ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ЯДЕР СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК НА ШКАЛАХ ВРЕМЕНИ ДНИ И ЧАСЫ

И. И. Проник

НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, пос. Научный, 98409 Крым, Украина
e-mail: ipronik@crao.crimea.ua

В статье представлены данные из работ, выполненных в Крымской астрофизической обсерватории в 1983–2009 гг. Н. И. Меркуловой, Л. П. Метик, В. И. Прoником и И. И. Проник по переменности ядер сейфертовских галактик NGC 1275, NGC 3227, NGC 4151, NGC 5548 и NGC 7469 в эмиссионных линиях бальмеровской серии, [O III] λ 4959, 5007 Å и континууме на шкалах времени часы и дни. Результаты получены по одной серии спектральных наблюдений на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории в январе 1977 г. и двум сериям фотометрических наблюдений на 1.25-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории в 1982–1999 гг. Полученные данные позволили заключить, что изменения в эмиссионных линиях и континууме в оптике на шкалах времени часы и дни связаны с независимыми и более мощными источниками, чем источники месячной и годичной переменности ядер галактик.

ВВЕДЕНИЕ

В 1859 году Кирхгоф сформулировал закон, который носит его имя: $\epsilon_\lambda/\alpha_\lambda = B_\lambda(\mathrm{T})$ – отношение коэффициента излучения к коэффициенту поглощения есть функция температуры и длины волны. Одна из формулировок этого закона приведена в курсе Г. С. Ландсберга "Оптика" [4]: "Испускательная способность тела зависит только от температуры излучающего тела и не зависит от температур окружающих его тел". В астрофизике это положение широко используется: существует возможность по потоку излучения, попадающему в щель спектрографа или на диафрагму фотометра, определить параметры составляющих его компонентов от излучающих слоев или сгустков газа, которые имеют разные температуры. Ниже представлены результаты такой попытки, сделанной по обзору работ, опубликованных в 1983–2009 гг. Н. И. Меркуловой, Л. П. Метик, В. И. Прoником, И. И. Проник и Л. М. Шариповой.

В 1970-х годах среди тем, по которым велись исследования галактик в Крымской обсерватории, была тема: "Спектральные исследования переменности ядер сейфертовских галактик в оптике на шкалах времени месяцы и годы". В частности, на 2.6-м телескопе им. Г. А. Шайна наблюдались спектры ядер галактик:

NGC 1275 – 7.5 лет (1971–1978 гг.) – BL Lac,
NGC 3227 – 10 лет (1971–1981 гг.) – Sy 1,
NGC 7469 – 1 год (1971–1972 гг.) – Sy 1.

В процессе исследования была заподозрена переменность эмиссионных линий на шкале времени сутки. Для исследования суточной переменности была получена одна серия спектральных и две серии фотометрических наблюдений.

СПЕКТРЫ

12–15 января 1977 г. В. Л. Афанасьев получил на 6-м телескопе в области λ 3600–7000 Å 126, 53 и 23 спектрограммы для ядер галактик NGC 1275, NGC 3227 и NGC 7469 соответственно. Использовался спектрограф UAGS с ЭОП УМ-92. Обратная дисперсия в оптике была 95 Å/мм, спектральное разрешение – 8 Å, ширина щели спектрографа – $1''$. Высота бокса при измерении спектров на микрофотометре была $1.5''$, ошибка одного значения эквивалентной ширины (EW) была для $EW \geq 10$ Å – (10–15)%, а для $EW \leq 10$ Å – (15–20)%.

Было показано, что в спектрах ядер галактик NGC 1275, NGC 3227 и NGC 7469 профили и EW водородных и запрещенных эмиссионных линий меняются на масштабе времени три дня. При этом:

1. профили линий H_β и H_γ расширяются при уменьшении их EW;
2. пик профиля линии смещается в его голубую часть;
3. степень переменности возрастает с ростом номера линии в бальмеровской серии: H_α – H_γ;
4. водородные линии имеют обратный бальмеровский декремент;
5. эквивалентные ширины линий [O III] λ 4959, 5007 Å и [S II] λ 6717, 6731 Å меняются инверсно.

