

ОТСУТСТВИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ ВО ВРЕМЕННОМ ДИАПАЗОНЕ 10^{-6} — 10 С У РЕЛЯТИВИСТСКОГО ОБЪЕКТА SS 433

*Г. М. Бескин, С. И. Неизвестный, А. А. Пимонов,
В. Л. Плахотниченко, С. И. Фабрика, В. Ф. Шварцман*

По наблюдениям на 6-м телескопе в течение 1979—1982 гг. наложены ограничения на мощность переменной составляющей оптического потока от SS 433 во временном диапазоне $3 \cdot 10^{-7}$ — 10 с. Наблюдения проводились в моменты, соответствующие разным фазам прецессионного и орбитального периодов SS 433. Отсутствие у объекта сверхбыстрой переменности (в сочетании с фактом наличия переменности на временах 10^4 — 10^5 с) свидетельствует о большой оптической толще оболочки ($\tau > 150$), существующей вокруг релятивистского компаньона SS 433. Делается вывод о том, что раствор воронки вокруг релятивистской струи менее 120° .

Limits of the variable component of the optical flux from SS 433 on time — scales of $3 \cdot 10^{-7}$ to 10 s are obtained from the observations with the 6-meter telescope in 1979—1982. The observations were carried out at the moments corresponding to the different phases of precession and orbital periods of SS 433. The absence of the super-rapid variability (in combination with the known variability on scales of 10^4 — 10^5 s) indicates to the great optical depth of the envelope ($\tau > 150$) surrounding the relativistic companion of SS 433. A conclusion is drawn that the size of the funnel formed round the relativistic jet is smaller than 120° .

Четыре года изучения уникального объекта SS 433 позволили значительно продвинуться в понимании его природы. Любопытно, что незадолго до открытия SS 433 была выдвинута гипотеза [1], согласно которой обнаружение в спектре небесного объекта одновременно красных и синих доплеровских сдвигов большой величины возможно лишь в случае, если объект имеет искусственное происхождение (внеземная цивилизация).

Сейчас ясно, что система «движущихся» эмиссионных линий водорода и гелия формируется в двух высокоскоростных ($v \approx 0.26 c$) противоположно направленных струях газа. 164-дневный период колебаний лучевых скоростей этих линий обусловлен прецессионными явлениями в системе, например прецессией газового диска, поставляющего вещество в струи. Диск возникает вследствие перетекания газа в двойной системе, обладающей орбитальным периодом 13.1 дня. Струи образуют угол 20° с моментом вращения двойной системы, который, в свою очередь, наклонен под углом 79° к лучу зрения. Выброс вещества в струях порядка $3 \cdot 10^{-6} M_\odot/\text{год}$ [2], а соответствующая потеря кинетической энергии $3 \cdot 10^{39}$ эрг/с, что сравнимо с болометрической светимостью SS 433, составляющей $\sim 10^{40}$ эрг/с [3].

Намного больше газа покидает систему в форме истекающей оболочки (размер 10^{12} — 10^{13} см), в которой и формируется система «стационарных» эмиссионных линий. Скорость расширения оболочки ~ 2000 км/с, потеря массы $\sim 10^{-4} M_\odot/\text{год}$ [4].

Мы не будем здесь приводить полную сводку наблюдательных данных для SS 433, отметим лишь, что вся их совокупность наилучшим образом согласуется с моделью тесной двойной системы, состоящей из массивной «нормальной» звезды и релятивистского объекта. Газ, покинув нормальный компаньон, заполняющий свою полость Роша, перетекает через внутреннюю точку Лагранжа и уже в окрестностях релятивистского компонента выбрасывается из системы как в струях, так и в оболочке [5, 4, 6].

Сопоставление оценок размеров двойной системы ($a \approx 4 \cdot 10^{12}$ см), «нормальной» звезды [$R_s \approx (2 \div 3) \cdot 10^{12}$ см] и фотосферы оболочки [$R_\phi \approx (1 \div 2) \cdot 10^{12}$ см] [7, 3, 6] свидетельствует в пользу того, что нормальный компаньон находится за пределами плотной части истекающей оболочки. Обнаружение затмений у эмиссии He II, которая заведомо формируется вблизи компактного компаньона [8], подтвердило бы эту гипотезу. С другой стороны, на наш взгляд, совокупность наблюдательных данных говорит о том, что в оптическом диапазоне наблюдаются проявления скорее истекающей оболочки, нежели аккреционного диска. Вполне вероятно, что последний существует в глубине оболочки, однако он недоступен прямым наблюдениям.

