

УДК 524.7

Эволюция профиля линии $H\beta$ в спектре NGC 5548 в 1972–2001 гг.

С.Г. Сергеев

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

Поступила в редакцию 13 марта 2008 г.

Аннотация. Изложена история исследования переменности континуума и линии $H\beta$ в ядре Сейфертовской галактики NGC 5548. Основное внимание уделено исследованию переменности формы профиля этой линии, начиная с самых ранних наблюдений 70-х годов и кончая наблюдениями в рамках международного мониторинга NGC 5548 в 1989–2001 гг. Показано, что область, излучающая широкие линии (BLR), является стабильным образованием, не меняющим свои основные характеристики на протяжении десятков лет. В то же время зависимость между потоками в линии и оптическом континууме, по всей видимости, изменяется со временем, что, вероятно, вызвано изменениями в зависимости между оптическим и ионизирующим потоками континуума. Интерпретация переменности профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 и в других активных ядрах галактик в рамках только одной из существующих моделей встречает серьезные трудности. По-видимому, эта переменность вызвана рядом факторов, совместное действие которых на профиль трудно разделить.

EVOLUTION OF THE $H\beta$ LINE PROFILE IN THE SPECTRUM OF NGC 5548 IN 1972–2001, by *S.G. Sergeev*. The history of investigations of the $H\beta$ line and continuum variability in the Seyfert galaxy NGC 5548 is presented. Most attention is paid to investigations of the profile variability of this line including of the earlier observations in the 1970s and finishing the observations in terms of the international monitoring campaign in 1989–2001. It is shown that the broad-line region (BLR) is a steady formation with its basic characteristics remaining the same during dozens of years. Meanwhile, the relationship between the line and continuum fluxes probably varies with time, perhaps as a result of changes in the relationship between the optical and ionizing continuum fluxes. There are difficulties in the interpretation of the $H\beta$ profile variability in NGC 5548 as well as in other active galactic nuclei in terms of only one of the proposed models. Perhaps, this variability is caused by a number of agents making it difficult to distinguish an influence of each agent on the line profile.

Ключевые слова: галактики, активные ядра, сейфертовские галактики, эмиссионные линии, переменность, NGC 5548

1 Введение

Генерация необыкновенно мощного и переменного во времени непрерывного излучения активных ядер галактик находит свое объяснение в рамках распространенной парадигмы центрального источника, или так называемой центральной машины, которая состоит из сверхмассивной черной дыры и газового аккреционного диска. Излучение центральной машины ионизует и разогревает газ,

окружающий центральную машину, т. е. область широких линий (broad-line region, BLR), вызывая свечение в спектральных линиях с шириной на половине интенсивности от нескольких тысяч до десяти тысяч км/с. Излучательные свойства этих широких линий оказываются напрямую связаны со свойствами излучения, которое этот газ возбуждает. Исследования отклика широких эмиссионных линий в спектрах АЯГ на изменения потока в континууме дают важную информацию, касающуюся структуры и физических условий тех внутренних областей ядер, в которых происходит формирование оптического спектра.

Переменность ядер активных галактик в оптике, сначала в континууме, а затем в широких линиях, была обнаружена еще в шестидесятые-семидесятые годы прошлого века (Лютый и Проник, 1975; Видман, 1977). Однако в эти годы наблюдения АЯГ были, как правило, редкими и недостаточными для детального изучения связи между изменениями потока в континууме и широких линиях. Наконец, с конца 1980-х гг. несколько групп начали длительные спектральные и фотометрические наблюдения АЯГ (Петерсон и др., 1991; Каспи и др., 2000; Петерсон и др., 2002). Благодаря регулярному мониторингу получено большое количество наблюдательного материала, с помощью которого установлены различные соотношения между многими характеристиками внутренних областей активных ядер галактик, в том числе такие фундаментальные, как соотношения масса черной дыры-светимость и размер области широких эмиссионных линий-светимость для десятков объектов (Петерсон и др., 2004; Каспи и др., 2005).

Первым в мире, кто начал спектральные наблюдения избранных АЯГ на регулярной основе, был К.К. Чуваев и его по праву можно считать пионером спектрального мониторинга АЯГ.¹

Среди множества известных АЯГ сейфертовская галактика NGC 5548 является одной из наиболее изученных, поскольку для нее накоплено огромное количество наблюдательного материала. В частности, на протяжении 13-ти лет с 1989 по 2002 гг. проводился интенсивный международный мониторинг этого объекта в оптическом диапазоне (см. работу Петерсона и др., 2002 и ссылки в ней). Наблюдения с космических обсерваторий проводились в ультрафиолете (Клавель и др., 1991; Користа и др., 1995), жестком ультрафиолете (Маршалл и др., 1997) и рентгене (Маркович и Эдельсон, 2004). Самые последние международные кампании наблюдений NGC 5548 проводились в течение нескольких месяцев в 2005 (Бенц и др., 2007) и 2007 гг. в оптическом диапазоне длин волн.

Естественно, что из такого большого количества наблюдательного материала было получено много важных научных результатов. Я расскажу о некоторых из этих результатов, в том числе о результатах, полученных нашей группой в КрАО. Особенное внимание будет уделено исследованию долговременной эволюции профиля линии $H\beta$ на основе архивных спектров NGC 5548, полученных К.К. Чуваевым, и спектров, полученных в рамках программы международного мониторинга NGC 5548 в 1989–2001 гг.

2 Некоторые результаты исследований переменности ядра NGC 5548

2.1 Эхо-картирование

Эхо-картирование (Блэндфорд и МакКи, 1982; Петерсон, 1993) уже многие годы успешно используется для определения размера области BLR в АЯГ (Лютый и Черепашук, 1972; Каспи и др., 2000; Петерсон и др., 2002). Размер BLR-области в данной линии определяют по запаздыванию изменений потока в этой линии относительно изменений потока континуума. На рис. 1 показаны кривые блеска линии $H\beta$ и оптического континуума в спектре ядра NGC 5548 по данным международного мониторинга (Петерсон и др., 2002). В среднем запаздывание составляет около 20 дней, то есть размер BLR-области составляет 20 световых дней. В то же время скорость газа, излучающего линию $H\beta$, можно оценить по ширине линии $H\beta$. Из размера и скорости в предположении гравитационно доминированного движения газа мы можем найти массу центральной черной дыры. Такие оценки массы получили название “реверберационных”. Для ядра NGC 5548 взвешенная по множеству

¹ Первые спектральные наблюдения АЯГ и некоторых других объектов начались летом 1970 г. Всего с 1970 по 1991 гг. было получено несколько тысяч спектров более чем пятидесяти АЯГ. Из них регулярно наблюдались примерно 12 АЯГ. В 1992 г. Чуваев продолжил наблюдения АЯГ с ПЗС-камерой.