Было сделано предположение, что в ядрах этих галактик в области свечения водородных и запрещенных эмиссионных линий наблюдались вспышки на масштабе времени три дня. В ядре галактики

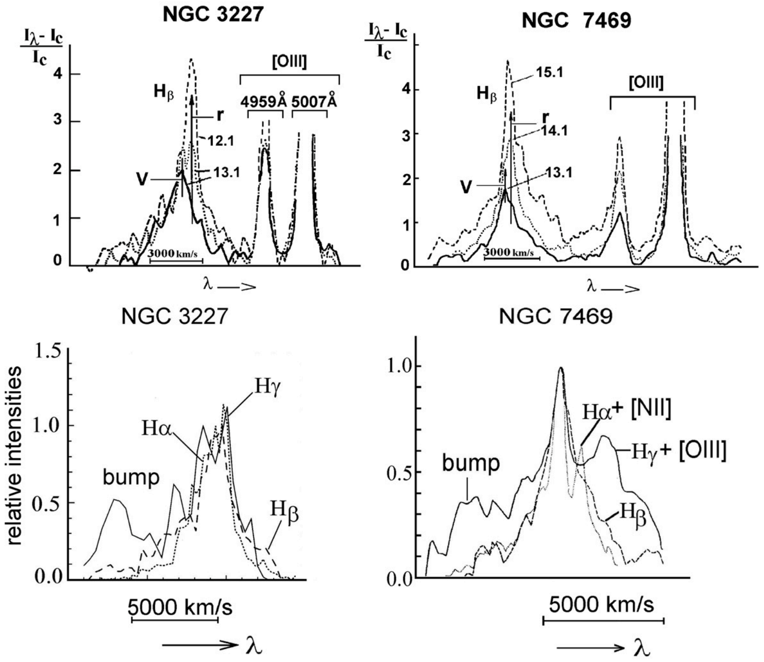

Рис. 1. Верх – эволюция профиля линии H_β в спектрах ядер галактик NGC 3227 и NGC 7469: во время вспышки. Низ – профили линий H_α, H_β и H_γ в момент максимума вспышки

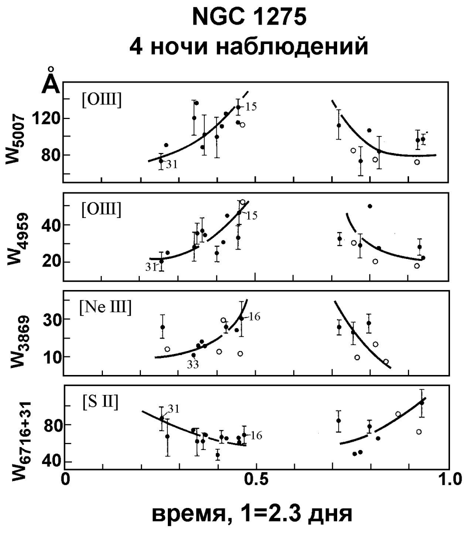

Рис. 2. *EW* запрещенных линий [O III], [Ne III] и [S II], полученных за 4 ночи для спектра ядра NGC 1275, которые менялись с характерным временем 2.3 дня

NGC 3227 наблюдалось возгорание, а в ядре галактики NGC 7469 – затухание вспышки.

На рис. 1 (вверху) показана эволюция профиля линии H_β в спектрах ядер NGC 3227 и NGC 7469: во время вспышки. Видно, что пик профиля смещается в коротковолновую область, а *EW* уменьшается.

На рис. 1 (внизу) приведены профили линий H_α, H_β и H_γ в момент максимума вспышки. В голубом крыле линии H_γ в спектрах ядер обеих галактик видны вздутия (bumps).

