

УДК 524.7-823-56-423

## АКТИВНОСТЬ ЯДРА СЕЙФЕРТОВСКОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 7469 В 1990–2006 гг.: РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В МАЙДАНАКСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2010 г. Б. П. Артамонов, В. В. Бруевич, А. С. Гусев,  
О. В. Ежкова, Л. С. Уголькова, Е. В. Шимановская

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 03.12.2009 г.; принята в печать 05.02.2010 г.

Приводятся результаты *UBVRI*-наблюдений ядра сейфертовской галактики 1-го типа NGC 7469 с 1990 по 2006 гг., проводившихся в Майданакской обсерватории Астрономического института им. Улугбека в Узбекистане. Для всех фильтров построены кривые блеска для разных апертур. Анализ кривых блеска показывает наличие быстрой (от нескольких дней до нескольких десятков дней) и медленной (~8–9 лет) компонент переменной ядра. Характер переменной во всех фильтрах в оптическом диапазоне спектра одинаков, относительная амплитуда переменной уменьшается от *U* к *V*, но в полосе *R* она больше, чем в фильтре *V*. Сравнение с более ранними наблюдениями (до 1990 г.) говорит об увеличении длительности медленной компоненты со временем от 3–6 лет до 8–9 лет за последний период, что свидетельствует об изменении условий излучения в аккреционном диске. Проводится статистическая обработка кривых блеска, а также исследуются изменения цветовых характеристик излучения в разные периоды активности. Измерение показателей цвета в диафрагмах разного размера показали, что цвет становится более голубым с приближением к ядру галактики.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Переменность активных ядер галактик (АЯГ) давно находится под пристальным вниманием астрофизиков: ее изучение поможет понять природу и объяснить разнообразие этих удивительных объектов, активность которых связана не со звездами, а с мощным выделением энергии в относительно небольшой центральной области галактики ( $R < 1$  пк). Галактики с центральными эмиссионными областями были открыты Сейфертом в 1943 г. и получили название сейфертовских (SyG) [1]. Главной особенностью SyG является активность центральной области, наблюдаемой как переменный объект, и существование ультрафиолетового избытка в центральной части галактик. К настоящему времени собран значительный наблюдательный материал по SyG, написаны тысячи статей, и тем не менее большой интерес представляет систематическое пополнение существующей базы данных новыми наблюдениями и выявление закономерностей и особенностей излучения во всех длинах волн, что дает возможность провести проверку различных теоретических моделей центрального источника энергии.

Сейфертовская галактика 1-го типа NGC 7469 (Arp 298 = MCG 1-58-25) является спиральной SBa-галактикой, слабо наклоненной к лучу зрения.

Координаты объекта —  $RA = 23^h 03^m 15.75^s$ ,  $Dec = +08^\circ 52' 25.9''$  (2000.0). Расстояние до галактики  $D = 68$  Мпк для  $H_0 = 75$  км  $s^{-1}$  Мпк $^{-1}$ , красное смещение  $z = 0.01639$ . Области звездообразования располагаются в виде кольца вокруг центральной области галактики. В инфракрасном свете видна еще одна кольцевая группа областей звездообразования на угловом расстоянии  $1.5''$  от ядра галактики. Центральная область галактики NGC 7469 обнаруживает переменность в рентгеновской, ультрафиолетовой, оптической и инфракрасной областях, а также в спектральных линиях. В радиодиапазоне NGC 7469 наблюдается в виде слабого источника, а с 2000 по 2002 гг. она проявляла себя как радиосверхновая [2, 3].

В оптическом диапазоне фотометрия ядра NGC 7469 проводилась Дорошенко и др. [4] с 1967 по 1987 гг., Меркуловой [5] в 1990–1998 гг. и Сергеевым и др. [6] в 2002–2003 гг. в Крымской астрофизической обсерватории и в Крымской лаборатории ГАИШ. Отметим создание международного проекта AGN Watch [7], результаты которого отражены во многих работах по переменной активности активных галактических ядер, в том числе по переменной NGC 7469 в оптическом диапазоне [8–10], по быстрой переменной [11–13], по данным с Космического телескопа Хаббла

(HST). Японские астрономы провели наблюдения NGC 7469 на телескопе MAGNUM в период с 2001 по 2003 гг. [14].

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Многоцветные наблюдения сейфертовской галактики NGC 7469 проводились на 1.5-м телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории с 1997 по 2006 гг. на протяжении 2–3 мес каждый год. С 1997 г. наблюдения проводились с использованием ПЗС-камеры TI 800 × 800, а с 2000 г. — с ПЗС-камерой SIT 2000 × 800. Во всех случаях использовались бесселевские *UBVRI*-фильтры, и обе камеры охлаждались жидким азотом. Кроме того, для анализа переменности были добавлены данные фотоэлектрических *UBVR*-наблюдений, полученных О.В. Ежковой и др. в период с 1990 по 2001 гг. в рамках программы ROTOR на двух телескопах: АЗТ-14 (диаметр зеркала — 48 см) и “Цейсс-600” (диаметр зеркала — 60 см).