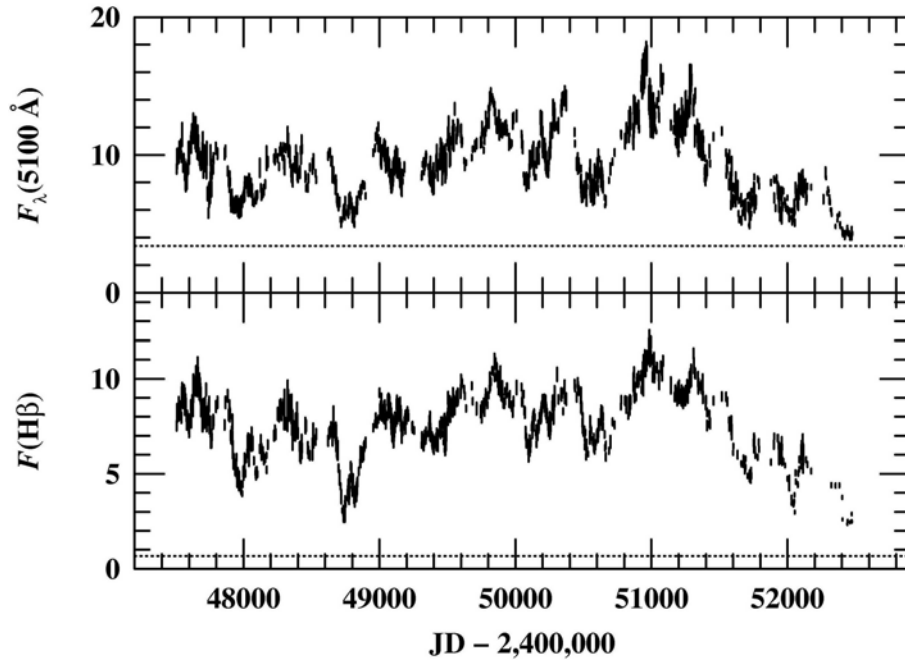


Рис. 1. Кривые блеска линии $H\beta$ (внизу) и оптического континуума (вверху) в NGC 5548 по данным международного мониторинга (Петерсон и др., 2002). Горизонтальные пунктирные линии соответствуют вкладу постоянных составляющих: вкладу подлежащей галактики в континуум и вкладу узкой линии $H\beta$ в широкую линию $H\beta$

наблюдений в линии $H\beta$ и некоторых других линиях реверберационная масса центральной черной дыры составляет около $6.5 \times 10^7 M_{\odot}$ (Бенц и др., 2007).

Кроме того, было показано, что запаздывание в линии $H\beta$ меняется со временем, причем величина запаздывания зависит от потока в континууме. Согласно Петерсону и др. (2002), эта зависимость почти линейная, а согласно недавним результатам (Бенц и др., 2007) – более пологая: $\tau \propto L^{0.66}$, где τ – запаздывание, а L – светимость ядра (рис. 2). Таким образом, область BLR меняет свой размер. Чем ярче континуум, тем дальше область свечения линии отодвигается от центрального источника. При этом должна меняться и ширина линии, поскольку в предположении гравитационно доминированного движения излучающего линию газа, скорость обратно пропорциональна корню квадратному из расстояния. Тогда ширина линии σ , характеризующая скорость, должна быть связана с запаздыванием линии τ , характеризующей размер, как $\sigma \propto \tau^{-0.5}$. Наблюдаемая зависимость между σ и τ представлена на рис. 2 и она хорошо согласуется с ожидаемой зависимостью: $\sigma \propto \tau^{-0.46 \pm 0.07}$. Этот результат подтверждает предположение о том, что динамика газа в области BLR в основном определяется силами гравитации.

2.2 Связь между переменностью континуума от рентгена до оптики

По данным с космических обсерваторий IUE и Hubble была найдена зависимость между потоками в ультрафиолетовом (вблизи линии $Ly\alpha$) и оптическом (около $\lambda 5100 \text{ \AA}$) континуумах для NGC 5548. Петерсон и др. (2002) получили следующую зависимость: $F_{opt} \propto F_{UV}^{0.56}$, а в более поздней работе Бенца и др. (2007) эта зависимость получилась несколько более крутой: $F_{opt} \propto F_{UV}^{0.84}$. В обеих работах зависимость получилась нелинейной – изменения потока в ультрафиолете происходят с большей амплитудой, чем изменения потока в оптике. Принимая во внимание связь между запаздыванием в линии $H\beta$ и потоком в оптическом континууме, о которой говорилось выше, и так как ультрафиолетовый континуум вблизи $Ly\alpha$ – это почти континуум, ионизирующий водород, получим, что

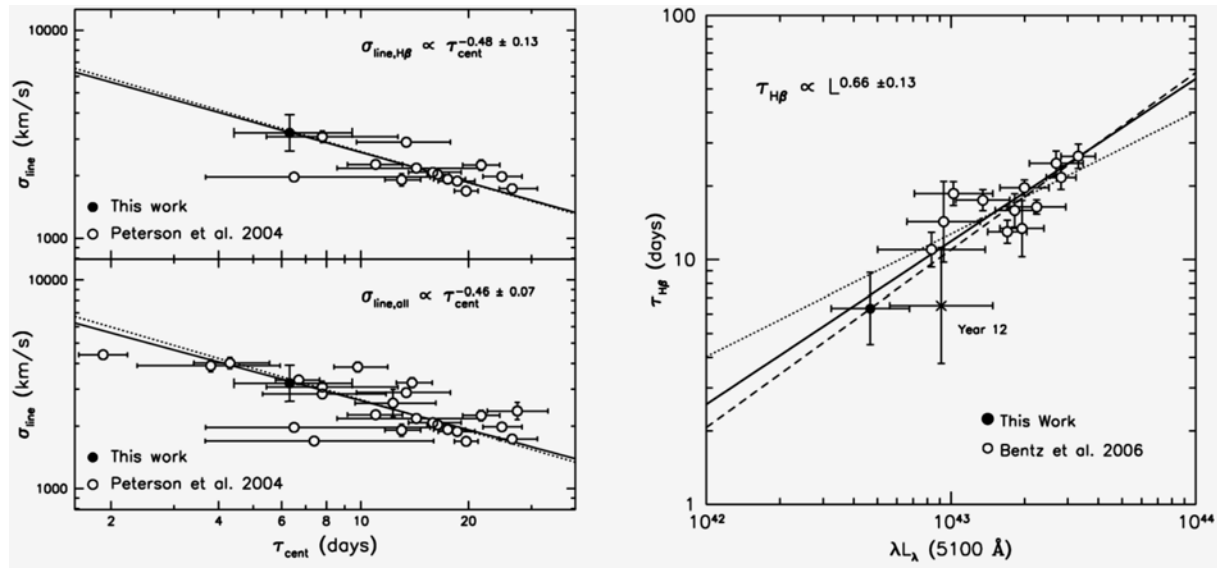


Рис. 2. Зависимость между запаздыванием линии H β в NGC 5548 и потоком в континууме (справа) и зависимость между шириной линии и запаздыванием линии (слева). Верхний левый рисунок показывает все измерения, сделанные по линии H β , а нижний левый рисунок – все имеющиеся измерения по всем линиям. Рисунок взят из работы Бенца и др. (2007)