Проблема источника кинетической энергии газа, истекающего в джетах и в оболочке, все еще окончательно не решена. И хотя очень привлекателен механизм сверхкритической аккреции с истечением под действием светового давления [9, 6], полностью нельзя исключить варианты «пропеллера» [4] и эжектирующего пульсара [10].

Построение самосогласованной картины процессов, происходящих в системе SS 433, во многом определяется тем, какой компактный объект — черная дыра или нейтронная звезда — входит в ее состав. Существуют два способа выяснения природы релятивистского компаньона: косвенный — определение по спектральным данным его массы и прямой — исследование вариаций блеска на временах 10^{-5} —1 с (периодических в случае нейтронной звезды, стохастических в случае черной дыры) [11].

Линии нормального компаньона у SS 433 пока не обнаружены, поэтому к настоящему времени не существует уверенных оценок массы релятивистского объекта.

С другой стороны, вариации светимости, обусловленные процессами, происходящими вблизи компактного компаньона (магнитосферы НЗ или эргосферы ЧД), должны сглаживаться протяженной оболочкой. Однако в ней заведомо есть практически полностью прозрачные «окна» — зоны, где газ выбрасывается в коллимированных струях. Оценки показывают, что здесь радиус фотосферы по крайней мере в 1000 раз меньше, чем в оболочке; не исключено, что «окна» начинаются вблизи поверхности релятивистского объекта.

Все исследования быстрой переменности SS 433 как в рентгеновском, так и в оптическом диапазонах были ориентированы на обнаружение лишь периодических сигналов и проводились с довольно низким временным разрешением. По данным НЕАО-1, установлено отсутствие вариаций светимости в диапазоне времен 0.16—5 с с амплитудой, превышающей 10 % [12]. В оптике получены ограничения для изменений блеска на уровне 0^m002 — 0^m008 в диапазонах 0.004—100 [13], 2—500 [14] и 0.2—5 с [15]. К сожалению, эти наблюдения приходились либо на фазу 13-дневного периода, в которой компактный объект затмевался нормальной звездой, либо на фазы прецессионного периода, в которых струи наблюдаются сбоку.*

У SS 433 была обнаружена в оптическом диапазоне вспышечная активность с характерными временами от одного часа до нескольких дней с амплитудой 0^m1 — 0^m7 [16, 17].

Программа исследования переменности SS 433 в широком диапазоне времен $3 \cdot 10^{-7}$ —10 с и различных фазах прецессионного периода была начата нами 18 октября 1979 г. на БТА. Предварительные результаты сообщались в статьях Бескина и др. [18] и Лебедева и Пимонова [19]. Настоящая работа подводит итоги нашим поискам.

Наблюдения и их обработка. Наблюдения SS 433 проводились в первичном фокусе 6-м телескопа САО АН СССР с помощью электрофотометра ЭФИР и специализированного инженерно-математического комплекса МАНИЯ (Многоканальный анализ наносекундных изменений яркости) [20—23]. В 1979—1982 гг. состоялось 5 сеансов наблюдений, данные о которых приведены в табл. 1.

* Очевидно, что наиболее выгодными для поиска быстрой переменности являются фазы прецессионного периода, близкие к моменту максимального расхождения релятивистских эмиссий. В этих фазах угол между струей и лучом зрения минимален (около 60°), и можно надеяться «заглянуть» в воронку.

ТАБЛИЦА 1

Эпохи наблюдений и результаты *UBVR*-фотометрии объекта SS 433

№ п/п	Дата (JD - 2444000)	Время наблюдений UT	φ	ψ	V	U - V	B - V	V - R
1	18.10.79 (165)	16 ^h 45 ^m —18 ^h 00 ^m	0.22	0.05	14 ^m 0	0 ^m 2	2 ^m 3	2 ^m 2
2	15.05.80 (375)	23 20 —24 00	0.25	0.33	14.6	—	—	—
3	01.10.81 (879)	17 15 —18 30	0.75	0.41	14.5	1.3	2.2	2.3
4	27.07.82 (1178)	22 18 —23 00	0.62	0.24	14.22	0.88	2.10	2.27
5	28.07.82 (1179)	21 43 —22 56	0.70	0.24	14.14	0.90	2.11	2.25

Примечание. 18.10.79 при поиске переменности использовалась диафрагма 11"6, в остальные даты — 9". Фаза орбитального периода φ отсчитывалась от момента главного минимума по данным [3], фаза прецессионного периода ψ — от момента максимального расхождения «движущихся» эмиссий [27].