На рис. 2 видно, что в случае ядра NGC 1275 *EW* запрещенных линий [O III], [Ne III] и [S II], полученные за 4 ночи, менялись с характерным временем 2.3 дня. *EW* линий [O III] и [Ne III] менялись в противофазе с *EW* линий [S II] λ 6717, 6731 Å.

EW линий [O III] λ 4959, 5007 Å и [S II] λ 6717, 6731 Å в спектре ядра NGC 7469 менялись инверсно, как и в случае ядра NGC 1275. Было выдвинуто предположение, что рост EW линий [O III] во время вспышки был обусловлен увеличением ионизации ионов O II.

В случае ядра NGC 3227 вспышка наблюдалась в момент максимума общей яркости ядра, а в случае NGC 7469 в момент минимума блеска ядра. Это свидетельствует о том, что появление вспышки не зависит от уровня общей яркости ядра.

Основные результаты были опубликованы Н. И. Меркуловой и И. И. Проник [5, 6], И. И. Проник [17, 18, 22, 25], Л. П. Метик [8].

ПОТОКИ В ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЯХ H_β, [O III] И КОНТИНУУМЕ

В 1982–1987 гг. проводились наблюдения ядра галактики NGC 1275 на телескопе АЗТ-11 со сканирующим спектрометром АСП-38 в режиме счета фотонов с входной диафрагмой 10″. В каждом из трех участков спектра: континууме в области λ 5200 Å и эмиссионных линиях H_β и [O III] λ 4959+5007 Å за 35 ночей было получено по 379 значений потока ядра галактики. Входная щель спектрометра была $\Delta\lambda$ = 80 Å. Точность измерения одного значения потока равна $\sim\pm4\%$, временное разрешение – $\sim$4 мин. Интервал наблюдений за одну ночь был до 9 часов.

Изменения потоков, осредненных за ночь.

На рис. 3 представлены соотношения осредненных за ночь потоков эмиссионных линий H_β, [O III] и континуума ядра галактики NGC 1275, полученные за 5 лет наблюдений в 1982–1987 гг. Видно, что осредненные за ночь значения потоков континуума, H_β и [O III] менялись в прямой зависимости. Их значения изменялись больше, чем в два раза.

Основные результаты были опубликованы И. И. Проник, Н. И. Меркуловой и Л. П. Метик [15, 19, 21, 23].

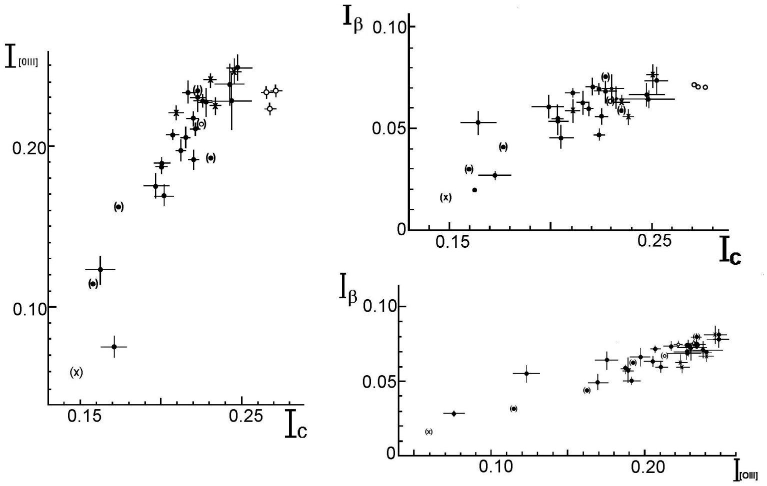

Рис. 3. Осредненные за ночь потоки эмиссионных линий H_β, [O III] и континуума ядра галактики NGC 1275, полученные за 5 лет наблюдений

Внутриночные изменения потоков.

В каждую из 35 ночей наблюдений было получено от 1 до 44 значений потока в каждой из трех полос: континууме около λ 5200 Å и эмиссионных линиях H_β и [O III] λ 4959+5007 Å.