запаздывание линии H β приблизительно пропорционально корню квадратному от потока ионизирующего излучения (Петерсон и др, 2002; Бенц и др., 2007).

Согласно Гоуд, Користа и Книдж (2004), поток в линии H β зависит от потока в оптическом континууме как $F(H\beta) = F_{cont}^\alpha$, где $\alpha = 0.526 \pm 0.022$ или чуть больше, если при аппроксимации этой зависимости считать известными постоянные составляющие, которые определяются независимыми методами. Таким образом, зависимость потоков в линии H β и в континууме нелинейна. Принимая во внимание связь между оптическим и ионизирующим излучением (см. выше), зависимость потока в линии H β от потока ионизирующего излучения должна быть еще более пологой, чем зависимость от излучения оптического. Кроме того, некоторые авторы полагают, что эта зависимость может меняться со временем. В частности, Гоуд, Користа и Книдж (2004) определили показатель степени α для каждого года 13-летнего международного мониторинга NGC 5548 и заключили, что этот показатель меняется со временем и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением потока в континууме. Эта отмеченная ими тенденция согласуется с фотоионизационными расчетами (Користа и Гоуд, 2004).

Рентгеновская переменность АЯГ обычно более быстрая, чем переменность в оптике, и имеет заметно превосходящую относительную амплитуду. В то время как кривые блеска АЯГ в оптике и ультрафиолете, хотя и не являются идентичными, но всегда показывают высокую корреляцию, переменность в рентгене коррелирует с оптической переменностью слабее или вообще не коррелирует. Однако тот факт, что во многих АЯГ корреляция между оптикой и рентгеном безусловно существует, говорит о наличии механизма переработки излучения из одного спектрального диапазона в другой. Спектральный диапазон, изменения в котором происходят раньше всего, и будет являться тем первичным диапазоном, который вызывает коррелированные изменения в других спектральных диапазонах. Например, в довольно распространенной модели оптическое излучение возникает в аккреционном диске, который разогревается некоторым источником рентгена, расположенным над диском. В этом случае изменения в оптике должны запаздывать относительно изменений в рент-

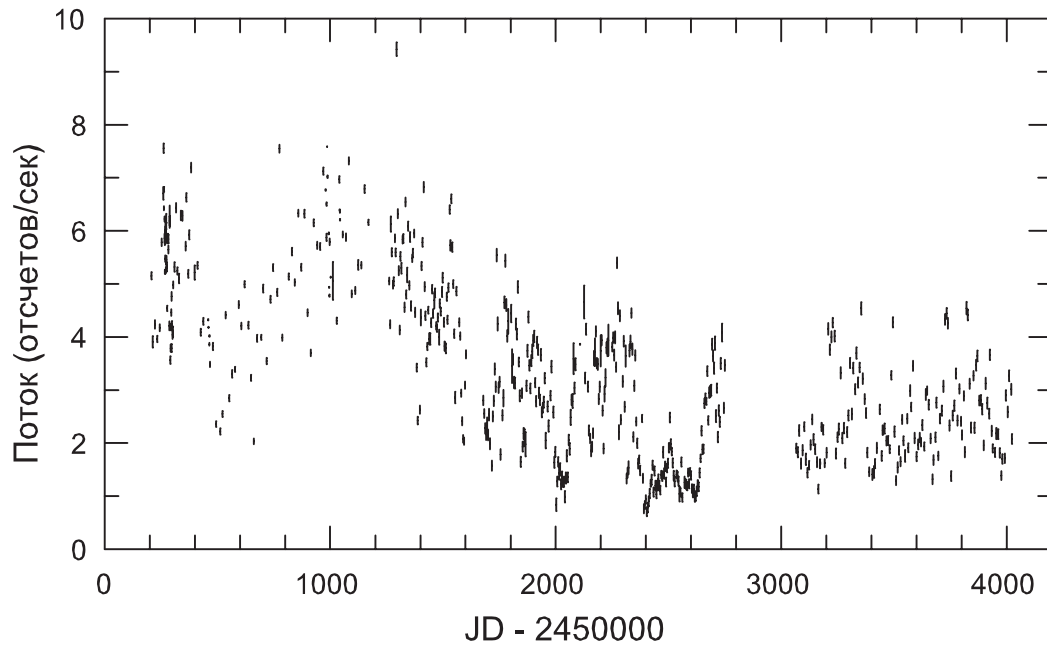


Рис. 3. Рентгеновская кривая блеска ядра NGC 5548 в диапазоне 2–10 keV по данным RXTE

гене. К сожалению, существующие оценки запаздывания между оптикой и рентгеном зачастую противоречивы и статистически недостаточно значимы.

Рентгеновская кривая блеска NGC 5548 (2–10 keV) по данным с космической обсерватории RXTE представлена на рис. 3. Среднеквадратичная амплитуда рентгеновской переменности составляет 48 %, а амплитуда оптической переменности (рис. 1) – 25 %. Однако если учесть вклад подстилающей галактики в оптический поток, то эти амплитуды, в отличие от большинства других АЯГ, станут почти равными. Согласно предварительным результатам, полученным в КраО, изменения в оптике в ядре NGC 5548 хорошо коррелируют с изменениями в рентгене ($r = 0.725$) и запаздывают относительно последних на ≈ 3 дня. К сожалению, оценка запаздывания статистически недостаточно значима. Вероятность, что это запаздывание больше нуля, составляет 92.3 %.

