с. Полуширины компонентов различны. Изменения контура линии, возможно, связаны с разным поведением во времени отдельных его компонентов. Возможно, потоки от разных компонентов меняются с разными временными масштабами.

7 Спектральная активность Mrk 6 в 1970–1991 гг.

В работе Дорошенко и Сергеев (2003) были проанализированы 363 спектра сейфертовской галактики Mrk 6, полученные в (1970–1991 гг.), из них 181 спектр в области $H\beta$ и 194 спектра в районе

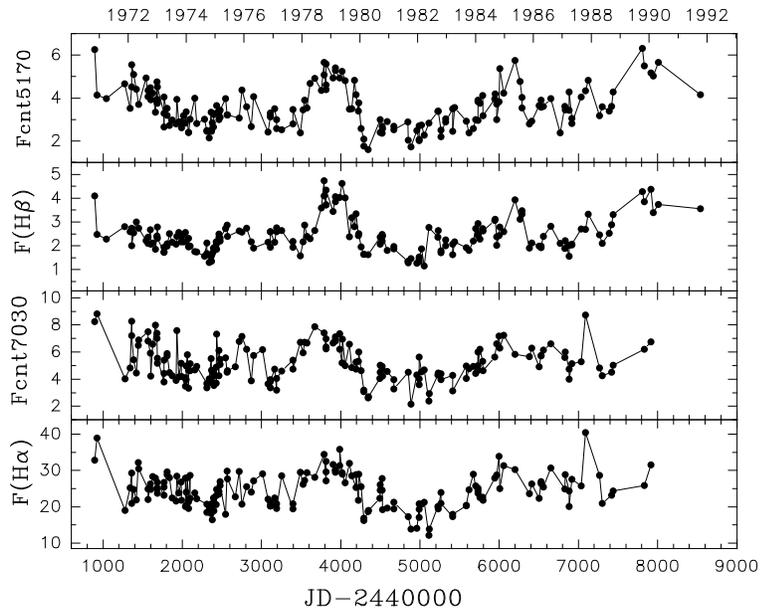


Рис. 19. Mrk 6. Кривые блеска в линиях $H\alpha$ и $H\beta$ в единицах 10^{-13} эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и в континууме вблизи λ 5170 Å и λ 7030 Å в единицах 10^{-15} эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{Å}^{-1}$

линии $H\alpha$. Усредненный спектр представлен на рис. 18. За время этого длительного спектрального мониторинга Mrk 6 было выявлено:

1. Кривые блеска в линиях $H\beta$, $H\alpha$ и в континууме вблизи этих линий показывают заметную переменность (рис. 19).
2. Положение центров эмиссионных линий $H\alpha$ и $H\beta$ и полуширины FWHM не зависят от величины потока в континууме, в то время как отношение потока в голубом крыле к красному имеет слабую тенденцию расти с увеличением потока в континууме.
3. ССФ-анализ потоков в $H\beta$ и континууме вблизи λ 5170 Å показывает запаздывание $\tau_{pk} = 13 \pm 15$ суток и $\tau_{cn} = 14 \pm 20$ суток, что неплохо согласуется с величиной запаздывания, которое ранее было определено Сергеевым и др. (1999) по CCD- спектрам 1992–1997 гг. — $\tau_{pk} = 18 \pm 2$ дня. Кросс-корреляционный анализ крыльев линии $H\beta$ не дает определенного ответа относительно кинематики BLR Mrk 6 (рис. 20).
4. Профиль $H\beta$ меняется независимо от потока в континууме. На рис. 21 представлены средние профили $H\beta$ в трех состояниях яркости. Поток в ярком состоянии в единицах 10^{-15} эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{Å}^{-1}$ был 4.5–6.6, при этом было усреднено 28 спектров, в промежуточном состоянии поток был 3.2–4.5 (84 спектра усреднено), а поток в слабом состоянии соответственно равен 1.6–3.2, 69 спектров усреднено. На нижней части рисунка эти профили нормированы так, чтобы полный поток в линии был равен 1. Нормированные профили мало чем отличаются друг от друга в этих трех состояниях яркости Mrk 6. Таким образом, мы видим, что поток меняется сильно, а изменения профиля линии малы, т. е. изменения профиля не следуют за изменениями потока в континууме и не связаны с эффектом реверберации.
5. Развернутая эволюция профиля $H\beta$ показана на рис. 22, где разности между каждым индивидуальным нормированным профилем в каждый данный момент времени и средним нормированным профилем показаны на двумерном изображении. По оси x отложена лучевая скорость относительно центра линии $H\beta$, а по оси y — время. Время реальных наблюдений показано на линейке справа. Яркие области соответствуют положительной разности, т. е. показывают превышение над средним профилем, а темные соответствуют отрицательной разности, т. е. когда индивидуальный профиль ниже среднего. Наблюдается довольно сложная картина: иногда уси-