Во время каждого сеанса проводились оценки блеска и цвета объекта, точность *UBVR*-измерений менялась от 0.02 до 0^m1.

Объект SS 433 и звезда сравнения, интенсивность которой искусственно уравнивалась с интенсивностью объекта, наблюдались поочередно короткими сетями 1—2-минутной длительности. Использовались два режима: стандартный и режим пересчета.

1. В стандартном режиме наблюдения проводились с V-фильтром (суммарная интенсивность объекта и фона составляла 6500—9500 отсч./с, на фон приходилось 10—15 %). Моменты регистрации отдельных фотонов кодировались специальным преобразователем и передавались в память ЭВМ М-222 или СМ-4.* При работе в этом режиме реализовывалось предельное временное разрешение комплекса — $3 \cdot 10^{-7}$ с. Обработка накопленной информации проводилась с помощью формализма y_2 - и d_2 -функций [20], а также методом нормированных факториальных моментов [19].

2. В режиме пересчета наблюдения проводились без фильтра** (суммарная интенсивность объекта и фона около 50000 отсч./с, фон — 5—10 %). Кодировались моменты прихода каждого k -го из зарегистрированных фотонов ($k=10, 20, 25$), временное разрешение составляло $(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$ с. При этом точность результатов оказалась приблизительно в 2 раза лучше, чем при работе в «стандартном» режиме (при обработке использовались только d_2 -функции).

В обоих режимах точность результата при оценке переменности SS 433 определялась по разбросу соответствующих параметров у звезды сравнения.

ТАБЛИЦА 2

Результаты поиска сверхбыстрой переменности у объекта SS 433

№ п/п	Фильтр (коэффициент пересчета)	Объем, 10 ⁶ фотоотсчетов	Верхний предел на относительную мощность переменной компоненты, %					
			$3 \cdot 10^{-7} - 10^{-6}$ с	$10^{-6} - 10^{-5}$ с	$10^{-5} - 10^{-3}$ с	$10^{-3} - 10^{-2}$ с	$10^{-2} - 1$ с	1 - 10 с
1	V	1.3	86	42	24	8.5	5.0	2.8
2	V	1.5	82	36	20	7.5	4.5	2.8
	Σ (25)	7.5	—	—	—	4	1.9	1.4
3	V	1	84	46	26	10	6	2.9
4	Σ (10)	6.0	—	—	—	4.5	2.3	1.9
5	V	1.8	68	34	20	7.8	4.5	1.8
	Σ (20)	12	—	—	—	4.3	2.0	1.1

Примечание. Значок Σ соответствует наблюдениям в интегральном свете с фотокатодом S 20.

* ЭВМ М-222 использовалась 18.10.79 и 15.05.80.

** То есть в интегральном свете с фотокатодом S 20, диапазон чувствительности которого $\lambda=3200 \div 7500 \text{ \AA}$.

В качестве характеристики переменности блеска использовалась относительная мощность переменной компоненты S — доля потока переменного излучения в полном потоке, зарегистрированном за время накопления информации (точное определение S дано в [24]). Параметр S просто связан со средней амплитудой переменности A и ее временными характеристиками (средней полушириной вспышек Δt и средним временем их повторения T): $S \approx (\Delta t/T) A$.