2.3 Переменность профиля широкой линии $H\beta$ в NGC 5548

Уже довольно давно было замечено (Андерсон, 1971; Чуваев, 1987), что профили широких эмиссионных линий в ядре NGC 5548 сложные и сильно переменные. Из всех широких линий в спектре ядра NGC 5548 лучше всего изучена линия $H\beta$, поскольку для нее было получено наибольшее количество наблюдательных данных. Пример сильных изменений профиля этой линии показан на рис. 4, взятом из работы Чуваева (1987), в которой автор отметил, что в апреле 1985 г. профиль линии был практически симметричным, а всего через четыре месяца появился сильный бугор с синей стороны профиля и линия стала сильно ассиметричной. Это, пожалуй, едва ли не самые быстрые и сильные изменения, когда-либо наблюдавшиеся в профилях широких линий в спектрах АЯГ.

Если говорить об АЯГ в целом, то, как правило, интегральный поток в линии очень хорошо отслеживает изменения потока континуума, в то время как изменения профиля линии зачастую происходят совершенно независимо от изменений континуума (например, Вандерс и Петерсон, 1996).

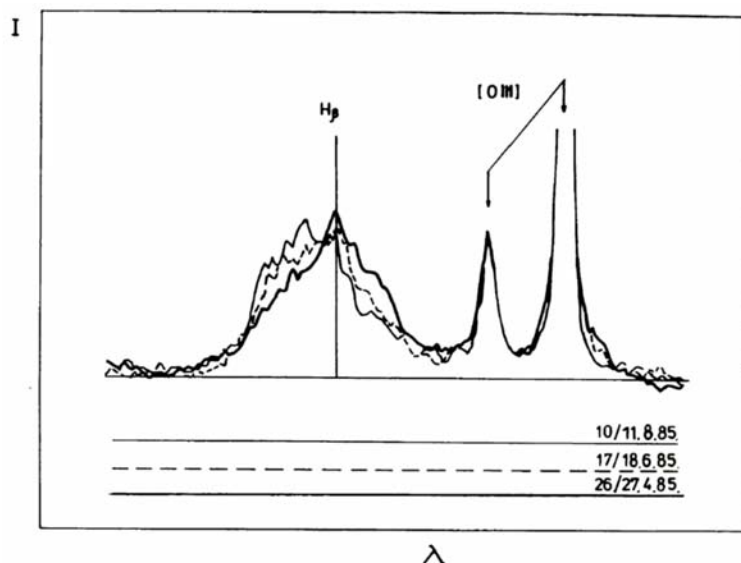


Рис. 4. Рисунок из работы Чуваева (1987), иллюстрирующий сильную переменность профиля линии $H\beta$ в спектре ядра NGC 5548

Для объяснения переменности профилей широких линий в АЯГ имеется ряд моделей BLR-области, таких как:

1. Двойная черная дыра (Гаскелл, 1983; Петерсон, 1987).
2. Небольшое количество крупных облаков, вращающихся вокруг черной дыры (Андерсон, 1971) с излучающим узконаправленно ионизирующим континуумом (Вандерс и др., 1995).
3. Биконические выбросы (Андерсон, 1971; Вейлью и Женг, 1991; Женг, Вейлью и Гранди, 1991).
4. Дискообразная модель BLR с неоднородностями поверхностной яркости диска (Женг, Вейлью и Гранди, 1991; Чакрабарти и Виита, 1994).
5. Многокомпонентная модель BLR (Стирпе и др., 1988; Петерсон и др., 1990; Сергеев и др., 2001).

Сам К.К. Чуваев считал, что сильные изменения профиля линии $H\beta$, о которых упоминалось выше, связаны с появлением на луче зрения газа, который поглотил часть излучения в красном крыле линии, что и привело к асимметрии профиля.

Теперь я перехожу к результатам нашей последней работы (Сергеев и др., 2007) по исследованию долговременной переменности профиля линии $H\beta$ в NGC 5548. В этой работе мы использовали ПЗС-спектры NGC 5548, полученные в результате 13-летнего международного мониторинга (1989–2001 гг.), фотографические спектры, полученные К.К. Чуваевым со спектрографом СПЭМ на 2.6-м телескопе им. Шайна с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП или image-tube) в 1972–1988 гг., а также спектры, полученные на 1.8-м телескопе Перкинса в США в 1984–1988 гг. (Петерсон и др., 1990) с ЭОПом и с диссекторным сканером в качестве светоприемника. Всего было использовано 827 спектров. После приведения этих разнородных данных к единой системе (следуя Петерсону и др., 1991) из широкого профиля линии $H\beta$ был вычтен узкий компонент. Эволюция широкого компонента линии $H\beta$ в виде видеопольного показана на <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~peterson/AGN/>. В качестве примера эволюции профиля широкой линии $H\beta$ я приведу средние и rms-профили этой линии за избранные годы (рис. 5).

Rms-профили – это среднеквадратичная амплитуда переменности потока линии в зависимости от длины волны. В 1975–1977 гг. средний профиль линии $H\beta$ был двугорбым с максимумом, смещенным в синюю сторону. Примерно таким же в эти годы, но с несколько менее выраженной двугорбостью, был rms-профиль. В 1985 году средний профиль стал сильно асимметричным за счет

