

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ ЯДЕР СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК ВТОРОГО ТИПА. II

С. И. Неизвестный

По данным, приведенным в статье I [1], изучается оптическая переменность 11 сейфертовских галактик. Найдено, что переменность у сейфертовских галактик второго типа (СГ2) присутствует на временах месяцы—годы. Амплитуда переменности этих галактик в *UBVR*-фильтрах в среднем в 1.5 раза меньше, чем у сейфертовских галактик первого типа. Суточные вариации у СГ2 не обнаружены. Дается краткая интерпретация полученных результатов.

Optical variability of 11 Seyfert galaxies is studied from the data, presented in the paper [1]. It is found that there is variability in Seyfert 2S (Sy 2) at time-scales months—years. The variability amplitude of these galaxies in *UBVR* filters is at an average one and a half lower than those of Sy 1. Day-to-day variations in Sy 2 are not detected. A short interpretation of the obtained results is given.

В данной работе проводится обработка и анализ результатов наблюдений, опубликованных в статье I [1]. Там же описана общая постановка задачи изучения переменности сейфертовских галактик второго типа. Здесь мы проводим оценки амплитуды переменности для исследуемых 11 сейфертовских галактик. Анализируется возможная связь активности (амплитуды переменности) этих галактик с их ориентацией в пространстве относительно наблюдателя; с морфологией и светимостью в оптической области спектра; со светимостью в линии H_β и отношением интенсивности эмиссионных линий [OIII] 4959+5007/ H_β (параметром, характеризующим условия возбуждения в ядре); с цветовыми характеристиками их ядер. Анализ взаимосвязи активности ядер исследуемых СГ с градиентом яркости и цвета (распределением вдоль радиуса) окружающих галактик представляет особый интерес и будет проведен в следующей работе.

Обработка временных рядов наблюдений. В табл. 1а приведены амплитуды переменности исследуемых галактик на временах месяцы—годы, в табл. 1б — амплитуды суточной переменности. Эти результаты даны в пересчете на минимальную диафрагму, в которой измерялся объект (см. табл. 5 работы [1]). Линейные размеры минимальной диафрагмы для большей части галактик составляли 1—2 кпк. При этом типичные среднеквадратичные погрешности отдельного измерения в фильтре *U* заключены в пределах 0.^m05—0.^m11; в фильтрах *BVR*: 0.^m02—0.^m06. Для Маркарян 620 эти значения составляют 0.^m04—0.^m02 и 0.^m03—0.^m02 соответственно.

При оценке уровня значимости переменности ядер исследуемых объектов мы пользовались критерием Фишера:

$$F = \frac{\sigma^2(I_j)}{\sigma_{wj}^2}.$$

Здесь $\sigma^2(I_j)$ — выборочная дисперсия наблюдаемых интенсивностей излучения в *j*-м фильтре (*U*, *B*, *V*, *R*), посчитанная для всего имеющегося ряда наблюдений объекта; σ_{wj}^2 — средневзвешенная (тоже по всему периоду наблюдений) дисперсия ошибок отдельного измерения в фильтре *j*:

$$\sigma_{wj}^2 = n \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_{ji}(\tau)} \right)^2 \right]^{-1};$$

ТАБЛИЦА 1а

Объект	U	B	V	R
3	0 ^m 38	0 ^m 28	0 ^m 22	0 ^m 30
6	1.09	0.74	0.42	0.54
34	0.63	0.41	0.38	0.45
78	0.76	0.48	0.40	0.41
176	0.55	0.21	0.13	0.16
348	0.46	0.32	0.24	0.29
533	0.39	0.39	0.38	0.42
573	0.49	0.38	0.30	0.31
620	0.14	0.12	0.09	0.11
917	0.52	0.50	0.41	0.38
1040	0.50	0.37	0.33	0.35

ТАБЛИЦА 1б

Объект	U	B	V	R
3	0 ^m 09	0 ^m 05	0 ^m 08	0 ^m 08
6	0.31	0.20	0.07	0.11
34	0.16	0.08	0.10	0.13
78	0.08	0.04	0.07	0.06
176	0.13	0.07	0.09	0.09
348	0.10	0.14	0.07	0.10
533	0.14	0.09	0.10	0.07
573	0.08	0.05	0.07	0.09
620	0.06	0.03	0.04	0.04
917	0.18	0.11	0.10	0.09
1040	0.44	0.26	0.21	0.19

$\sigma_{ji}(\tau)$ — среднеквадратичная ошибка i -го измерения в момент времени τ ;
 n — число наблюдений.