Между потоками в линиях наблюдалась прямая зависимость, как и в случае осредненных за ночь потоков. Но прямые корреляции потоков в линиях и континууме были получены только для семи ночей.

Для 19 ночей корреляции потоков в линиях и континууме оказались инверсными – в противоположность тому, как наблюдалось для осредненных за ночь значений потока.

Амплитуда колебаний потоков внутри ночей определялась для ночей с числом наблюдений в каждой полосе больше 18. Она оказалась для линии H_β до 40%, а для дублета [O III] – до 20%.

На рис. 4 показаны соотношения потоков континуума, H_β и [O III] ядра NGC 1275 внутри ночи 7–8 декабря 1985 г. Видна прямая зависимость потоков линий H_β и [O III] и инверсные зависимости потоков линий и континуума.

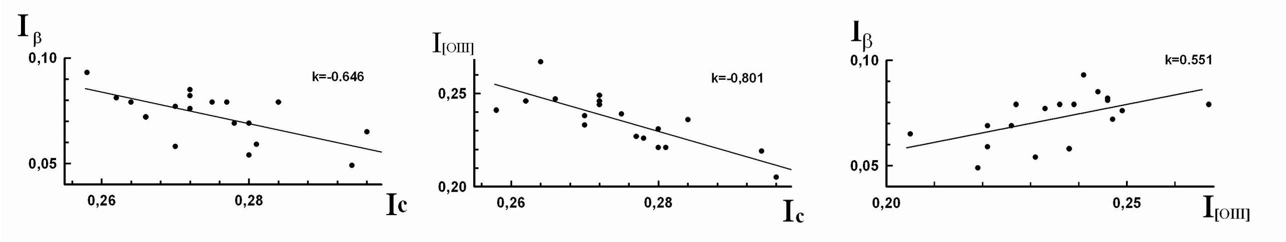

Рис. 4. Соотношения потоков континуума, H_β и [O III] для ядра NGC 1275 внутри ночи 7–8 декабря 1985 г., k – коэффициент корреляции

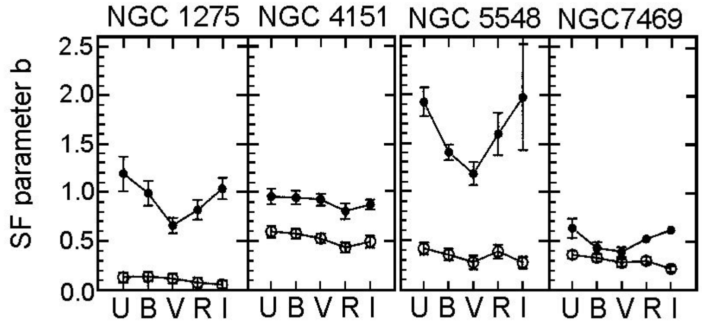

Рис. 5. Параметры SF b ядер четырех галактик для внутриночных колебаний яркости (точки) и для годичных колебаний яркости (колечки)

UBVRI-ФОТОМЕТРИЯ

В 1989–1999 гг. Н. И. Меркулова и Л. П. Метик проводили одновременные *UBVRI*-наблюдения ядер активных галактик на 1.25-м телескопе с финским двухлучевым модулирующим фотометром-поляриметром конструкции В. Пииролы. Диаметр входной круглой диафрагмы равнялся $20''$. Фотометрическая ошибка одного измерения потока была $\sim (1.0–2.5)\%$. Интервал наблюдений в одну ночь составлял до 4.5 часа. Было до 30 измерений потока в каждом фильтре в одну ночь. Было показано, что:

1. Внутриночная переменность ядер галактик представляет собой суперпозицию независимых голубых вспышек, при которых поток убывает от полосы U к полосе I, и красных вспышек, которые в полосе U не наблюдаются.
2. Продолжительность вспышек была от 15–30 мин до нескольких часов, амплитуда – (5–15)%.