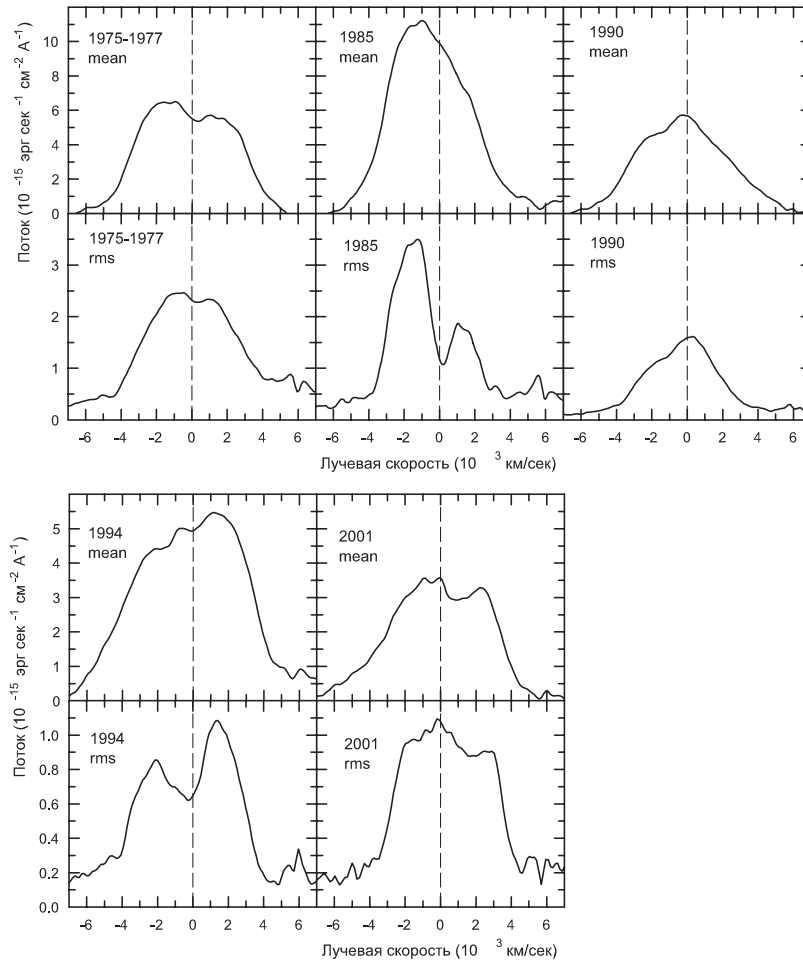


Рис. 5. Средний (mean) и среднеквадратичный (rms) профиль широкой линии $H\beta$ в спектре NGC 5548 в некоторые избранные годы наблюдений

роста синего крыла линии. При этом rms-профиль имел ярко выраженную двугорбую структуру: очень сильный синий бугор и меньший красный бугор. В 1990 году средний профиль имел протяженное и почти линейно падающее красное крыло и более крутое синее крыло, и почти таким же был rms-профиль. В 1994 году в профиле линии имелся сильный красный бугор, а rms-профиль снова стал двугорбым, то есть большая амплитуда переменности была в крыльях, а меньшая – в центральной части профиля. В 2001-ом году rms профиль имел плоскую вершину и был чуть ли не П-образным, а в среднем профиле все еще намечался красный бугор, хотя он и уменьшился. Таким образом, средние и rms-профили за отдельные годы сильно различаются.

На рис. 6 показаны изменения различных параметров профиля линии $H\beta$ за 30-летний период наблюдений ядра NGC 5548 с 1972 по 2001 гг. Из рисунка видно, что в профиле линии происходят заметные изменения на различных временных масштабах. Имеются как долговременные, так и более кратковременные изменения, как, например, изменение отношения потоков в синем и красном крыле линии всего на несколько месяцев в 1985 году, о чем уже упоминалось ранее.

Анализ переменности линии континуума и линии $H\beta$ показал, что характеристики переменности мало изменились от периода наблюдений 1972–1988 гг. к периоду наблюдений 1989–2001 гг. В

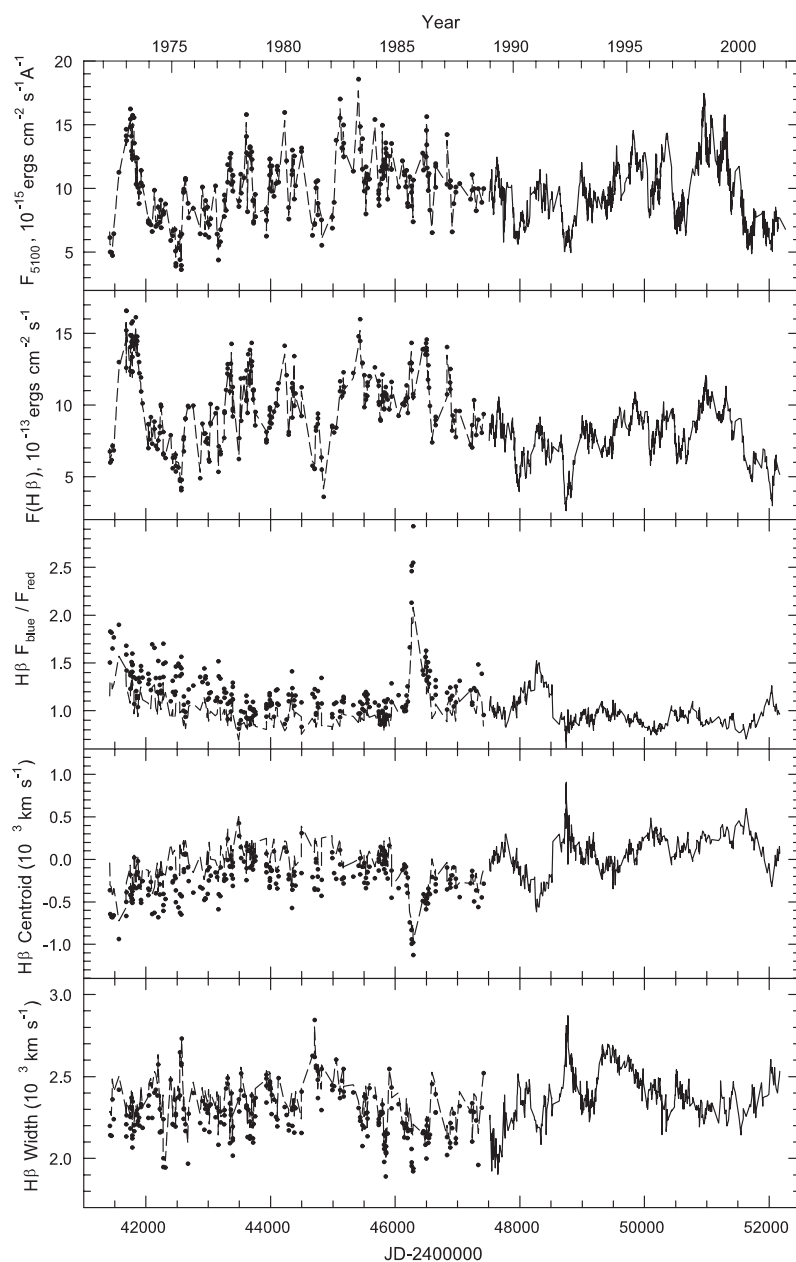
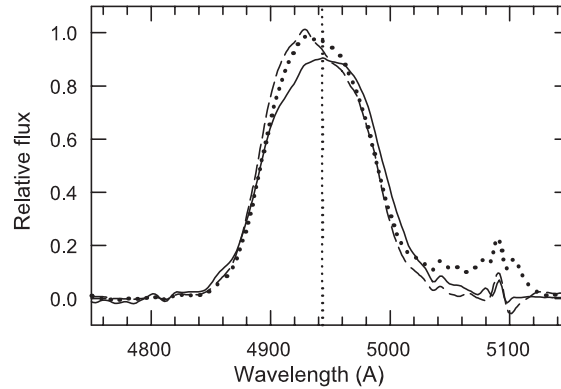