С учетом неравноточности отдельных измерений:

$$\sigma^2(I_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{ji}(\tau) - \bar{I}_j)^2 \left(\frac{1}{\sigma_{ji}^2(\tau)} \right)}{n-1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_{ji}^2(\tau)} \right)},$$

где $\bar{I}_j = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ji}(\tau) \left(\frac{1}{\sigma_{ji}^2(\tau)} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{ji}^2(\tau)}}$ — средневзвешенное значение интенсивности.

Более детальные методы обработки (например, такие, как Фурье-анализ, метод Диминга) в данном случае не совсем применимы, так как полученные ряды наблюдений по отдельным объектам имеют еще небольшой объем. Поэтому мы считаем, что для целей, преследуемых здесь, достаточно корректно применение критерия Фишера.

Анализ и обсуждение результатов наблюдений. Все исследуемые объекты на временах месяцы—годы имеют переменность в *UBVR* фильтрах с вероятностью 0.99 и больше.

Максимальную амплитуду переменности во всех четырех фильтрах (здесь и далее мы работали с уровнем значимости 0.01) проявляет галактика Маркарян 6, имеющая ядро с сейфертовскими характеристиками промежуточного типа 1.5. Наименьшую амплитуду переменности имеет ядро галактики Маркарян 620, которая по своим спектральным характеристикам находится вблизи границы между СГ2 и галактиками с узкими эмиссионными линиями [11]. Все исследуемые объекты имеют максимальную амплитуду переменности в фильтре *U*, в фильтре *V* амплитуда минимальна.

Ни у одной из галактик второго типа не обнаружена суточная переменность (по крайней мере в указанные периоды наблюдений). Маркарян 6 имеет значимые вариации блеска от ночи к ночи в *U* и *B* фильтрах, а Маркарян 1040 переменна во всех четырех фильтрах. Амплитуда переменности Маркарян 1040 на временах месяцы—годы примерно такая же, как и суточная. Это может быть косвенным свидетельством того, что переменное излучение, проявляющееся в этих разных диапазонах времен, формируется в одной и той же пространственной области. «Завал» амплитуды переменности у СГ2 происходит на временах десятки дней. Отсюда можно сделать грубую оценку размеров области, в которой формируется переменное излучение в оптическом континууме, — $3 \cdot 10^{16}$ см.

На двухцветных диаграммах $(U-B)_0-(B-V)_0$ (рис. 1) и $(B-V)_0-(V-R)_0$ (рис. 2) показано изменение цвета исследуемых объектов в зависимости от блеска. Штриховыми линиями соединены значения цветов, соответствующие минимальному и максимальному (на рисунках отмечено стрелкой) блеску объекта в фильтре U . У начала стрелок проставлены номера, идентифицирующие объекты. Кривые с цифрами вдоль них показывают положение источника со степенным распределением энергии в спектре (цифры соответствуют значениям показателя α в зависимости $F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$). Штрихпунктирной кривой показан