**Наблюдения с 1990 по 2001 гг.** Размер диафрагмы на фотометре, установленном на телескопе “Цейсс-600”, был равен 28.9", на телескопе АЗТ-14 — 26". В качестве звезды сравнения использовалась звезда SAO 127930:  $RA = 23^h 03^m 30.5^s$ ,  $Dec = +08^\circ 48' 24''$  (2000.0),  $V = 8.749^m$ ,  $U-B = -0.016^m$ ,  $B-V = 0.496^m$ ,  $V-R = 0.292^m$ . Методика обработки наблюдательных данных описана в статье Бердникова [15]. Погрешность наблюдений составляет  $\Delta V = B-V = 0.015^m$ ,  $U-B = 0.04^m$ ,  $V-R = 0.02^m$ .

**Наблюдения с 1997 по 2006 гг.** ПЗС-наблюдения дали возможность проанализировать данные с различными диафрагмами: 10", 15", 20" и 30". С 2000 г. в качестве звезды сравнения использовалась звезда № 1 из списка звезд сравнения, приведенного в работе [16]:  $RA = 23^h 03^m 31.3^s$ ,  $Dec = +08^\circ 52' 00.3''$  (2000.0),  $B = 13.299^m \pm 0.011^m$ ,  $V = 12.671^m \pm 0.006^m$ ,  $R = 12.284^m \pm 0.014^m$ ,  $I = 11.945^m \pm 0.014^m$ ; эта звезда сравнима по яркости с галактикой и находится с ней на одном кадре. В 1997–1998 гг. в качестве звезды сравнения использовалась звезда SAO 127930 с координатами  $RA = 23^h 03^m 30.5^s$ ,  $Dec = +08^\circ 48' 24''$  (2000.0), звездная величина  $I$  которой были определены путем сравнения со звездой № 1, когда они наблюдались на одном кадре. Звезда была исследована на переменность.

Для обработки было использовано в общей сложности более 2000 кадров. Методика обработки разрабатывалась сотрудниками Майданакской лаборатории с использованием программного комплекса MIDAS (Munich Image Data Analysis System), со временем она улучшалась, и многие

блоки обработки были частично или полностью автоматизированы, что позволяет более быстро получать конечный результат при обработке данных длительного мониторинга. Вторая часть обработки проводилась с использованием программных систем MATLAB и IDL. Поскольку задача выявления сверхбыстрой переменности (переменности порядка часов, т.е. меньше суток) не ставилась, то проводилось усреднение данных за каждые сутки (2–10 кадров за ночь). Анализ ошибок наблюдения показал рост погрешности только в дни, близкие к полнолуннию, или дни, характеризующиеся ухудшением погодных условий. Ошибка наблюдений находится в пределах от  $0.001^m$  до  $0.01^m$  для фильтров  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$  и составляет  $0.02^m$  для  $U$ -фильтра. Звезды сравнения находятся на одном кадре с галактикой на небольшом угловом расстоянии от объекта, так что эффекты атмосферной экстинкции и переменности воздушной массы не учитывались. Все данные исправлены за поглощение межзвездной средой Галактики. Инструментальная система всех наблюдений была приведена к стандартной системе Джонсона–Казинса.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

По всем полученным нами данным построены объединенные кривые блеска ядра галактики в фильтрах *UBVRI* с использованием диафрагмы 28.9", так как ранние фотометрические наблюдения проводились именно с такой диафрагмой. На рис. 1 представлены результаты наблюдений с 1990 по 2006 гг. в фильтрах *UBVRI*.

Анализ кривых блеска (рис. 1) показывает наличие двух циклов активности: с 1994 по 2002 гг. и с 2003 по 2007 гг. В большинстве SyG наблюдаются медленные компоненты переменности ядра с длительностью порядка нескольких лет и быстрые изменения вспышечного характера с длительностью от нескольких дней до несколько десятков дней — S- (медленная) и F- (быстрая) компоненты, соответственно. В случае NGC 7469 длительность S-компоненты составляет ~8–9 лет в первом цикле активности и ~4–5 лет в следующем цикле в течение наблюдательного мониторинга. F-компонента наблюдается во всех фазах циклов активности. S-компонента представлена сплошной линией на рис. 2 (левая часть рисунка) для четырех фильтров. Здесь хорошо виден максимум 1997–1998 гг., а также минимум кривой блеска 1994 г. и минимум 2002–2003 гг. Для выделения медленной компоненты использовалась аппроксимация полиномом 5-й и 7-й степени. Справа на рис. 2 представлена остаточная разность потока после вычитания медленной компоненты из общей кривой яркости.