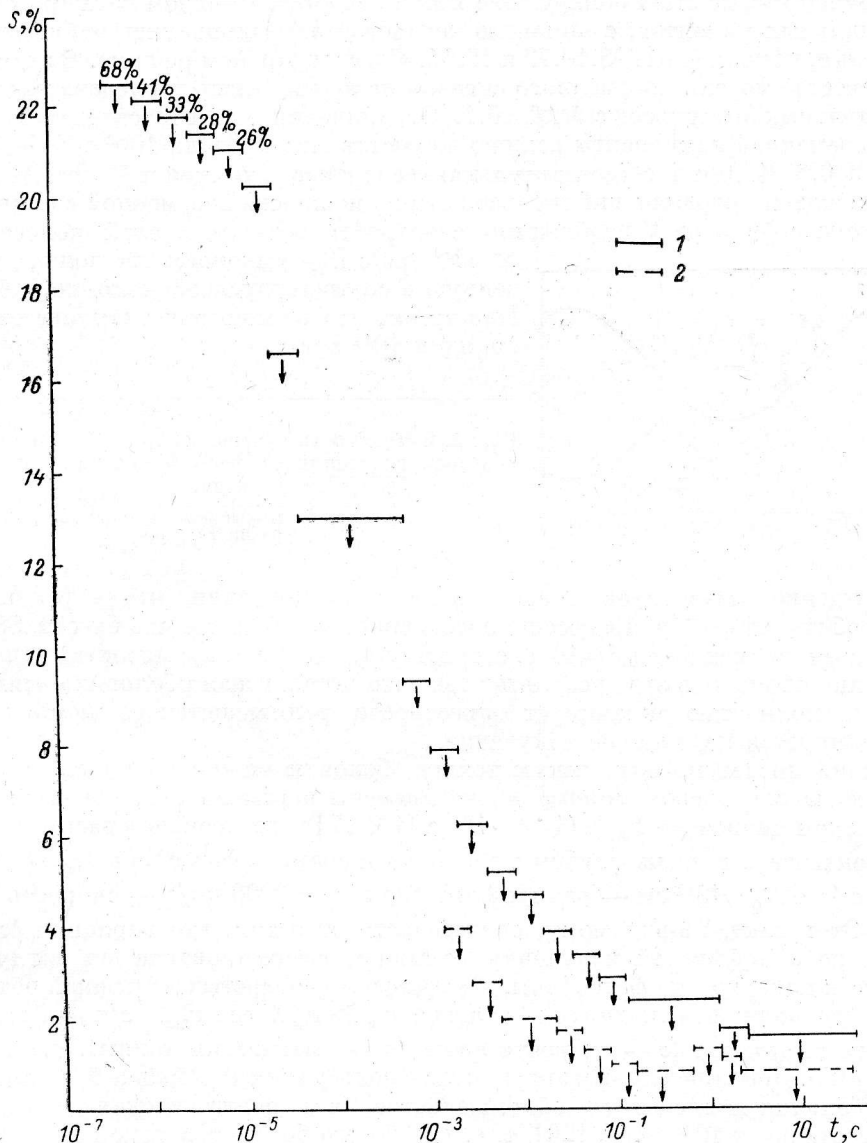


Рис. 1. Ограничения на относительную мощность переменной составляющей оптического излучения SS 433. Наблюдения 28.07.82, 21^h43^m—22^h56^m UT.
1 — фильтр V; 2 — интегральный свет.

Статистическая обработка накопленной информации с помощью y_2 - и d_2 -функций показала, что переменность блеска SS 433 отсутствовала в течение всех наблюдательных сеансов. В табл. 2 приведены верхние пределы для относительной мощности переменной компоненты излучения S в шести временных поддиапазонах, на которые был разбит весь исследованный диапазон от $3 \cdot 10^{-7}$ до 10 с. Детальная зависимость ограничений на переменность от ее характерного времени для сеанса 28.07.82 показана в качестве примера на рис. 1. Результаты, полученные в другие ночи, имеют аналогичный вид. Верхние пределы со-

ответствуют доверительной вероятности $> 99\%$ (уровень 3σ). Они относятся к переменному сигналу любого типа, как периодическому, так и стохастическому. В рамках конкретных моделей переменности пределы могут быть только улучшены. Например, в случае треугольных вспышек с $\Delta t/T \approx 0.1$ ограничения на S лучше приведенных в табл. 2 и на рис. 1 в 3.4 раза, а при $\Delta t/T \approx 10^{-5}$ — в 340 раз. За точными формулами отсылаем к работам [20, 24].

Переменность не была обнаружена и при обработке методом нормированных факториальных моментов, с помощью которого анализировались наблюдательные данные, накопленные 18.10.79 и 15.05.80 в стандартном режиме. В этом случае в качестве модели переменного сигнала использовалась последовательность прямоугольных импульсов с $\Delta t/T \approx 0.1$. Ограничения для относительной мощности переменной компоненты излучения составили: 1% для 10^{-2} с, 0.5% для 10^{-1} с, и 0.3% для 1 с (доверительная вероятность пределов $\geq 99\%$) [19]. Для нахождения ограничений на абсолютную мощность переменной составляющей потока в фильтре V необходимо светимость объекта в этой полосе (4×10^{37} эрг/с [3]) умножить на долю, приведенную в соответствующей колонке табл. 2. Напомним, что болометрическая светимость порядка 10^{40} эрг/с.