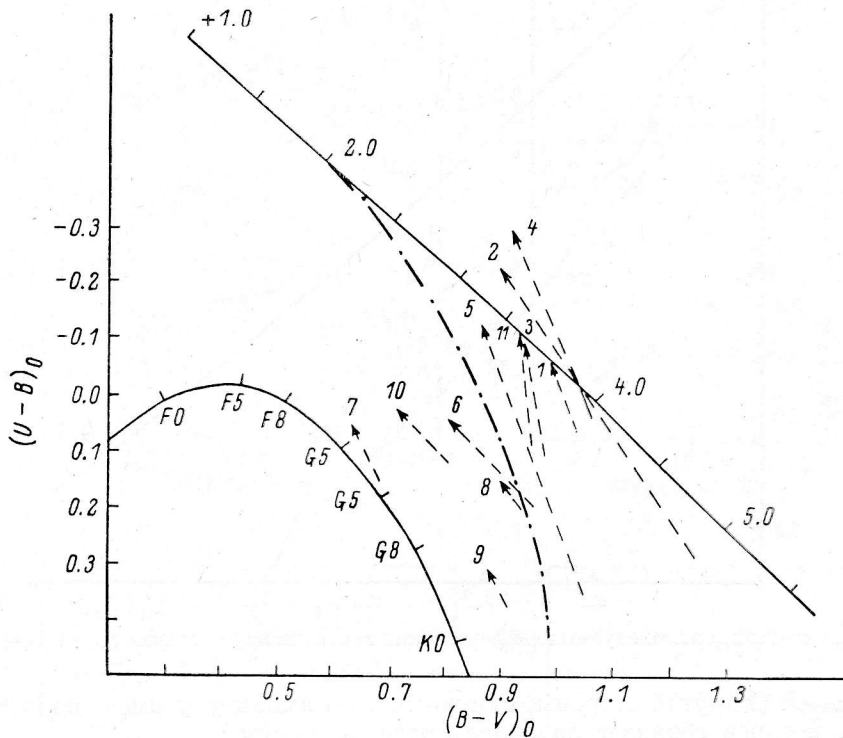


Рис. 1. Положение ядер исследуемых сейфертовских галактик на диаграмме $(U-B)_0-(B-V)_0$. Пояснения в тексте. Маркеры: 1 — 3, 2 — 6, 3 — 34, 4 — 78, 5 — 176, 6 — 348, 7 — 533, 8 — 573, 9 — 620, 10 — 917, 11 — 1040.

трек для двухкомпонентной модели источника излучения, состоящего из E/SO галактики и источника с чисто степенным распределением энергии с показателем спектра $\alpha = 2$. Отношение интенсивностей $F_{\text{ультрафиолет}}/F_{\text{визуальный}}$ изменяется вдоль трека от 0 (нижняя точка на диаграмме) до ∞ . Выбор исходного положения на двухцветной диаграмме в качестве цветов E/SO галактик обусловлен тем, что, с одной стороны, около половины галактик данной выборки имеют тип SO(SO/a), с другой стороны, при исследовании в околоядерной области, начиная с расстояний 1—2 кпк от ядра, роль балджа (имеющего характеристики E/SO галактик) становится доминирующей над плоской составляющей в большинстве случаев галактик равного морфологического типа. Показатели цвета объектов исправлялись за влияние поглощения в нашей Галактике. Значение колор-эксса $E_{(B-V)}$ определялось по картам, приведенным в работе [12]. Остальные колор-эксссы определялись по формулам:

$$E_{(U-B)}/E_{(B-V)} = 0.72;$$

$$E_{(V-R)}/E_{(B-V)} = 0.84,$$

взятым из работ [2] и [3].

Как видно из рисунков, с изменением яркости исследуемых объектов точки, определяющие положение этих объектов на диаграммах, описывают треки, проходящие примерно вдоль кривой для двухкомпонентной модели. С увеличением блеска ядра его положение перемещается в сторону увеличения вклада

в общее излучение источника со степенным распределением энергии. Но большой разброс (явно превышающий ошибки измерений!) треков данных объектов относительно кривой двухкомпонентной модели свидетельствует о том, что только этой моделью нельзя объяснить механизм излучения ядер СГ.