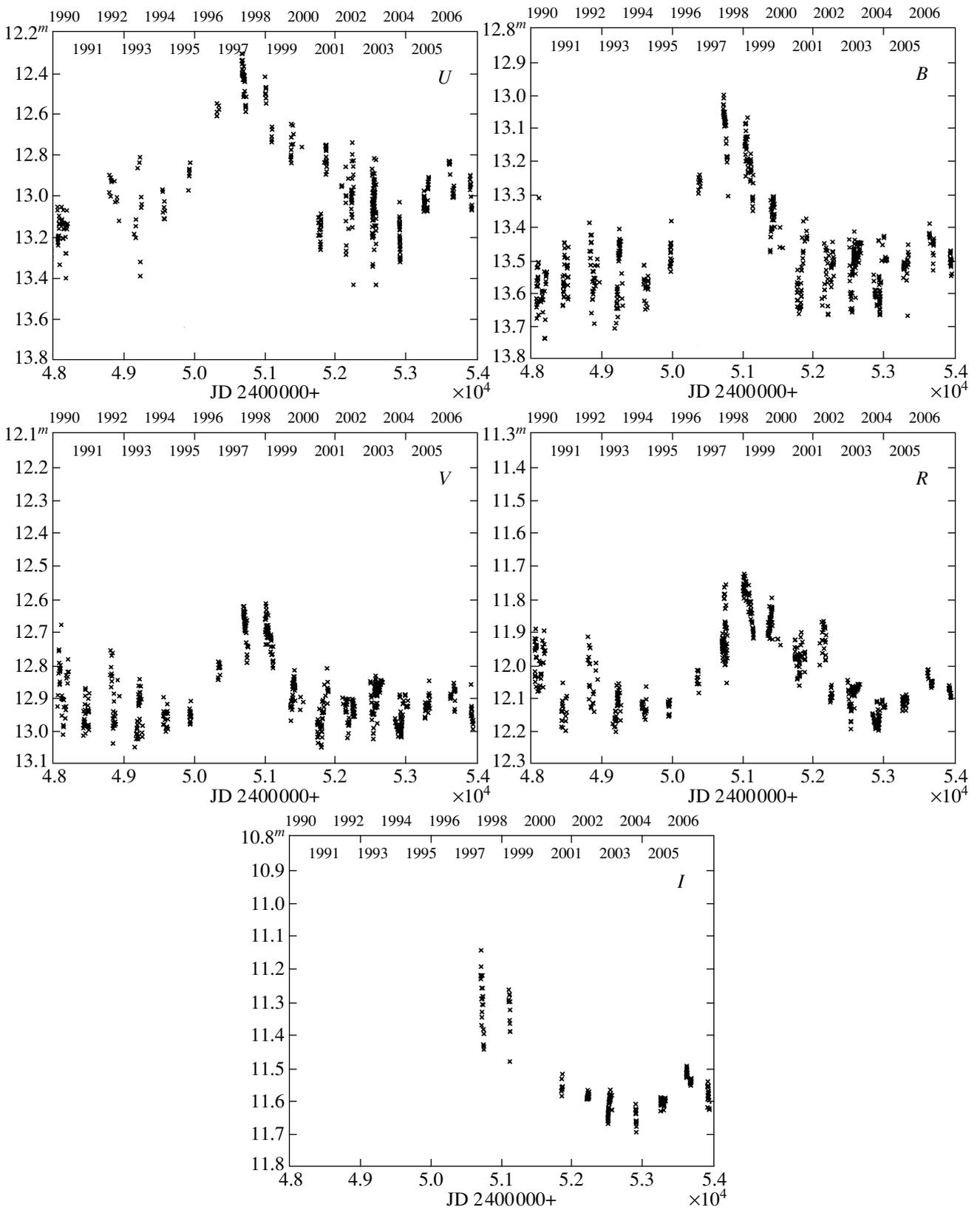


Рис. 1. Кривые блеска NGC 7469 в фильтрах *UBVRI* в 1990–2006 гг.