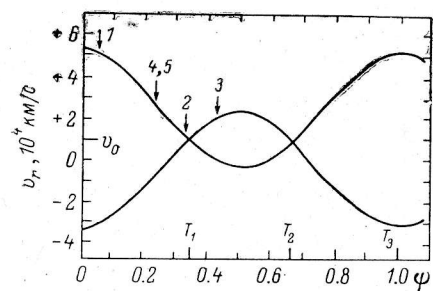


Рис. 2. Зависимость лучевых скоростей движущихся эмиссионных линий от фазы ψ прецессионного периода.

Стрелками отмечены фазы в моменты наблюдений, цифры — номера наблюдений.

Обсуждение результатов. Наши наблюдения показали, что в различных фазах орбитального* и прецессионного периодов переменность блеска SS 433 в диапазоне времен $3 \cdot 10^{-7}$ —10 с отсутствует. По нашему мнению, наиболее естественно объяснить этот результат тем, что истекающая оболочка оптически толстая и полностью экранирует окрестности релятивистского компаньона, где генерируется переменное излучение.

Нижний предел на оптическую толщину оболочки можно получить, обратив внимание на совпадение минимального времени переменности, обнаруженной в оптическом диапазоне $t_{\min} \approx (4-6) \cdot 10^3$ с [16, 17]** со временем распространения истекающего газа из глубины оболочки к границе фотосферы $t_{\text{дв}} = R_{\text{ф}}/v_{\text{дв}} \approx 5 \cdot 10^3$ с (где $R_{\text{ф}} \approx 10^{12}$ см — радиус фотосферы, $v_{\text{дв}} \approx 2000$ км/с — скорость истечения). Этот факт, по-видимому, свидетельствует о том, что вариации блеска связаны не с диффузией излучения вспышки, сформировавшейся в глубине оболочки к поверхности фотосферы, а с выносом разогретых вспышкой объемов газа. Тогда должно выполняться условие $v_{\text{дв}} > v_{\text{диф}}$, где $v_{\text{диф}} \approx c/\tau$ — скорость диффузии излучения (c — скорость света, τ — оптическая толщина), т. е. $\tau > c/v_{\text{дв}} \approx 150$. Дополнительным аргументом в пользу вывода о большой оптической толщине оболочки является то обстоятельство, что рентгеновская светимость SS 433 составляет 10^{35} эрг/с [26], т. е. 10^{-5} от его болометрической светимости.

Подчеркнем, что наблюдения проводились в разных фазах орбитального и прецессионного периодов (табл. 1 и рис. 2), т. е. при различных ориентациях оболочки относительно луча зрения. В связи с этим неизменное отсутствие вариаций блеска говорит о том, что оболочка сплошная. В ней нет просветов и в зоне взаимодействия с релятивистским джетом, так как не обнаружена переменность в наблюдениях 18.10.79 вблизи фазы $\psi = 0$ прецессионного периода. Поскольку угол наклона струи к лучу зрения в этой фазе минимален и составляет 60° , а толщина струи около 5° [27], можно заключить, что раствор воронки в оболочке вокруг струи заведомо меньше 120° либо полутолщина диска пре-

* Отметим, что во время наших наблюдений компактный компаньон всегда был виден, т. е. не затмевался нормальной звездой (затмение приходится на интервал фаз 0.87—0.13).

** В работе [25] сообщалось о подозрении на переменность с характерным временем 10—20 мин в инфракрасном диапазоне. Однако пока этот результат не подтвержден.

восходит 30° . Малость рентгеновской светимости — независимый аргумент в пользу этого вывода.

Заключение. Кратко резюмируем итоги нашей работы.

1. У SS 433 в течение 5 сеансов наблюдений отсутствовали вариации блеска на временах $3 \cdot 10^{-7}$ —10 с.

2. Отсутствие переменности в разных фазах орбитального и прецессионного периодов, по-видимому, обусловлено наличием вокруг компактного объекта сплошной оболочки, оптическая толщина которой больше 150.

3. Угол раствора воронки в оболочке вокруг релятивистской струи не превосходит 120° либо полутолщина диска более 30° .

Авторы благодарят С. Н. Митронову и Л. А. Пустильника за помощь в наблюдениях, В. К. Дубровича за критические замечания, И. М. Копылова и А. М. Черепащука за поддержку программы исследования SS 433 и полезные обсуждения.