Амплитуда переменности ядер СГ2 коррелирует с величиной их показателя цвета $(U-B)$. Как видно из рис. 1, Маркарян 78 имеет наиболее отрицательные значения этого показателя, а амплитуда переменности у него достигает 0.8

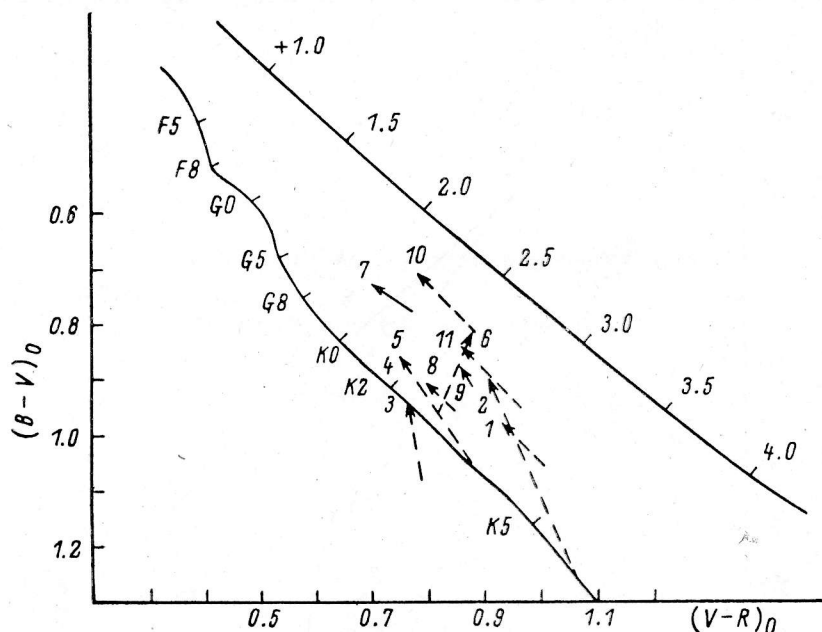


Рис. 2. Положение ядер исследуемых сейфертовских галактик на диаграмме $(B-V)_0-(V-R)_0$.

в фильтре U . С другой стороны, самую низкую амплитуду имеет ядро Маркарян 620, которое обладает наиболее красным цветом.

С увеличением блеска ядра галактики его цвет голубеет. Наиболее сильно это проявляется в показателе цвета $(U-B)_0$ (рис. 3), и меньше всего реагирует на изменение блеска показатель $(V-R)_0$.

В табл. 2 приведены величины отношения интенсивностей эмиссионных линий $[OIII] 4959+5007/H\beta$, взятые из литературы, ссылки на которую находятся в последнем столбце. Кроме того, там даны значения амплитуды переменности, представленной в виде отношения интенсивности переменной составляющей к среднему значению в фильтре B , а также абсолютные звездные величины исследуемых галактик в фильтре B и светимости в линии $H\beta$, посчитанные для $H_0=75$ км/с/Мпк.

На рис. 4 показана зависимость амплитуды переменности от отношения интенсивностей эмиссионных линий $[OIII] 4959+5007/H\beta$. Кроме данных по

ТАБЛИЦА 2

Объект	$\Delta I_B/I_B$	M_B	$\lg(H\beta)$	$[OIII]/H\beta$	Ссылка
Маркарян 3	0.29	-20^m46	42.0	17.6	[4]
» 34	0.45	-21.20	42.4	15.6	[4]
» 78	0.55	-20.73	42.1	12.5	[5, 6]
» 176	0.21	-19.86	41.2	20.8	[4]
» 348	0.34	-19.77	41.3	16.3	[4]
» 533	0.43	-21.98	43.4	5.7	[7]
» 573	0.42	-20.24	41.7	7.1	[7]
» 917	0.58	-20.69	42.1	4.2	[7]
NGC 1068	0.18	-21.30	42.2	17.5	[4, 8]

девяти СГ2, исследованных в этой работе, на рис. 4, рис. 5 и в табл. 2 приведены данные для NGC1068. Амплитуда переменности для нее взята из работы [13]. В пересчете к диафрагме 13"5 (область около 1 кпк, близкая к области,