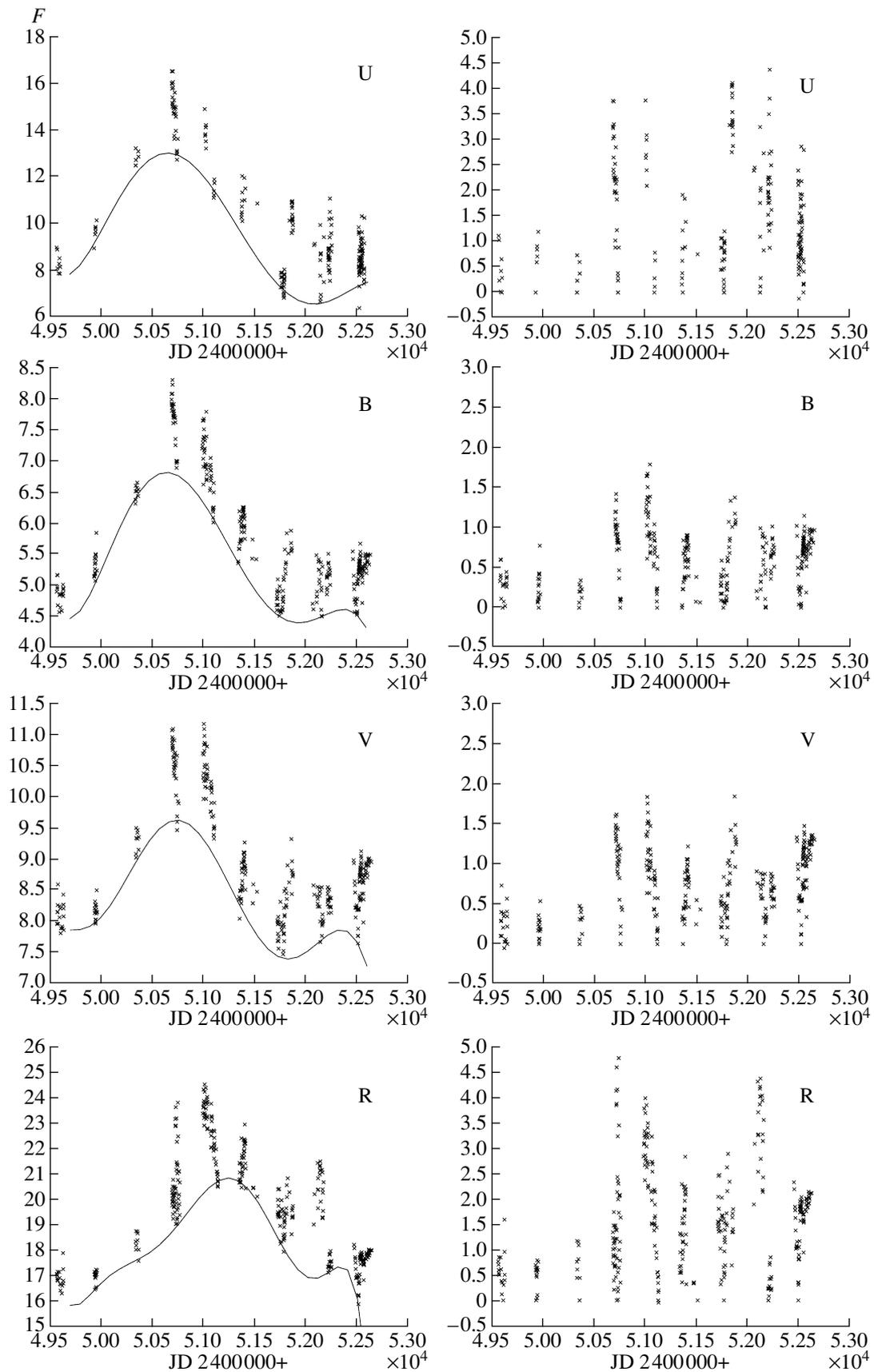


Рис. 2. Медленная (слева) и быстрая (справа) компоненты переменности NGC 7469 в фильтрах *UBVR* в 1994–2002 гг.

Остаточная разность представляет собой несколько F-компонент переменности ядра.

В качестве примера на рис. 3 показано характерное поведение F-компоненты (без вычета медленной компоненты) переменности в 2003 г. в *UBVRI*-фильтрах. Можно с уверенностью сказать, что характер переменности во всех фильтрах оптического спектра подобен, но на разных временных интервалах наблюдается переменность различной амплитуды, что демонстрирует проведенный статистический анализ по методике, описанной в работе Петерсона [17].

На рис. 4 представлена зависимость логарифма отношения потоков  $\Delta \lg F = \lg[F(t_j)/F(t_i)]$ , где  $F(t_i)$  — поток излучения ядра галактики в определенном фильтре в момент времени  $t_i$ , от временного интервала между наблюдениями  $\Delta t = t_j - t_i$ . Амплитуда переменности на временных масштабах порядка нескольких дней меньше, чем на масштабах в несколько месяцев и в несколько лет.

Сравнение кривых блеска NGC 7469 в разных фильтрах показывает увеличение потока излучения от ядра с уменьшением длины волны (левая часть рис. 2). Для первого цикла активности в фильтре *U* разность значений яркости в максимуме и в минимуме составляет 6.5 в относительных единицах интенсивности, полученных из кривой яркости в звездных величинах (рис. 1); в *B*-фильтре эта разность равна 2.3, а в *V*-фильтре она почти одинакова с *B*-фильтром и равна 1.8. Однако в полосе *R* снова наблюдается рост интенсивности излучения до 4.0.

Рис. 2 (правая часть) демонстрирует такой же эффект для F-компоненты, т.е. наблюдается очень сильное излучение F-компоненты в фильтре *U*, уменьшение амплитуды вспышки в *B*- и *V*-фильтрах и увеличение в фильтрах *R* и *I*. Такое же поведение амплитуды наблюдалось для SyG NGC 4151 в работе [18]. Продолжительность вспышки при этом одинакова во всех фильтрах для F-компоненты переменности. S-компонента также имеет одинаковую продолжительность во всех фильтрах.