Литература

1. Цуриков В. М. Имитационный подход к поиску позывных внеземных цивилизаций. — Изв. вузов. Радиофизика, 1979, 22, № 6, с. 764—765.
2. Zealey W. J., Dorita M. A., Malin D. F. The interaction between the relativistic jets of SS 433 and the interstellar medium. — MNRAS, 1980, 192, N 3, p. 731—743.
3. Черепащук А. М., Асланов А. А., Корнилов В. Г. WBVR-фотометрия SS 433; спектр «нормальной» звезды и аккреционного диска. — Астрон. ж., 1982, 59, № 6, с. 1157—1166.
4. Шкловский И. С. Потеря массы SS 433 и ее влияние на рентгеновское и радиоизлучение этого источника. — Астрон. ж., 1981, 58, № 3, с. 554—560.
5. Van den Heuvel E. P. J. SS 433, X-ray binaries and stellar evolution. — Vistas in Astronomy, 1981, 25, N 1/2, p. 95—108.
6. Липунов В. М., Шакура Н. И. О природе SS 433. — Астрон. ж., 1982, 59, № 4, с. 631—635.
7. Cherepashchuk A. M. SS 433 as an eclipsing binary. — MNRAS, 1981, 194, p. 761—769.
8. Crampton D., Hutchings J. B. The SS 433 binary system. — Astrophys. J., 1981, 251, N 2, p. 604—610.
9. Milgrom M. SS 433: The acceleration and collimation mechanisms. — Astron. and Astrophys., 1979, 78, p. L9—L12.
10. Benford G., Ferrari A., Massaglia S. Self-focussed electromagnetic waves and SS 433. — Vistas in Astronomy, 1981, 25, N 1/2, p. 213—216.
11. Шварцман В. Ф. Ореолы вокруг черных дыр. — Астрон. ж., 1971, 48, с. 479—488.
12. X-ray observations of H 1908+050 (=SS 433) / F. E. Marschall, J. H. Swank, E. A. Boldt et al. — Astrophys. J. Letters, 1979, 230, p. 145—148.
13. McGraw J., Starrfield S., Angel R. SS 433. — LAU Circ., 1979, N 3388.
14. McGraw J., Starrfield S., Angel R. SS 433. — IAU Circ., 1979, N 3363.
15. Ногне К., Гомер Р. SS 433. — IAU Circ., 1979, N 3379.
16. Гладышев С. А. Фотоэлектрические B , V , R наблюдения объекта SS 433. — Астрон. циркуляр, 1979, № 1080, с. 2—5.
17. Mazeh T., Leibowitz E. M., Lahav O. On the photometric behaviour of SS 433 in 1979 and 1980. — Astrophys. Lett., 1981, 22, N 2, p. 185—191.
18. Поиск переменности объекта SS 433 во временном диапазоне 10^{-6} —1 с на 6-метровом телескопе / Г. М. Бескин, С. И. Неизвестный, А. А. Пимонов и др. — Астрон. циркуляр, 1979, № 1087, с. 1—4.
19. Лебедев В. С., Пимонов А. А. Поиск переменности объекта SS 433 методом нормированных факториальных моментов. — Письма в АЖ, 1981, 7, № 10, с. 600—604.
20. Шварцман В. Ф. Эксперимент МАНИЯ. Астрофизические задачи, математические методы, инженерный комплекс, результаты первых наблюдений. — Сообщ. САО, 1977, 19, с. 5—38.
21. Неизвестный С. И., Пимонов А. А. Спектрофотометр первичного фокуса БТА. — Сообщ. САО, 1978, 23, с. 56—69.
22. Пимонов А. А. Система счета фотонов. — Сообщ. САО, 1979, 25, с. 31—38.
23. Плахотниченко В. Л. Программно-алгоритмический комплекс эксперимента МАНИЯ. Второй этап. Программа поиска переменности. — Сообщ. САО, 1983, 38, с. 29—80.
24. Минимальное время оптической переменности объекта Cyg X-2=V 1341 Cyg по наблюдениям на 6-м телескопе / Г. М. Бескин, С. И. Неизвестный, А. А. Пимонов и др. — Письма в АЖ, 1979, 5, № 10, с. 508—513.
25. Clark T. A., Milone E. F. Infrared variability and spectrum of SS 433. — Publ. Astron. Soc. of Pacific, 1981, 93, p. 338—343.
26. Diffuse X-ray emission from the jets of SS 433 / F. Seward, J. Grindlay, E. Seaquist, W. Gilmore. — Nature, 287, N 5785, p. 806—808.
27. Grandi S. A. SS 433: How do the moving lines move? — Vistas in Astronomy, 1981, 25, N 1/2, p. 7—11.

Поступила в редакцию 23 мая 1983 г.