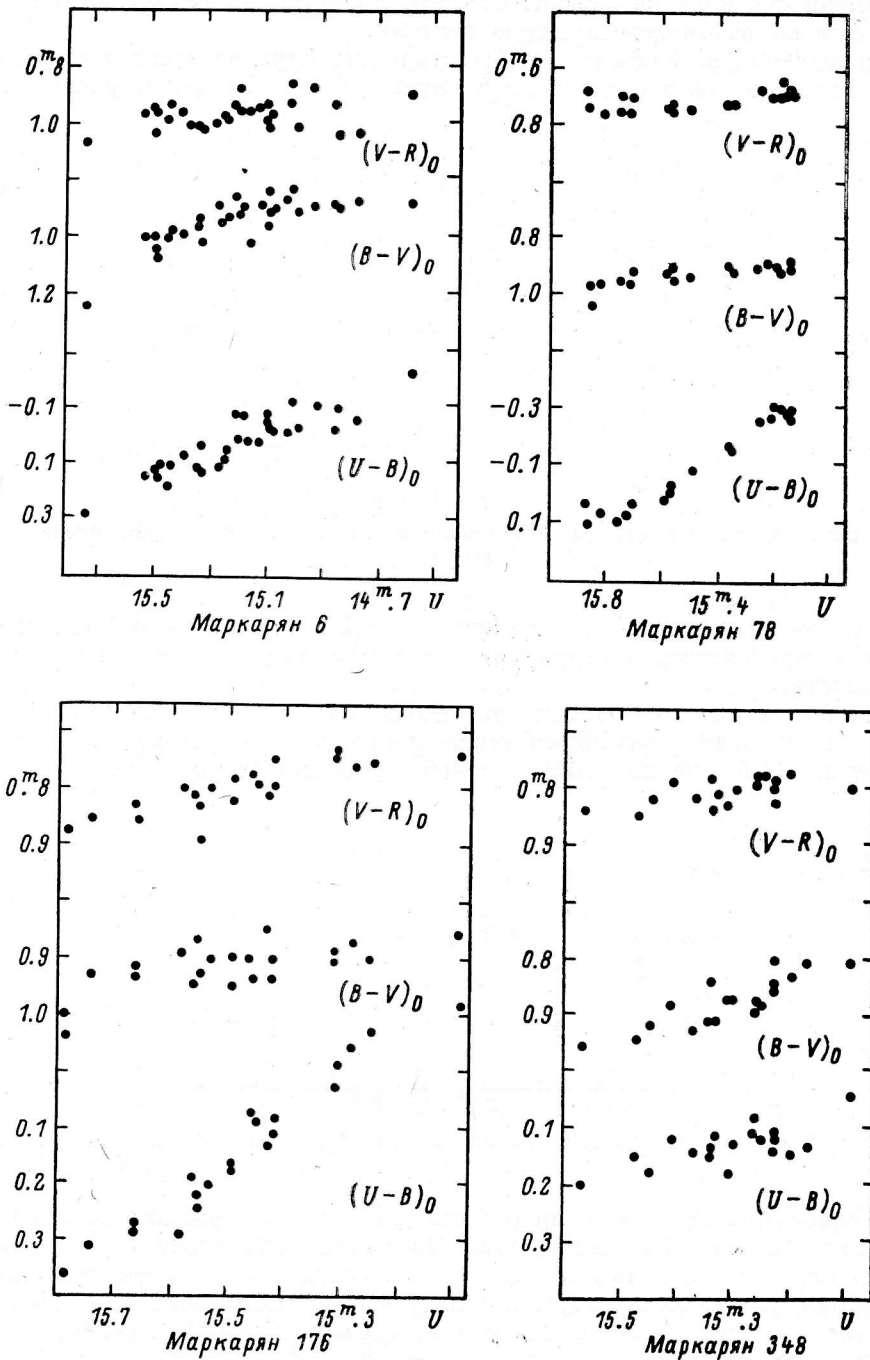


Рис. 3. Изменение цвета ядер галактик в зависимости от их блеска в фильтре U.