В фильтрах *U*, *B* и *V* наблюдается быстрое увеличение блеска S-компоненты с 1994 по 1997 гг. и более медленный спад с 1997 по 2002 гг. Максимум первого цикла активности лежит между 1997 и 1998 г. Более точное определение реального максимума будет возможным после сравнения всех доступных наблюдательных данных.

Величина амплитуды F-компоненты всегда меньше амплитуды S-компоненты. Например, для S-компоненты разность амплитуд в фильтре *B* равна  $0.5^m$ , для F-компоненты в том же фильтре она находится в пределах от  $0.02^m$  до  $0.4^m$  (в диафрагме  $28.9''$ ).

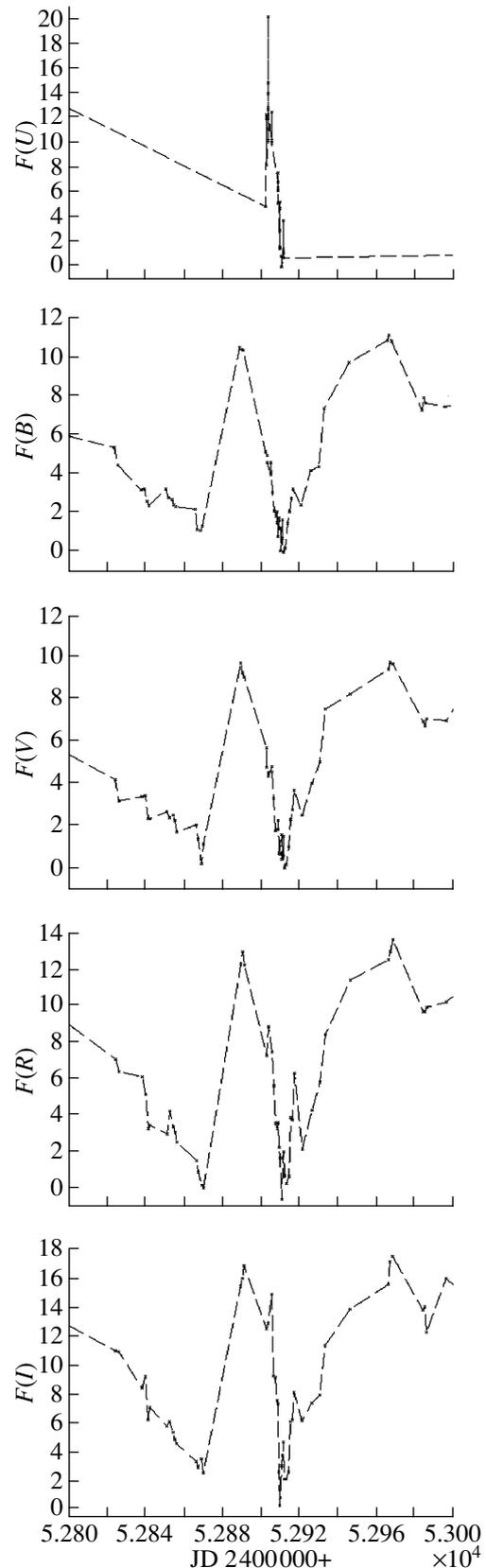


Рис. 3. Быстрая компонента переменности ядра NGC 7469 в 2003 г.