Исследовались статистические характеристики вспышек в *UBVRI*-полосах ядер NGC 1275, NGC 4151, NGC 5548 и NGC 7469 методом структурной функции (SF) по программе С. Г. Сергеева. Вычислялся параметр

$$\mathrm{SF\ b} = 2\lg(\Delta F)/\lg(\Delta t),$$

величина которого характеризует скорость выхода энергии или мощность переменного источника.

На рис. 5 видно, что параметры b ядер четырех галактик для внутриночных колебаний яркости (точки) оказались больше параметров для годичных колебаний яркости (колечки).

При ослаблении общей яркости ядра галактики NGC 4151 наблюдалось уменьшение со временем параметра SF b вненочных колебаний яркости и увеличение его для внутриночных колебаний яркости ядра. Эти результаты вместе с данными рис. 5, а также полученными по спектрам (см. выше), позволили сделать вывод, что переменность континуума и эмиссионных линий во время вспышек обеспечивается независимыми более мощными источниками, чем источники месячной и годичной переменности ядер галактик.

Основные результаты по статистическим характеристикам *UBVRI*-переменности ядер галактик опубликованы в работах Н. И. Меркуловой, Л. П. Метик и И. И. Проник [7, 10–14, 19, 20, 24].

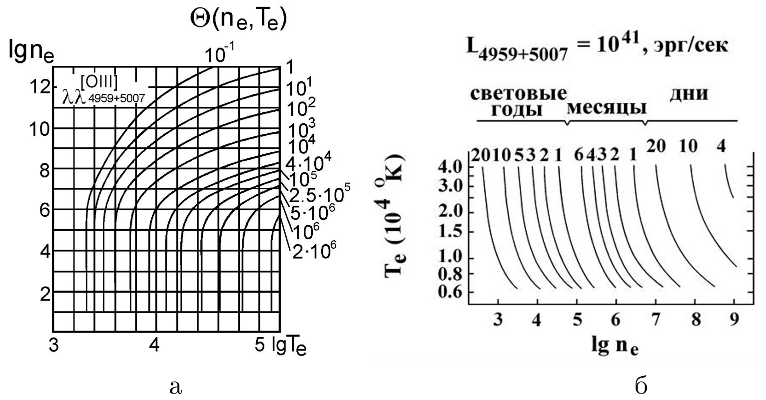

Рис. 6. Функция $\Theta(n_e, T_e)$ для линий [O III] λ 4959, 5007 Å (*а*); модельные размеры областей свечения запрещенных линий [O III], имеющих светимость $L = 10^{41}$ эрг/с, помещенные на оси X вверху (*б*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования профилей, эквивалентных ширин и потоков эмиссионных линий и континуума по данным наблюдений в 1977–1999 гг. ядер активных галактик в оптической области спектра были зарегистрированы вспышки на масштабе времени часы и несколько суток. Было показано:

1. Переменными во время вспышек являются континуум, водородные и запрещенные линии. Амплитуда изменения потока внутри ночи в линии H_β была до 40%, а дублета [O III] λ 4959, 5007 Å – до 20%.
2. Во время вспышек наблюдаются уменьшение эквивалентных ширин и яркостей водородных линий, обратный бальмеровский декремент и широкий яркий компонент в голубой области профиля линии H_γ (голубое вздутие).
3. Переменность континуума и эмиссионных линий во время вспышек обеспечивается независимыми более мощными источниками, чем источники месячной и годичной переменности ядер галактик.
4. Вспышки на масштабах времени часы и дни возникают как в минимуме так и максимуме общей яркости ядер галактик.

Сравнение полученных по наблюдениям характеристик вспышек с сетками теоретических параметров плазмы, в которой осуществляется радиационный (А. А. Боярчук [2]) и ударный механизмы возбуждения и ионизации водорода (Р. Е. Гершберг, Э. Э. Шноль [3]) показало, что эти характеристики не противоречат гипотезе о том, что газ водородных вспышек – плотная и горячая плазма, ионизация и возбуждение которой производится ударным механизмом.