в которой оценивалась переменность и для других СГ2) $\Delta I_B/I_B=0.18$. Отношение $b/a=0.83$ взято как среднее из работ [9] и [10].

Коэффициент корреляции, посчитанный при учете неравноточности измерений по отдельным галактикам, равен 0.74 (на 5%-ном уровне значимости для двустороннего критерия нормальной корреляции). Отсюда можно сделать вывод, что с увеличением относительной интенсивности линии H_β амплитуда

переменности исследуемых объектов возрастает. Галактики, которые по параметру $[OIII] 4959+5007/H\beta$ приближаются к нормальным галактикам с эмиссионными линиями [11], имеют низкую амплитуду переменности.

Переменность ядра не зависит от того, является ли галактика одиночной или входит во взаимодействующую систему.

В исследуемой выборке галактик активность ядра не зависит от его абсолютной величины (корреляция отсутствует уже на 10 %-ном уровне значи-

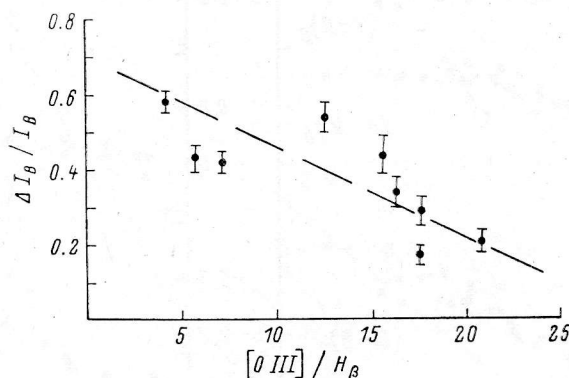


Рис. 4. Зависимость амплитуды переменности ($\Delta I_B/I_B$) от отношения интенсивностей линий $[OIII]/H\beta$ для CG2.

мости). С другой стороны, наличие центральной перемычки или бара, пекулярности в морфологической структуре галактики выделяет ее и по амплитуде переменности.

Переменность CG2 не зависит от отношения видимых осей галактики b/a (на 10 %-ном уровне значимости также корреляция отсутствует). Более того, проведенные наблюдения сейфертовской галактики первого типа Маркарян

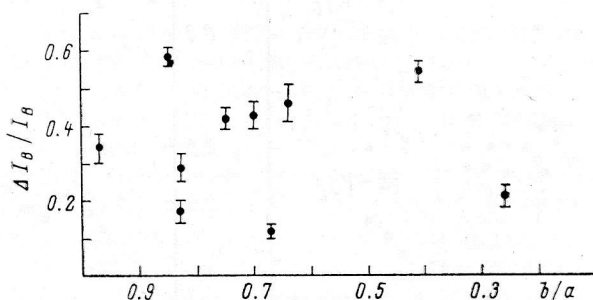


Рис. 5. Зависимость амплитуды переменности ($\Delta I_B/I_B$) от отношения осей b/a для CG2.

1040 в совокупности с данными работы [14] не подтверждают наличия такой зависимости и для CG1 (наблюдения Маркарян 1040 охватывают период немногим более трех лет, поэтому последний результат является предварительным). Этот факт свидетельствует в пользу изотропного проявления активности центрального ядерного источника у исследуемых объектов. По-видимому, CG2 в данном отношении отличаются от лацертид, феномен которых связывают [15—17] с пространственной ориентацией джетов или выбросов вещества из ядра относительно наблюдателя. С другой стороны, имеется дефицит CG, видимых с ребра [18, 19]. Это, в свою очередь, свидетельствует в пользу того, что либо существование сейфертовских характеристик у галактик нельзя объяснить только наличием джетов в плоскости диска, либо ориентация джетов не связана с ориентацией диска (до сих пор окончательно не ясна связь оптических джетов с диском галактики, хотя имеются свидетельства того, что выброс может находиться в плоскости диска [23, 24]).