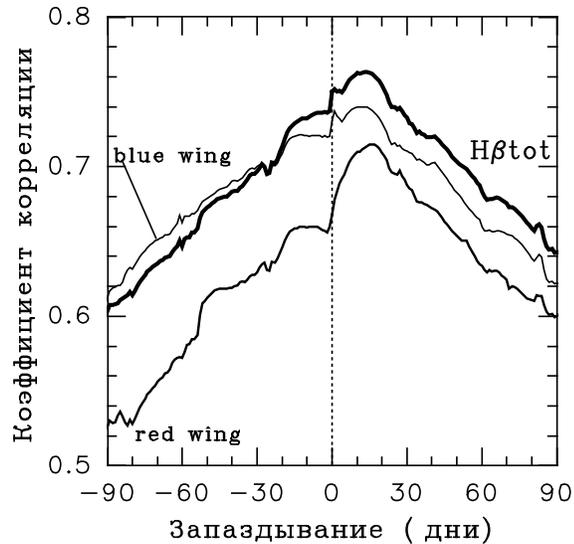


Рис. 20. Mrk 6. Кросс-корреляция между полным потоком в $H\beta$ и континуумом вблизи $\lambda 5170 \text{ \AA}$ между потоком в голубом крыле линии $H\beta$ в интервале скоростей ($-4000, -1000 \text{ км/с}$) и континууме, а также между потоком в красном крыле линии $H\beta$ в интервале скоростей ($+1000, +4000 \text{ км/с}$) и континууме

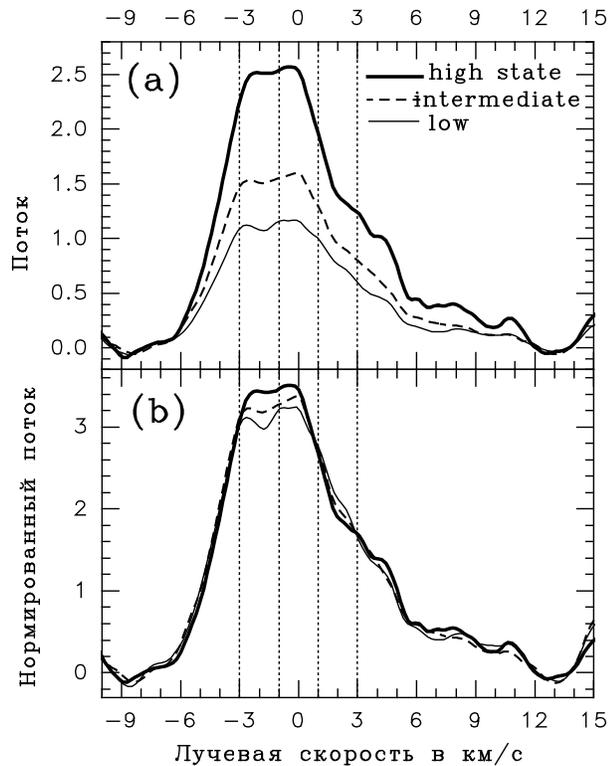


Рис. 21. Mrk 6. Усредненные профили линии $H\beta$ в трех состояниях блеска галактики в континууме показаны в верхней части рисунка. Внизу те же самые профили нормированы так, чтобы интегральный поток в линии был равен 1

лено красное крыло линии, в другие моменты усилено синее крыло линии или центральная часть. В правой части рис. 22 воспроизведено изменение профиля в рамках двухкомпонентной модели, когда переменность контура обеспечивается двумя переменными компонентами, один из которых имеет центральный пик и два довольно симметричных крыла, а второй компонент очень асимметричен, с максимумом на скоростях $\sim -2700 \text{ км/с}$ и протяженным красным крылом. У этих компонентов меняется только относительная интенсивность, а сами контуры не меняются. Возможный вид контура каждого из переменных компонентов показан на рис. 23. Хотя правая часть рис. 23 грубо воспроизводит левую, но наблюдаемая картина эволюции профиля эмиссионной линии гораздо сложнее, чем двухкомпонентная модель.

8 Исследование переменности сейфертовской галактики NGC 5548 за 30 лет, включая ЭОПные спектры Чуваева за 1972–1988 гг.

Была проделана огромная работа по включению ЭОПных спектров, полученных К.К. Чуваевым в международную базу спектров по этой галактике. Эта часть изложена в докладе Сергеева.