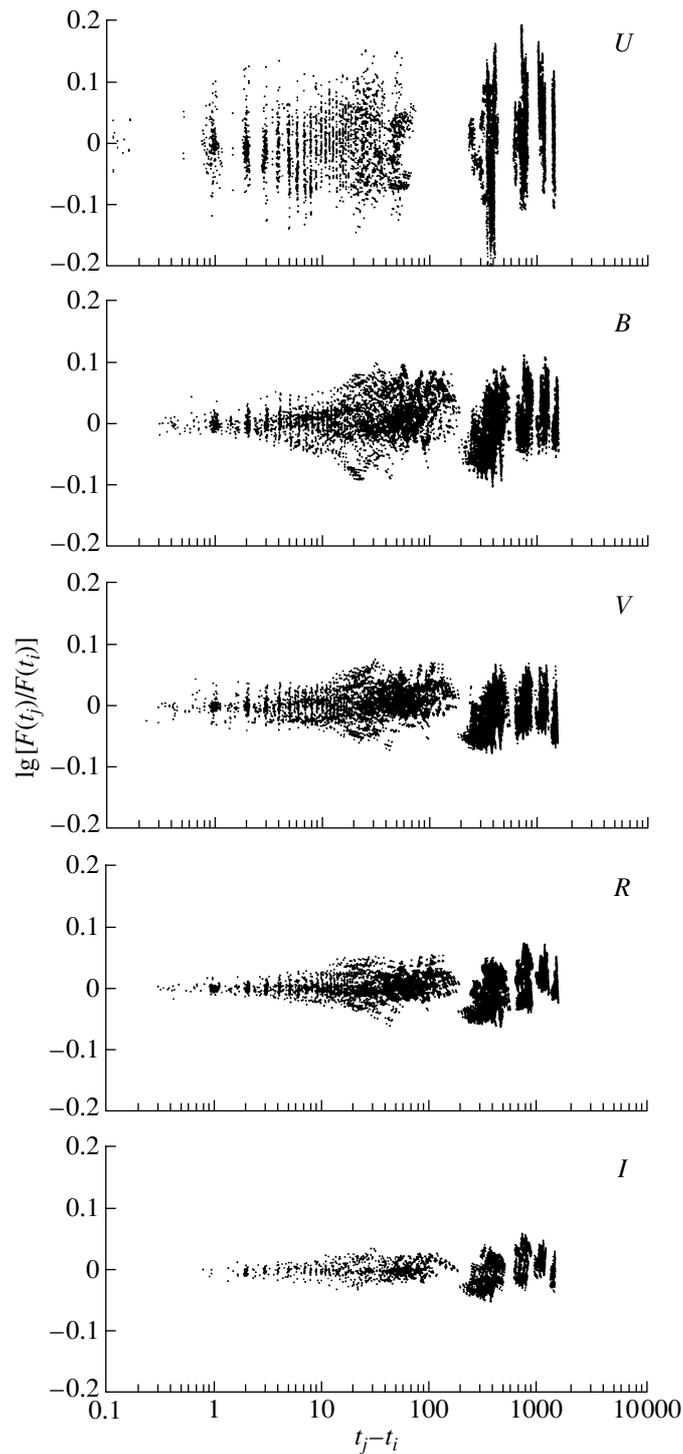


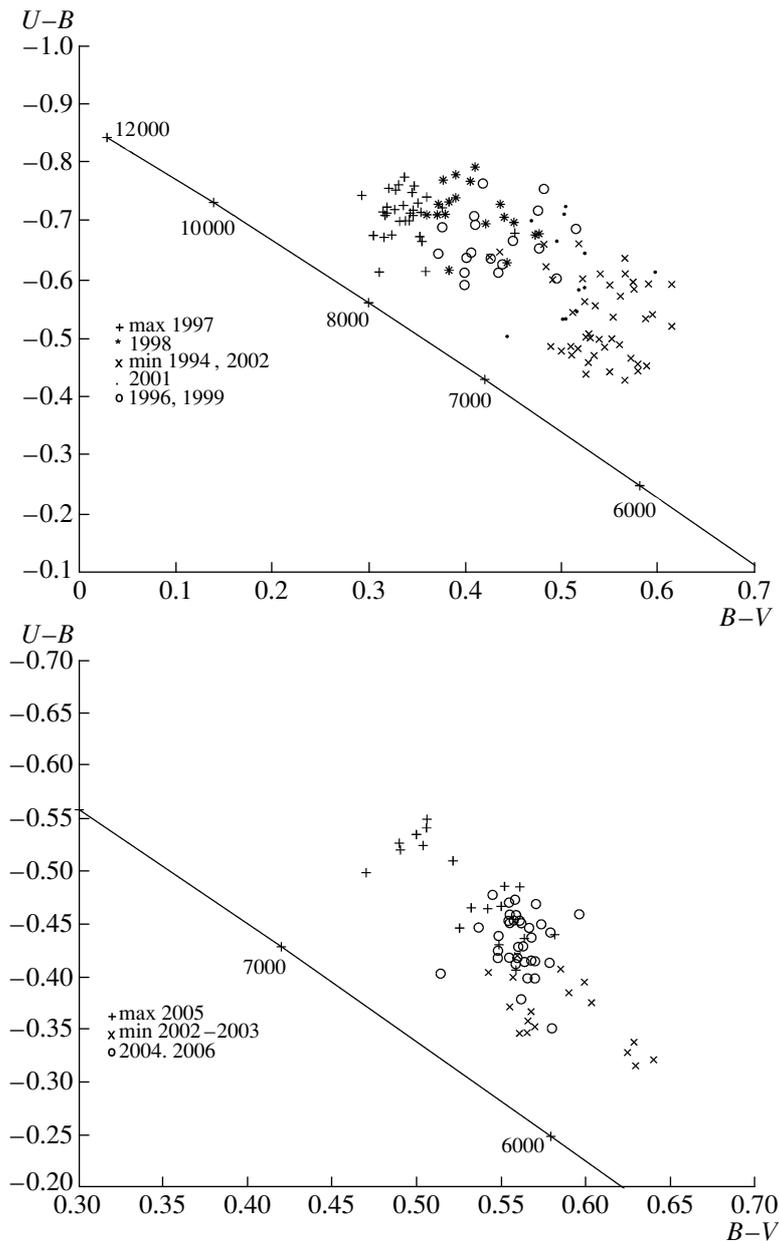
Рис. 4. Характеристики переменности NGC 7469: зависимость  $\Delta \lg F = \lg[F(t_j)/F(t_i)]$  от  $\Delta t = t_j - t_i$ .