Амплитуда переменности у сейфертовских галактик первого типа, исследованных на предмет поиска переменности, по работам [13, 14, 21, 22] составляет в среднем $\Delta B = 0^m.5$. Амплитуда переменности СГ2, исследованных в данной работе, примерно в 1.5 раза меньше, чем у СГ1, и составляет в среднем $\Delta B = 0^m.37$. Большинство квазаров, исследованных с целью определения амплитуды переменности, имеет ΔB около $0^m.5 - 1^m.5$ [25]. Хотя, по-видимому, имеется большая группа «спокойных» в оптическом диапазоне спектра квазаров, амплитуда переменности которых не превышает $0^m.1$, и, с другой стороны, около 1 % всех известных квазаров, так называемых блазаров, имеют амплитуду переменности, как и лацертиды, до $5^m.5 - 6^m.0$ [26]. Если амплитуду переменности считать как проявление активности ядра галактики, то СГ2 по этому параметру можно расположить вслед за квазарами и СГ1.

Выводы. По результатам исследования выборки галактик можно сделать следующие выводы.

1. У всех объектов достоверно (для девяти объектов на уровне значимости 0.005, для двух на уровне 0.01) обнаружена переменность излучения ядра в *UBVR*-фильтрах на временах месяцы—годы.

2. У сейфертовских галактик второго типа суточная переменность отсутствует.

3. «Завал» амплитуды переменности СГ2 находится в диапазоне времен десятки дней. В предположении, что возмущения в ядре галактики, приводящие к переменности блеска в континууме, имеют скорость распространения, близкую к скорости света, получаем оценку размера области, в которой формируется переменное излучение $R \sim \Delta t C = 3 \cdot 10^{16}$ см (здесь не учитываются возможные релятивистские эффекты, приводящие к уменьшению шкалы времени Δt). Эта оценка согласуется с размером ядра галактики — R_{cont} , полученного в работе [20].

4. Максимальная амплитуда переменности наблюдается в фильтре *U* и минимальная в фильтре *V* у всех исследуемых объектов. Наиболее голубые ядра СГ2 имеют самую большую переменность.

5. С увеличением яркости ядра его положение на двухцветных диаграммах $(U-B)_0 - (B-V)_0$ и $(B-V)_0 - (V-R)_0$ смещается в сторону положения объектов с большим вкладом излучения от источника со степенным распределением энергии в спектре. Это не противоречит наличию такого источника в активном ядре СГ2. Но, с другой стороны, двухкомпонентная модель (нетепловой степенной источник + окружающая его SO галактика) не может объяснить большой разброс треков исследуемых СГ2, что говорит о присутствии в ядрах галактик и других источников излучения.

6. Амплитуда переменности СГ2 не зависит от отношения осей галактики b/a .

7. Существует корреляция амплитуды переменности СГ2 и интенсивности линии H_β (относительно линий [OIII] 4959 + 5007).

8. Наличие центрального бара или пекулярности в морфологической структуре галактики выделяет ее по амплитуде переменности излучения ядра.

9. Амплитуда переменности сейфертовских галактик второго типа в фильтрах *UBV* в среднем в 1.5 меньше, чем у галактик первого типа.

В совокупности результаты настоящих исследований показывают, что сейфертовские галактики второго типа по степени активности вписываются в последовательность лацертиды—квазары—СГ1—СГ2—галактики с узкими эмиссионными линиями—нормальные галактики.

Автор благодарен В. М. Лютому и С. А. Пустильнику за важные замечания при подготовке данной работы к печати.

Литература

- Неизвестный С. И. Изучение оптической переменности сейфертовских галактик второго типа. I. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1987, 24, с. 3—26.
- Johnson H. L. Interstellar extinction. In *Nebulae & Interstellar Matter*, ed. B. Middlehurst & L. Aller. Chicago, the Univ. of Chicago Press, 1968, p. 167—220.
- Johnson H. L. The law interstellar extinction. — *Rev. Mex. Astron. Astrof.*, 1977, 2, N 3, p. 175—180.