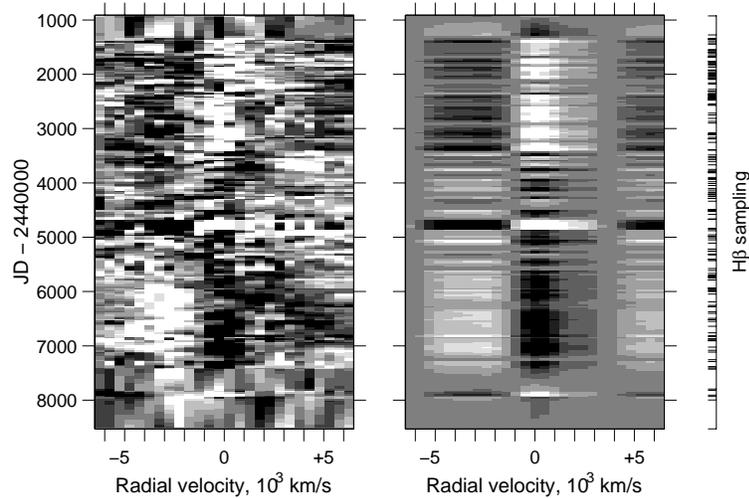


Рис. 22. Mrk 6. Эволюция разностей между индивидуальным нормированным профилем и средним нормированным профилем линии $H\beta$ на двумерном изображении. Яркие области означают положительные разности, а темные – отрицательные. Слева представлена наблюдаемая картина, а справа – подгонка к наблюдаемым профилям в рамках модели с двумя переменными широкими компонентами. Время реальных наблюдений показано на линейке справа

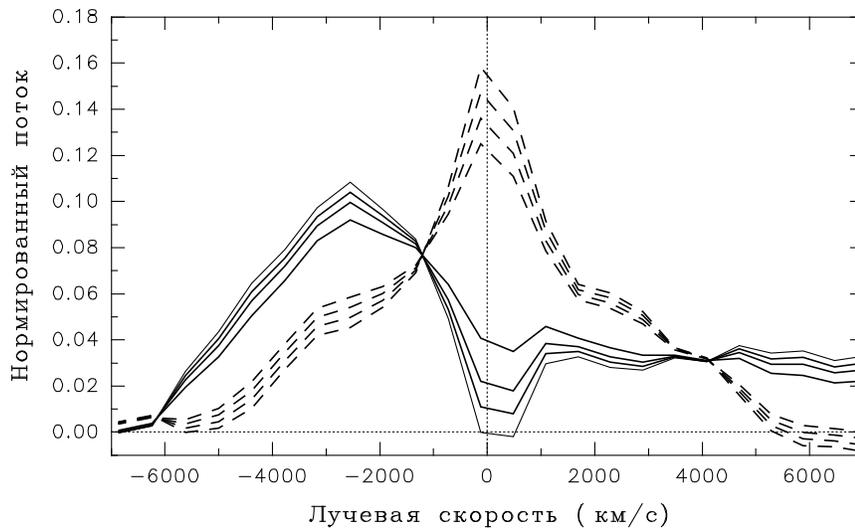


Рис. 23. Mrk 6. Возможные профили в двухкомпонентной модели для широкой составляющей $H\beta$ показаны сплошной и штриховой линией соответственно. Из непрерывного ряда возможных профилей показаны отдельные дискретные профили, включая верхнюю и нижнюю границу

9 Заключение

Все обсуждаемые в этой работе ядра сейфертовских галактик показывают весьма различные спектры в оптической области: у одних объектов запрещенные линии, например [OIII], сильны по сравнению с разрешенными линиями водорода (NGC 7469, Mrk 6, Mkn 509), у других – слабы (Akn 120); в спектре одних ядер сильны линии Fe II (Akn 120), в спектре других ядер они слабы (NGC 7469, Mrk 6, Mkn 509). При всем несходстве спектров присутствуют и некоторые характерные свойства:

поток в разрешенных эмиссионных линиях водорода и в континууме вблизи этих линий переменен в широком диапазоне временных масштабов (годы-сутки); относительная переменность в континууме больше, чем в линиях. Коррелированные изменения потока в широких линиях водорода и в континууме показывают запаздывание изменений в линиях относительно изменений в континууме от десятка суток (NGC 7469) до нескольких десятков суток (Mkn 509, Akn 120), что свидетельствует о разных размерах зон образования широких эмиссионных линий (BLR). При этом в некоторых случаях изменения потоков в линиях указывают на присутствие преимущественно хаотических или круговых движений (Mrk 6), а в других случаях имеются признаки радиальных движений наружу (Mkn 509) или признаки аккреции (Akn 120).