Сравнение наших наблюдений с данными более ранних эпох [4] выявляет увеличение длительности S-компоненты со временем от 3 лет (1970-е гг.) до 8–9 лет (1994–2002 г.). После минимума 2002–2003 гг. наблюдалась новая вспышка до 2007 г. с максимумом в 2005 г. Это также S-компонента, но

более слабая, и продолжительность ее составляет всего 4 года.

#### 4. ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

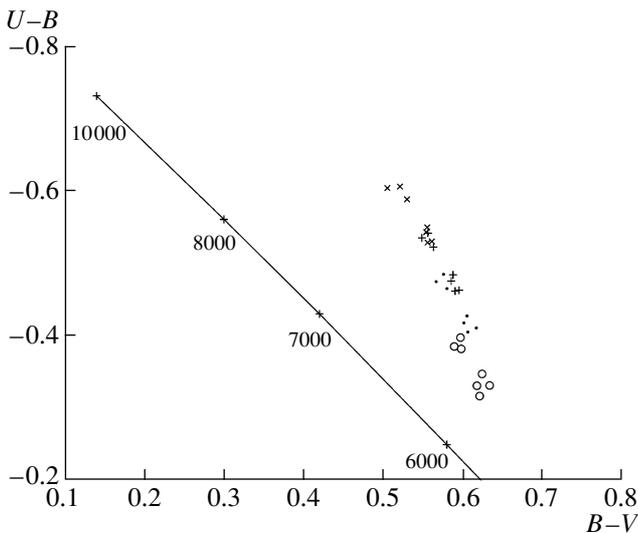
Результаты многоцветной фотометрии дают возможность исследовать характер изменений



**Рис. 5.** Показатели цвета NGC 7469 на двухцветной диаграмме  $(U-B)-(B-V)$  в разные периоды активности 1-го цикла с 1994 по 2002 гг. (верхний график) и 2-го цикла с 2002 по 2006 гг. (нижний график).

распределения энергии в спектре объекта. На двухцветной диаграмме  $(U-B)-(B-V)$  (рис. 5) проведено сравнение цветовых характеристик кривой блеска центральной части NGC 7469 с цветами чернотельного излучения газа, моделирующего излучение аккреционного диска. Цвета, приведенные на рис. 5, получены с диафрагмой  $28.9''$ . С ростом светимости переменного источника в ядре сильно увеличивается УФ-избыток. Из рисунка видно, что галактика NGC 7469 демонстрирует увеличение УФ-избытка в максимуме в обоих циклах. В первом цикле активности амплитуда яркости

значительно больше в максимуме, чем во втором. УФ-избыток увеличивается с амплитудой яркости. Увеличение и спад яркости дают промежуточные значения показателей цвета между максимумом и минимумом. Изменение показателей цвета с амплитудой яркости на рис. 5 происходит параллельно линии изменения цвета для чернотельного излучения с повышением температуры. Грубая оценка показывает для максимума в первом цикле температуру около 10000 К и для второго цикла около 7000 К при условии, что основная часть излучения переменного источника определяется



**Рис. 6.** Изменение показателей цвета на двухцветной диаграмме  $(U-B)-(B-V)$  с приближением к ядру галактики NGC 7469 гг. Крестики соответствуют размеру диафрагмы  $r = 5''$ , крестики  $- r = 7.5''$ , точки  $- r = 10''$ , кружки  $- r = 15''$ .

чернотельным излучением аккреционного диска. Для более точной оценки необходимо провести учет вклада галактики и эмиссионных областей, что мы планируем сделать в следующих работах. Отметим, что изменение показателей цвета с ростом амплитуды яркости в сторону увеличения УФ-избытка является характерной особенностью в SyG (см., например, [19]).

Наблюдения с ПЗС-камерой позволяют измерять яркость галактики в разных диафрагмах, что дает возможность сделать оценки изменения показателей цвета на разных расстояниях от ядра галактики. На рис. 6 показана зависимость показателя цвета от радиуса диафрагмы. С приближением к ядру галактики цвет становится более голубым; в больших диафрагмах, вероятно, замечен вклад центральной части галактики. Этот эффект отмечен в работе [20].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время общепринятой точкой зрения на природу переменности ядер SyG является дисковая аккреция на сверхмассивный компактный объект, и все особенности проявления переменности связываются с аккреционным диском [21, 22]. Рост длительности медленной компоненты, излучение которой связано с аккреционным диском, подтверждает возможность изменения условий аккреции [23].

В статье представлены результаты  $UBVRI$ -наблюдений ядра сейфертовской галактики NGC 7469 в Майданакской обсерватории в 1990–2006 гг. Построены кривые блеска для всех фильтров, приведенных к размеру диафрагмы  $28.9''$ . Анализ кривых блеска показывает наличие быстрой компоненты переменности длительностью от нескольких дней до нескольких десятков дней и медленной компоненты длительностью  $\sim 8-9$  лет для первой активной фазы и 4–5 лет для второй активной фазы переменности ядра.