Для случая ударного механизма возбуждения и ионизации газа для наблюдаемых водородных вспышек были получены параметры $n_e \sim 10^{14}$ см$^{-3}$, $T_e \sim 25\,000$ K.

Встает вопрос, можно ли теоретически объяснить переменность запрещенных линий во вспышках на масштабе времени дни. Оказывается, что это не совсем безнадежно.

А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг и В. И. Проник [1] привели кривые равных значений функции $\Theta(n_e, T_e)$ для запрещенных линий, которая связана с их интенсивностями. На рис. 6, *а* показана функция $\Theta(n_e, T_e)$ для дублета [O III] λ 4959+5007 Å). Из рисунка следует, что свечение этих линий возможно при плотностях n_e по крайней мере до 10^{13} см$^{-3}$ и температурах T_e по крайней мере до 10^5 K.

Т. Адамс и Д. Видман [9] определили светимость дублета [O III] λ 4959, 5007 Å для ядер галактик NGC 1275, NGC 3227 и NGC 7469 равную L[O III] – $3 \cdot 10^{42}$, $2 \cdot 10^{41}$ и 10^{42} эрг/с соответственно. Пользуясь этими данными можно сделать некоторые прикидки для характеристик областей вспышек, излучающих линии [O III].

Для ядра NGC 1275 нами была получена амплитуда внутриночных колебаний потока дублета [O III] до 20%. Это соответствует светимости дублета в области вспышек примерно $5 \cdot 10^{41}$ эрг/с.

В. И. Проник [16] рассчитал сетку размеров газа, излучающего линии [O III] λ 4959, 5007 Å и имеющего светимость L[O III] $= 10^{41}$ эрг/с при разных T_e и n_e. Сетка представлена на рис. 6, *б*.

Из сетки моделей следует, что светимость L [O III] $= 10^{41}$ эрг/с может быть обеспечена газом размером 4 св. дня, имеющим $n_e \sim 10^9$ см$^{-3}$, $T_e \sim 30\,000$ K. Эти параметры близки к параметрам, полученным для газа трех дневных вспышек в водородных линиях при ударном возбуждении и ионизации в ядрах галактик NGC 3227 и NGC 7469. Они могут осуществляться в ударных волнах в потоках или струйных выбросах из ядер активных галактик.

[1] *Боярчук А. А., Гершберг Р. Е., Проник В. И.* Формулы графики и номограммы для количественного анализа спектров эмиссионных объектов // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1963. – **29**. – С. 291–314.

[2] *Боярчук А. А.* Бальмеровский декремент в движущихся средах // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1966. – **35**. – С. 45–80.

[3] *Гершберг Р. Е., Шноль Э. Э.* Бальмеровский декремент в спектрах движущихся средах. Случай ударной ионизации и ударного возбуждения // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1974. – **50**. – С. 122–151.

[4] *Ландсберг Г. С.* Оптика. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976. – 926 с.

[5] *Меркулова Н. И., Проник И. И.* Опыт наблюдений быстрых колебаний эмиссионного спектра ядра пекулярной галактики NGC 1275 // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. – 1983. – **68**. – С. 93–103.

[6] *Меркулова Н. И., Проник И. И.* Опыт наблюдений быстрых колебаний эмиссионного спектра ядра пекулярной галактики NGC 1275. II // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1985. – **71**. – С. 160–174.

[7] *Меркулова Н. И., Метик Л. П.* UBVRI-наблюдения переменности ядер сейфертовских галактик NGC 1275 и NGC 4151. Быстрые вспышки на кривых блеска NGC 1275 // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1995. – **90**. – С. 178–195.

[8] *Метик Л. П., Проник И. И., Шарипова Л. М.* Переменность от ночи к ночи эмиссионных линий в спектре ядра сейфертовской галактики NGC 3227 // Астрофизика. – 2006. – **49**. – С. 499–510.

[9] *Adams Weedman* Emission-line luminosities of Seyfert galaxies // Astrophys. J. – 1975. – **199**. – P. 19–30.