У всех исследованных объектов меняются не только потоки в разрешенных эмиссионных линиях, но и вид профиля линии $H\beta$. Одним из самых замечательных примеров является исчезновение широкого компонента $H\beta$ в NGC 7469 и его появление вновь 3 месяца спустя (сентябрь–декабрь 1989 г.). Широкий компонент эмиссионной линии $H\beta$ почти всегда асимметричен. Степень асимметрии разная, и она может меняться со временем (NGC 7469). Большей частью асимметрия $H\beta$ может быть объяснена наличием линий FeII с длинноволновой стороны от центра $H\beta$. В большинстве случаев широкий компонент $H\beta$ имеет заметное смещение в красную сторону относительно узкого компонента ($\Delta V \geq 100$ км/с). Изменения профиля линии, как правило, происходят на больших временах, чем упоминаемое выше время коррелированных изменений потоков, т. е. долговременные изменения профиля линии не связаны с явлением реверберации. Возможно, изменения профиля связаны с изменением пространственного распределения степени ионизации газа в BLR. В некоторых случаях можно подозревать, что изменения профиля $H\beta$ связаны с многокомпонентной структурой BLR (Mrk 6).

Таким образом, спектральный материал, полученный К.К. Чуваевым на ЗТШ, позволил провести многолетние исследования ряда сейфертовских галактик, проанализировать изменение потоков в разрешенных эмиссионных линиях и в прилегающем к ним континууме, определить время запаздывания изменений потока в эмиссионных линиях относительно изменения потока в континууме, позволил провести анализ изменений вида контура эмиссионных линий. Благодаря этим спектрам мы смогли в какой-то мере проанализировать структуру и кинематику области образования широких линий в ядрах некоторых сейфертовских галактик. И хотя в настоящее время современные приемники излучения позволяют получать спектры более высокого качества и, следовательно, вычислять потоки в линиях и континууме с меньшими ошибками, ценность обсуждаемого спектрального материала состоит в том, что длительный спектральный мониторинг сейфертовских галактик, проводимый К.К. Чуваевым на ЗТШ в 1970–1990 гг., был едва ли не единственным в мире, и по качеству, не уступающему тогдашним международным стандартам.

10 Благодарности

Эти исследования, проводимые в течение многих лет, в разное время были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) No 97-02-16064, 97-02-17625, 00-02-16272, 03-02-17123 и 06-02-16843.

Литература

- Аллоин и др. (Alloin D., Pelat M., Phillips M., Whittle M.) // *Astrophys. J.* 1985. V. 288. P. 205.
 Вестин (Westin B.A.M.) // *Astron. and Astrophys.* 1984. V. 132. P. 136.
 Вестин (Westin B.A.M.) // *Astron. and Astrophys.* 1985. V. 151. P. 137.
 Дорошенко и др. (Дорошенко В.Т., Сергеев С.Г., Чуваев К.К.) // *Астрон. журн.* 1994. Т. 71. №. 2. С. 200.
 Дорошенко, Лютый (Дорошенко В.Т., Лютый В.М.) // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. №. 12. С. 883.

- Дорошенко В.Т., Сергеев С.Г., Проник В.И., Чуваев К.К. // Письма в Астрон. журн. 1999. Т. 25. №. 9. С. 658.
- Дорошенко и Сергеев (Doroshenko V.T., Sergeev S.G.) // *Astron. and Astrophys.* 2003. V. 405. P. 909.
- Зенг и Пуэттер (Zheng W., Puetter R.C.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 361. P. 40.
- Кван и Кролик (Kwan J., Krolik J.H.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 250. P. 478.
- Колье и др. (Collier S.J., Horne K., Maoz D., et al.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 500. P. 162.
- Кораткар и Гаскелл (Koratar A.P., Gaskell C.M.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1991. V. 75. P. 719
- Коэн и др. (Cohen R.D., Rudy R.J., Puetter R.C., et al.) // *Astrophys. J.* 1986. V. 311. P. 135.
- Лютый и др. (Лютый В.М., Окнянский В.Л., Чуваев К.К.) // Письма в Астрон. журн. 1984. Т. 10. С. 803.
- Петерсон и др. (Peterson et al.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 501. P. 82.
- Петерсон и др. (Peterson et al.) // *Astron. J.* 1989. V. 98. P. 500.
- Пенстон, Перес (Penston M.V., Perez E.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1984. V. 211. P. 33.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., Sergeeva E.A., Malkov Yu.F.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1999. V. 121. P. 159.
- Толайн, Остерброк (Tohline J.E., Osterbrock D.E.) // *Astrophys. J. (Letters)*. 1976. V. 210. L. 117.
- Ферланд и Мушотский (Ferland G.J., Mushotzky R.F.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 262. P. 564.
- Хекман и др. (Heckmann T.M., Miley G.K., van Breugel W.J.M., Butcher H.R.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 247. P. 403.
- Холоневский (Choloniewski J.) // *Acta. Astron.* 1981. V. 31. P. 293.
- Чуваев и др. (Чуваев К.К., Лютый В.М., Дорошенко В.Т.) // Письма в Астрон. журн. 1990. Т. 16. С. 867.
- Чуваев К.К., Дорошенко В.Т., Сергеев С.Г. и др. // Письма в Астрон. журн. 1997. Т. 23. №. 6. С. 409.