Рис. 6. Переменность оптического континуума и эмиссионной линии $H\beta$ в спектре ядра NGC 5548 за 30-летний период времени с 1972 по 2001 гг. Рисунок взят из работы Сергеев и др. (2007). Сверху вниз показаны: (1) кривая блеска континуума на длине волны 5100 \AA , (2) кривая блеска линии $H\beta$, (3) отношение потоков в синем и красном крыле линии $H\beta$, (4) центр тяжести линии $H\beta$ и (5) ширина $H\beta$, определенная как дисперсия профиля и как полная ширина на половине интенсивности. ПЗС-данные показаны сплошной линией. Штриховой линией и жирными точками показаны данные, относящиеся к двум версиям калибровки спектров, полученных К.К. Чуваевым

Таблица 1. Параметры переменности линии $H\beta$ и континуума в NGC 5548

Годы	Поток в континууме			Поток в $H\beta$				
	Средний	rms (%)	ACF	Средний	rms (%)	τ_{peak}	τ_{cent}	r_{max}
1972–1988	10.19 ± 0.52	22.8 ± 2.8	164^{+96}_{-36}	10.00 ± 0.52	23.2 ± 3.2	$13.0^{+7.0}_{-4.9}$	$18.3^{+5.8}_{-5.0}$	$0.908^{+0.030}_{-0.036}$
1972–1988	10.17 ± 0.58	25.5 ± 3.1	164^{+96}_{-36}	10.12 ± 0.58	25.4 ± 3.5	$13.0^{+8.8}_{-5.8}$	$18.4^{+6.1}_{-5.0}$	$0.908^{+0.030}_{-0.036}$
1989–2001	9.72 ± 0.72	24.6 ± 4.0	322^{+154}_{-108}	7.82 ± 0.50	21.6 ± 3.4	$17.5^{+1.1}_{-1.1}$	$25.3^{+1.4}_{-1.5}$	$0.941^{+0.024}_{-0.030}$

Рис. 7. Средний профиль широкой линии $H\beta$ в 1989–2001 гг. (сплошная линия) и в 1972–1988 гг. (пунктирная и штриховая линии для двух версий калибровки спектров)

частности, кросс-корреляционный анализ (Гаскелл и Спарк, 1986; Вайт и Петерсон, 1994) дает одинаковое, в пределах ошибок, запаздывание линии $H\beta$, а также очень сходные кросс-корреляционные функции (CCF) и сходные авто-корреляционные функции для переменности потока в континууме в эти два периода времени. Значимо не различаются также коэффициенты корреляции в максимуме CCF и среднеквадратичные амплитуды переменности линии и континуума. И только средний поток в линии $H\beta$ был значимо больше в 1972–1988 гг., в то время как средний поток в континууме изменился мало. В таблице 1 даны характеристики переменности за эти два периода наблюдений: средний поток в континууме (10^{-15} эрг см^{-2} с^{-1} \AA^{-1}), его среднеквадратичная (rms) амплитуда переменности в процентах и ширина авто-корреляционной функции (ACF) на половине интенсивности. Последнюю можно использовать для характеристики типичного временного масштаба переменности. В следующих колонках таблицы приводятся средний поток в линии $H\beta$ (10^{-13} эрг см^{-2} с^{-1}), rms-амплитуда переменности потока в линии и результаты кросс-корреляционного анализа: запаздывание линии, определенное по максимуму CCF, по центру тяжести CCF и коэффициент корреляции в максимуме CCF. Две последние строки таблицы относятся к двум версиям калибровки спектров К.К. Чуваева (подробнее см. Сергеев и др., 2007).

Несмотря на значительные изменения формы профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 от года к году (рис. 5), средний нормализованный профиль (т. е. профиль, нормированный на его интегральный поток) изменился от 1972–1988 гг. к 1989–2001 гг. удивительно мало (рис. 7).

На рис. 8 в логарифмическом масштабе показана диаграмма поток-поток для потоков в линии $H\beta$ и континууме. Левая часть рисунка показывает линии регрессии для этой зависимости отдельно для двух периодов наблюдений: 1972–1988 и 1989–2001 гг. Так как масштаб логарифмический, то линии регрессии представляют аппроксимацию степенной функцией: $F(H\beta) = aF(cont)^b$, где a и b – коэффициенты регрессии. Как уже говорилось ранее, линия $H\beta$ показывает нелинейный отклик на

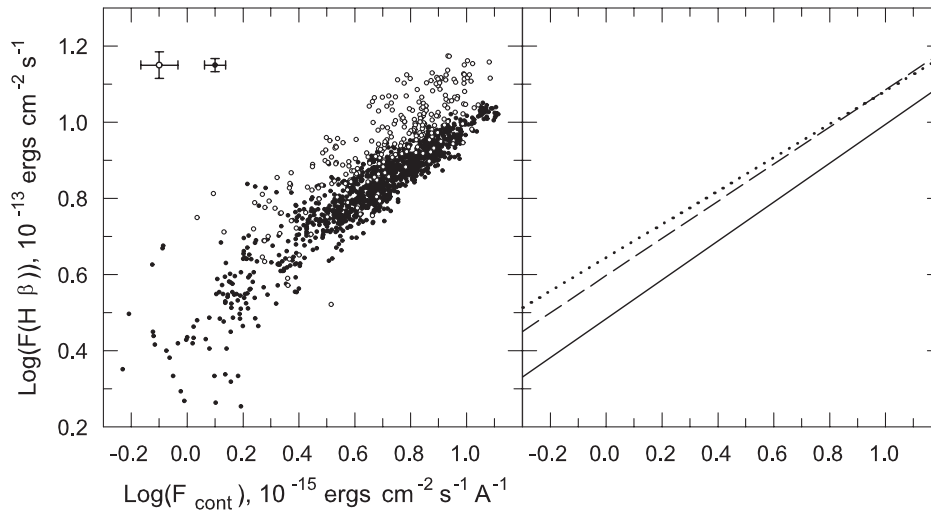


Рис. 8. Диаграмма поток-поток в логарифмическом масштабе для линии $H\beta$ и континуума. Постоянные составляющие потоков (от узких линий и подлежащей галактики) были вычтены и учтено время запаздывания линии. Жирные точки – это данные 1989–2001 гг., а кружки – данные 1972–1988 гг. Левый график показывает линии регрессии для зависимостей между потоками в линии и континууме в 1989–2001 гг. (сплошная линия) и в 1972–1988 гг. (штриховая и пунктирная линии, которые относятся к двум версиям калибровки данных). Крестики в левом углу показывают типичные ошибки измерений. Рисунок взят из работы Сергеева и др. (2007)

изменения в континууме: $b < 1$, то есть линия менее переменна, чем континуум. Кроме того, как видно из рис. 8, зависимость эта изменилась от одного периода наблюдений к другому: в 1972–1988 гг. линия $H\beta$ была систематически ярче при примерно таком же среднем уровне яркости континуума, соответственно коэффициент a был значимо больше в 1972–1988 гг., чем в 1989–2001 гг. Если считать этот эффект реальным, а не связанным с какими-либо неизвестными эффектами старых фотографических данных 1972–1988 гг., то, по-видимому, мы здесь имеем дело либо с изменением фактора покрытия (часть сферы, покрытая излучающими линией облаками, если смотреть из центрального источника), либо изменились физические условия в этих облаках, либо изменилась связь между оптическим и ионизирующим континуумом, т. е. спектральное распределение энергии центрального источника. Поскольку средний профиль линии $H\beta$ от одного периода наблюдений к другому изменился мало, то последнее представляется наиболее вероятным.