Наблюдения показали следующее.

1. Характер переменности во всех фильтрах в оптическом диапазоне спектра одинаков.

2. Относительная амплитуда переменности уменьшается с увеличением длины волны для обеих компонент от  $U$  к  $V$ , затем снова увеличивается для полос  $R$  и  $I$ . В фильтре  $U$  она в обоих циклах активности особенно велика.

3. Для S-компоненты первого цикла активности наблюдается быстрый (3 года) подъем и более медленный (5 лет) спад яркости NGC 7469.

4. Максимум интенсивности излучения для первого цикла активности перемещается с 1997 г. в фильтрах  $U, B, V$  к 1998 г. в фильтре  $R$ . Вероятнее всего он находится между 1997 и 1998 гг.

Анализ изменения цветовых характеристик излучения в разные периоды активности показал следующее.

1. На двухцветной диаграмме  $(U-B)-(B-V)$  проведено сравнение цветовых характеристик S-вспышек с цветами чернотельного излучения газа, моделирующего излучение аккреционного диска. В максимуме обоих циклов активности цвет центра галактики становится более голубым по сравнению с минимумом.

2. Цвет центральной области галактики становится более голубым с приближением к ядру галактики. Одной из причин этого эффекта может быть значительная доля излучения от звездного населения центральной области галактики, особенно в диафрагмах большого размера.

Для более глубокого анализа необходимо объединить наблюдательные данные, полученные на других телескопах. Мы планируем провести эту работу вместе с поверхностной фотометрией ПЗС-кадров галактики NGC 7469 в  $UBVRI$  для учета вклада звездного населения в центральной области. Один из авторов (О.В. Ежкова) благодарит всех наблюдателей, принимавших участие в программе ROTOR.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 09-02-00244-а и 08-02-01323-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. K. Seyfert, *Astrophys. J.* **97**, 28 (1943).
2. W. D. Li, R. Chornock, and A. V. Filippenko, *IAU Circ.* № 7587, 2 (2001).
3. A. Alberdi, L. Colina, J. M. Torrelles, *et al.*, *Astrophys. J.* **638**, 938 (2006).
4. В. Т. Дорошенко, В. М. Лютый, В. Ю. Рахимов, Письма в "Астрон. журн." **15**, 483 (1989).
5. N. I. Merkulova, *Astron. J.* **119**, 631 (2000).
6. S. G. Sergeev, V. T. Doroshenko, Yu. V. Golubinskiy, *et al.*, *Astrophys. J.* **622**, 129 (2005).
7. D. Alloin, J. Clavel, B. M. Peterson, *et al.*, in: *Frontiers of Space and Ground-based Astronomy*, eds W. Wamsteker, M. S. Longair, Y. Kondo (Dordrecht: Kluwer, 1994), p. 423.
8. H. Netzer and B. M. Peterson, in: *Astronomical Time Series*, eds D. Maoz, A. Sternberg, E. M. Leibowitz (Dordrecht: Kluwer, 1997), p. 85.
9. M.-H. Ulrich, L. Maraschi, and C. M. Urry, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **35**, 445 (1997).
10. P. T. O'Brien and K. M. Leighly, *Adv. Space Res.* **21**, 67 (1998).
11. D. Dultzin-Nacyan, W. J. Shuster, L. Parrao, *et al.*, *Astron. J.* **103**, 1796 (1992).
12. D. Dultzin-Nacyan, A. Ruelas-Mayorga, and R. Costero, *Rev. Mex. Astron. y Astrofis.* **25**, 143 (1993).
13. W. F. Welsh, B. M. Peterson, A. P. Koratkar, and K. T. Korista, *Astrophys. J.* **509**, 118 (1998).
14. M. Suganuma, Y. Yoshii, Y. Kobayashi, *et al.*, *Astrophys. J.* **639**, 46 (2006).
15. Л. Н. Бердников, *Переменные звезды* **22**, 369 (2000).
16. V. T. Doroshenko, S. G. Sergeev, N. T. Merkulova, *et al.*, *Astrophysics* **48**, 304 (2005).
17. B. M. Peterson, e-Print arXiv: astro-ph/0109495v1 (2001).
18. В. Т. Дорошенко, В. М. Лютый, Н. Г. Бочкарев и др., Письма в "Астрон. журн." **27**, 691 (2001).
19. В. М. Лютый, Письма в "Астрон. журн." **31**, 723 (2005).
20. В. Т. Дорошенко, В. М. Лютый, В. И. Шенаврин, Письма в "Астрон. журн." **24**, 197 (1998).
21. B. Czerny, in: *AGN Variability from X-Rays to Radio Waves*, ASP Conf. Ser. **360**, 265 (2006).
22. V. Lyuty, in: *AGN Variability from X-Rays to Radio Waves*, ASP Conf. Ser. **360**, 3 (2006).
23. В. М. Лютый, В. Т. Дорошенко, Письма в "Астрон. журн." **25**, 403 (1999).