[10] *Merkulova N. I., Metik L. P., Pronik I. I.* Simultaneous UBVRI Light Curves of the Seyfert galaxy NGC 4151 during the extraordinary brightening in 1989–1996 // Astron. J. – 1999. – **117**. – P. 2177–2184.

[11] *Merkulova N. I.* Simultaneous UBVRI Light Curves of the Seyfert galaxy NGC 4151 during the extraordinary brightening in 1989–1996 // Astron. J. – 2000. – **119**. – P. 631–643.

[12] *Merkulova N. I., Metik L., Pronik I.* Characteristics of the continuum variability of the nucleus of NGC 4151 in the optical from 1989 to 1996 // Astron. and Astrophys. – 2001. – **374**. – P. 770–783.

[13] *Merkulova N. I.* UBVRI simultaneous observations of the nucleus of Seyfert galaxy NGC 5548 in 1993–1999 // Astron. and Astrophys. – 2002. – **387**. – P. 40–55.

[14] *Merkulova N. I.* Comparisons of Photometric characteristics from UBVRI Light Curves of the Seyfert galaxies NGC 1275, NGC 4151, NGC 5548 and NGC 7469 // AGN variability from X-rays to radio waves. Conference Series. – 2005. – **360**. – P. 17–21.

[15] *Pronik I. I., Merkulova N. I., Metik L. P.* On the H_β, [O III] lines and continuum variability character in the nucleus of seyfert galaxy NGC 1275 // Astrophys. and Space Sci. – 1990. – **171**. – P. 91–95.

[16] *Pronik I. I., Pronik V. I.* Forbidden line variability in the active galactic nuclei // Astron. and Astrophys. Transactions. – 1992. – **3**. – P. 57–62.

[17] *Pronik I. I., Metik L. P., Merkulova N. I.* Differences in emission line spectrum in maximum and minimum of the nucleus brightness of seyfert galaxy NGC 7469 // Astrophysic and Space Sci. – 1996. – **239**. – P. 97–111.

[18] *Pronik I. I., Metik L. P., Merkulova N. I.* Long and short term variability of emission lines in the nuclear spectrum of the seyfert galaxy NGC 7469 // Astron. and Astrophys. – 1997. – **318**. – P. 721–728.

[19] *Pronik I. I., Merkulova N. I., Metik L. P.* Characteristics of the variability of the nucleus of NGC 1275 in the optical in 1982–1994 // Astron. and Astrophys. – 1999. – **351**. – P. 21–30.

[20] *Pronik I. I., Merkulova N. I., Metik L. P.* UBVRI observations of the nucleus of NGC 1275 from 1989 to 1994: microvariability // Astron. J. – 1999. – **117**. – P. 2141–2151.

[21] *Pronik I. I., Metik L. P.* Signs of flows and shocks in variable balmer line profiles of the seyfert galaxies NGC 3227 and NGC 7469 // Astron. and Astrophys. Transactions. – 2003. – **22**. – P. 713–717.

[22] *Pronik I. I., Merkulova N. I., Metik L. P.* Short term variability of optical emission lines in the nuclear spectrum of the seyfert galaxy NGC 3227 // Astron. and Astrophys. Transactions. – 2004. – **23**. – P. 509–524.

[23] *Pronik I. I., Metik L. P.* Long-term variability of the optical emission lines in the nuclear spectrum of the Seyfert galaxy NGC 3227 // Astrophys. and Space Sci. – 2005. – **299**. – P. 245–261.

[24] *Pronik I. I.* Flows and shocks in Seyfert Galaxy Nuclei // AGN variability from X-rays to radio waves. Conference Series. – 2005 – **360**. – P. 245–249.

[25] *Pronik I. I.* Sings of gas flows in the variable balmer line profiles of the seyfert galaxy nuclei NGC 3227 and NGC 7469 // Astron. and Astrophys. – 2009. – **496**. – P. 299–305.