Как уже отмечалось ранее, изменения формы профиля линии зачастую происходят совершенно независимо от изменений потока в континууме. В работе Сергеева и др. (2007) было рассмотрено, как различные параметры профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 коррелируют между собой и с потоком в континууме. В качестве таких параметров были взяты: интегральный поток в линии, ширина профиля, отношение потоков в синем и красном крыле (b/r), центр тяжести профиля и эквивалентная ширина. Оказалось, что кроме очевидных корреляций, таких как корреляция между потоками в линии и континууме, параметры профиля линии не показывают значимых (выше 3σ) корреляций между собой и с потоком в континууме. В частности, с достоверностью 98 % была обнаружена обратная корреляция между шириной линии $H\beta$ и ее интегральным потоком. Эта зависимость вытекает из известной зависимости между запаздыванием (т. е. размером области излучения линии) и светимостью ядра и зависимости между шириной линии (т. е. скоростью излучающего газа) и размером области этого излучения, ожидаемой, если основная динамическая сила, действующая на

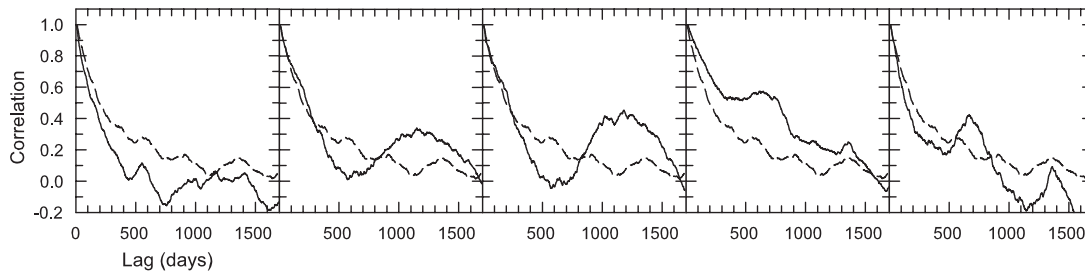


Рис. 9. Автокорреляционные функции изменений параметров профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 из работы Сергеева и др. (2007). Для сравнения на всех графиках изображена автокорреляционная функция изменений потока линии (пунктирная линия). Сплошные линии – это автокорреляционные функции (слева направо): потока в континууме, отношения потоков в синем и красном крыле линии $H\beta$, центра тяжести линии и ее ширины (определенной как полная ширина на половине интенсивности и как дисперсия профиля)

газ – это гравитация центральной черной дыры. Однако ни отношение b/r , ни центр тяжести линии не коррелируют ни с потоком в континууме, ни с потоком в линии, ни с ее шириной.

На рис. 9 приведены автокорреляционные функции изменений различных параметров профиля линии $H\beta$ в NGC 5548. Для сравнения показаны автокорреляционные функции изменений потоков в линии и континууме. Из рисунка видно, что все автокорреляционные функции очень сходны в центральной части, то есть характер переменности потоков и формы профиля линии $H\beta$ на небольших временных интервалах порядка 100–200 дней примерно одинаков. Но в отличие от переменности потоков, автокорреляционные функции профилей имеют более протяженные крылья с вторичным максимумом на ≈ 1200 дней для центра тяжести и отношения b/r и на ≈ 650 дней для ширины линии, т. е. в изменении профилей имеются более долговременные составляющие. Кроме того, наличие максимумов говорит о том, что эти составляющие могут быть квазипериодическими. Достоверность этой периодичности около 97 %. Наконец, при значении аргумента ≈ 1700 дней значения всех автокорреляционных функций становятся близкими к нулю, то есть самые длительные события в изменении формы профиля линии происходят в течение не более, чем ≈ 4.5 лет. Через 4.5 лет профиль линии уже не помнит, каким он был раньше.

3 Обсуждение и выводы

Как было показано, форма профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 сильно изменяется во временных масштабах от нескольких месяцев до нескольких лет. Изменяется центр тяжести профиля и характер асимметрии, появляются бугры с синей или красной стороны, профиль может становиться двугорбым. Однако усредненный по двум длительным интервалам времени 1972–1988 и 1989–2001 гг. профиль линии $H\beta$ (рис. 7) изменился очень мало. Характеристики кривых блеска линии $H\beta$ и континуума и результаты кросс-корреляции также оказались сходными для этих двух периодов наблюдений (за исключением интегрального потока в линии $H\beta$, который был значимо выше для первого периода наблюдений, в то время как поток в континууме был примерно одинаков для обоих периодов). Это свидетельствует о стабильности области, излучающей широкие линии (BLR), ее кинематики, геометрии, физических условий и скважности на протяжении десятков лет. В то же время зависимость между потоками в линии и оптическом континууме (рис. 8), по всей видимости, изменяется со временем, что, вероятно, вызвано изменениями в зависимости между оптическим и ионизирующим потоками континуума.