4. Steiner J. E. A spectrophotometric classification of low-redshift quasars & active galactic nuclei. — *Astrophys. J.*, 1981, 250, p. 469—477.
5. Спектры галактик Маркаряна. II / М. А. Аракелян, Э. А. Дибай, В. Ф. Есипов, Б. Е. Маркарян. — *Астрофизика*, 1970, 6, с. 357—366.
6. Koski A. T. Spectrophotometry of Seyfert 2 galaxies and narrow-line radio galaxies. — *Astrophys. J.*, 1978, 223, p. 56—73.
7. Галактики с УФ-континуумом сейфертовского типа по наблюдениям на БТА / В. Л. Афанасьев, В. А. Липовецкий, Б. Е. Маркарян, Дж. А. Степанян. — *Астрофизика*, 1980, 16, с. 193—206.
8. The Fe region in active galactic nuclei / M. V. Penston, R. A. E. Fosbury, A. Voksenberg et al. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1984, 208, p. 347—364.
9. Keel W. C. Inclination effects on the recognition of Seyfert galaxies. — *Astron. J.*, 1980, 85, p. 198—203.
10. Shuder J. M., Osterbrock D. E. Empirical results from a study of active galactic nuclei. — *Astrophys. J.*, 1981, 250, p. 55—65.
11. Osterbrock D. E., Dahari O. Spectra of Seyfert galaxies and Seyfert galaxy candidates. — *Astrophys. J.*, 1983, 273, p. 478—488.
12. Burstein D., Heiles C. Reddenings derived from HI galaxy counts: accuracy and maps. — *Astron. J.*, 1982, 87, p. 1165—1189.
13. Лютый В. М. Оптическая переменность ядер сейфертовских галактик. II. *UBV*- и H_{α} фотометрия. — *Астрон. журн.*, 1977, 54, с. 1153—1167.
14. Лютый В. М. Оптическая переменность ядер сейфертовских галактик. III. *UBV* наблюдения 3C 120, II Zw 136 и Аракелян 120. Особенности оптической переменности ядер компактных галактик. — *Астрон. журн.*, 1979, 56, с. 918—927.
15. Wilson A. Seyfert galaxies. — In: Extra galactic radio sources, IAU Symp. N 97, Dordrecht, 1982, p. 179—188.
16. Browne I. W. A. Is it possible to turn an elliptical radio galaxy into a BL Lac object? — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1983, 204, p. 23—27.
17. Perez-Fournon I., Biermann P. Do all bright elliptical galaxies have nuclei? — *Astron. Astrophys.*, 1984, 130, L13—L15.
18. Дорошенко В. Т., Терещиж В. Ю. Распределение видимых сжатий сейфертовских галактик. — *Астрофизика*, 1980, 16, с. 393—395.
19. Danase L., de Zotti G. Inclination effects and reddening of Seyfert 1 nuclei. — *Astron. Astrophys.*, 1984, 140, p. 393—394.
20. Дибай Э. А., Лютый В. М. Параметры оптической переменности активных ядер галактик. — *Астрон. журн.*, 1984, 61, с. 10—17.
21. Penfold J. E. *UBV* observations of Seyfert and emission-line galaxies. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1979, 186, p. 297—304.
22. Miller H. R. The optical variability of two Seyfert 1 galaxies. — *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1979, 35, p. 387—389.
23. Butcher H. R. Imaging observations of optical emission from jets. — *Proc. Second ESO/ESA Workshop, Munich, February, 1981*, p. 23—24.
24. Wolstencraft R. D. The optical jets of NGC 1097. — *Proc. of Second ESO/ESA Workshop, Munich, February, 1981*, p. 49—51.
25. Grandy S. A., Tifft W. G. The degree of optical variability of quasi-stellar objects. — *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 1974, 86, p. 873—884.
26. Angel J. R. P., Stockman H. S. Optical and infrared polarization of active extragalactic objects. — *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1980, 18, p. 321—361.

Поступила в редакцию 02.07.85