В изменениях формы профиля линии $H\beta$ трудно усмотреть какие-либо закономерности. В частности, изменения рассмотренных параметров профиля этой линии не коррелируют ни с изменени-

ями потока в континууме, ни между собой (кроме тривиальных корреляций). Эволюция профиля выглядит ни от чего не зависящей, хаотичной и непредсказуемой. Ни одна из существующих моделей BLR не может полностью объяснить наблюдаемую эволюцию профилей широких линий в АЯГ. Например, двухкомпонентная модель BLR предполагает, что профиль линии в любой момент времени можно представить суперпозицией двух профилей неизменной формы. Эту модель пытались применить, например, для объяснения эволюции профиля линии $H\beta$ в NGC 5548 (Сергеев и др., 1994) по наблюдениям 1988–1990 гг. Однако было отмечено, что в 1991 году в далеком красном крыле линии появилась эмиссионная деталь, в последующие годы перемещающаяся по профилю от крыла к центру (в 1994 году эта деталь находится уже вблизи центра линии, см. рис. 5). Появляющиеся на различных лучевых скоростях транзитные детали в профилях широких линий наблюдаются относительно часто (Гаскелл, 1996; Эраклеус и др., 1997; Гилберт и др., 1999), и они противоречат двухкомпонентной модели BLR. Подобные детали можно объяснить в дисковой модели или модели с биконическими выбросами. Дисковая модель встречает серьезные трудности при попытке описать огромное многообразие форм профилей широких линий, наблюдающихся в различные моменты времени в различных АЯГ, а модель биконических выбросов противоречит результатам эхо-картирования, которые не согласуются с кинематикой движения газа наружу. Объяснение эволюции профилей перераспределением газа в BLR противоречит скорости этой эволюции, например, сильным изменениям профиля линии $H\beta$ всего за несколько месяцев в NGC 5548 в 1985 г. (рис. 4 и 5). Эффект запаздывания также не в состоянии объяснить эту эволюцию, поскольку изменения в профиле линии имеют место на более длительных временных интервалах, чем изменения потока в континууме и поскольку первые часто происходят абсолютно независимо от последних. По-видимому, сложности с пониманием причин изменений формы профилей широких линий в АЯГ связаны с тем, что эти изменения вызваны рядом факторов, совместное влияние которых на профиль линии трудно разделить.

Работа выполнена частично при поддержке гранта номер 5–20 программы “Космомикрофизика” Национальной академии наук Украины.

Литература

- Андерсон (Anderson K. S.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 169. P. 449.
- Бенц и др. (Bentz M.C., Denney K.D., Cackett E.M., Dietrich M., Fogel J.K.J., et al.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 662. P. 205.
- Блэндфорд, МакКи (Blandford R.D. and McKee C.F.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 255. P. 419.
- Вайт, Петерсон (White R.J. & Peterson B.M.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1994. V. 106. P. 879.
- Вандерс и др. (Wanders I., Goad M.R., Korista K.T., Peterson B.M., Horne K., Ferland G.J., Koratkar A.P., Pogge R.W., & Shields J.C.) // *Astrophys. J.* 1995. V. 453. P. L87.
- Вандерс, Петерсон (Wanders I., & Peterson B.M.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 466. P. 174.
- Вейлью, Женг (Veilleux S., & Zheng W.) // *Astrophys. J.* 1991. V. 377. P. 89.
- Видман (Weedman, D. W.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1977. V. 15. P. 69.
- Гаскелл (Gaskell C.M.) // in *Quasars and Gravitational Lenses.* / Ed. Swings J.-P. Cointe-Ougree: Univ. Liège. 1983. P. 471.
- Гаскелл (Gaskell C.M.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 464. P. L107.
- Гаскелл, Спарк (Gaskell C.M., & Sparke L.S.) // *Astrophys. J.* 1986. V. 305. P. 175.
- Гилберт и др. (Gilbert A.M., Eracleous M., Filippenko A.V., & Halpern J.P.) // *ASP Conf. Ser.* 175: *Structure and Kinematics of Quasar Broad Line Regions.* 1999. V. 189.
- Гоуд, Користа, Книдж (Goad M.R., Korista K.T., and Knigge C.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2004. V. 352. P. 277.
- Женг, Вейлью, Гранди (Zheng W., Veilleux S., & Grandi S.A.) // *Astrophys. J.* 1991. V. 381. P. 418.
- Каспи и др. (Kaspi S., Maoz D., Netzer H., Peterson B.M., Vestergaard M., and Jannuzi B.T.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 629. P. 61.
- Каспи и др. (Kaspi S., Smith P.S., Netzer H., Maoz D., Jannuzi B.T., and Giveon U.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 533. P. 631.

- Клавель и др. (Clavel J., Reichert G. A., Alloin D., Crenshaw D. M., Kriss G., et al.) // *Astrophys. J.* 1991. V. 366. P. 64.
- Користа и др. (Korista K.T., Alloin D., Barr P., Clavel J., Cohen R.D., Crenshaw D.M., et al.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1995. V. 97. P. 285.
- Користа, Гуд (Korista K.T., & Goad M.R.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 606. P. 749.
- Лютый В.М., Черепащук А.М. // *Астрон. циркуляр.* 1972. Т. 668. С. 1.
- Лютый В.М., Проник В.И. (Lyutyi V.M., Pronik V.I.) // *Variable stars and stellar evolution. IAU Symp.* 67./ Eds Sherwood V.E., Plaut L. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co. 1975. P. 591.
- Маркович, Эделсон (Markowitz A. and Edelson R.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 617. P. 939.
- Маршалл и др. (Marshall H.L., Carone T.E., Peterson B.M., Clavel J., Crenshaw D.M., et al.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 479. P. 222.
- Петерсон (Peterson B.M.) // *Astrophys. J.* 1987. V. 312. P. 79.
- Петерсон (Peterson B.M.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1993. V. 105. P. 247.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Balonek T.J., Barker E.S., Bechtold J., Bertram R., et al.) // *Astrophys. J.* 1991. V. 368. P. 119.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Berlind P., Bertram R., Bischoff K., Bochkarev N. G., et al.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 581. P. 197.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Ferrarese L., Gilbert K.M., Kaspi S., Malkan M.A., et al.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 613. P. 682.
- Петерсон и др. (Peterson B.M., Korista K.T., Wagner R.M., & Reichert G.A.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 352. P. 68.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Malkov Yu.F., Chuvaev K.K., Pronik V.I.) // *ASP Conf. Ser.: Reverberation Mapping of the Broad-Line Region in Active Galactic Nuclei.* 1994. V. 69. P. 199.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., & Sergeeva E.A.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 554. P. 245.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Doroshenko V.T., Dzyuba S.A., Peterson B.M., Pogge R.W., and Pronik V.I.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 668. P. 708.
- Стирпе, де Брайен, ван Гронинген (Stirpe G.M., de Bruyn A.G., & van Groningen E.) // *Astron. Astrophys.* 1988. V. 200. P. 9.
- Чакрабартти, Виита (Chakrabarti S.K. & Wiita P.J.) // *Astrophys. J.* 1994. V. 434. P. 518.
- Чуваев (Chuvaev K.K.) // *IAU Symp.* 121: *Observational Evidence of Activity in Galaxies.* 1987. V. 121. P. 203.
- Эраклеус и др. (Eracleous M., Halpern J.P., Gilbert A.M., Newman J.A., & Filippenko A.V.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 490. P. 216.