

PAZH.CLS 08.02.06

## БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ SS433

© 2011 г. Р. А. Буренин<sup>\*1</sup>, М. Г. Ревнивцев<sup>1,2</sup>, И. М. Хамитов<sup>3</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>4,5</sup>, А. С. Носов<sup>1</sup>, М. Н. Павлинский<sup>1</sup>, Р. А. Сюняев<sup>1,6</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup>Excellence Cluster Universe, Мюнхенский технический университет, Гархинг, Германия

<sup>3</sup>Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

<sup>4</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

<sup>5</sup>Академия наук Татарстана, Казань

<sup>6</sup>Институт астрофизики им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 16 апреля 2010 г.

В работе исследована переменности оптического потока пекулярного галактического источника SS433 по данным наблюдений Российско-Турецкого 1.5-м телескопа (РТТ-150). Подробно описан способ получения качественных фотометрических измерений с временным разрешением 0.3–1 сек при помощи обычной ПЗС-матрицы. При помощи пробных наблюдений непостоянных звезд показано, что турбулентность атмосферы не вносит существенных искажений в кривые блеска, поэтому, такие данные хорошо подходят для исследования *аперидической* переменности различных объектов.

Большой массив измерений кривых блеска SS433, полученный таким образом, позволил получить спектры мощности переменности его потока с рекордной чувствительностью до частот порядка 0.5 Гц и обнаружить его излом на частоте около  $2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц. Мы полагаем, что обнаруженный нами излом в спектре мощности вызван сглаживанием переменности оптического потока из-за конечного размера излучающей области. Исходя из измерения частоты слома в спектре мощности, выполнена оценка размера фотосферы аккреционного диска  $\approx 2 \cdot 10^{12}$  см. Показано, что амплитуда переменности объекта SS433 резко уменьшается в течение затмения аккреционного диска, однако, не исчезает полностью. Это говорит о том, что размер источника переменного оптического излучения сравним с размером нормальной звезды, размер которой поэтому составляет также  $R_O \approx 2 \cdot 10^{12}$  см  $\approx 30R_{\odot}$ . Уменьшение амплитуды переменности потока в течение затмения показывает наличие непостоянной составляющей оптического излучения величиной  $m_R \approx 13.2$ .

PACS: 95.55.Aq, 95.55.Cs, 95.75.De, 95.75.Wx, 95.85.Kr, 97.30.Sw, 97.60.Lf, 97.80.Jp

*Ключевые слова:* массивные двойные системы, микроквазары, аккреционные диски, быстрая переменность, оптические наблюдения

### ВВЕДЕНИЕ

Объект SS433 представляет собой двойную систему с постоянной сверхкритической аккрецией на компактный объект, скорее всего черную дыру (см., например, обзор Фабрики, 2004). Этот объект является единственным известным объектом такого рода в Галактике и, по-видимому, подобные объекты, видимые с лицевой стороны, наблюдаются в соседних галактиках в качестве ультраярких рентгеновских источников (Фабрика и Мещеряков, 2001; Кинг, 2002; Бегельман и др., 2006).

Излучение объекта SS433 является переменным на всех наблюдаемых временных масштабах и во всех диапазонах длин волн электромагнитного спектра (например, Черепашук, 1981; Гладышев и др., 1983; Стюарт

и др., 1987; Горанский и др., 1998б; Ейкенберри и др., 2001; Черепашук и др., 2005; Котани и др., 2006; Трушкин и др., 2007). При изучении переменности источника обнаружено несколько видов периодической переменности: прецессионная, орбитальная и нутационная, что позволило существенно ограничить параметры двойной системы (Черепашук, 2002). Изучение затмений позволило также оценить геометрические размеры различных составляющих системы (например, Стюарт и др., 1987).

Также проводились исследования аперидической переменности излучения SS433 (Ревнивцев и др., 2004, 2006). Было показано, что широкополосный спектр мощности SS433 имеет степенной вид с изломом на частоте около  $10^{-7}$  Гц, ниже которой спектр мощности становится плоским. Такой спектр мощности ожидает-

\*Электронный адрес: rodion@hea.iki.rssi.ru

ся в модели самоподобного производства переменности темпа аккреции в аккреционном диске, а уплощение спектра на низких частотах связано с тем, что на временах больше вязкого времени диска дополнительной переменности в диске возникнуть не может (Любарский, 1997; Чуразов и др., 2001; Гильфанов и Арефьев, 2005).

Переменность излучения объекта *SS433* на высоких частотах  $\gtrsim 10^{-3}$ – $10^{-2}$  Гц в настоящее время изучена недостаточно хорошо (Фабрика, 2004; Ревнивцев и др., 2006). С другой стороны, именно эти частоты должны соответствовать размерам областей рентгеновского и оптического излучения объекта и это должно найти свое отражение в переменности источника на таких частотах. В этой работе проводится исследование переменности оптического излучения объекта *SS433* на высоких частотах, используя существенный объем новых данных по быстрой фотометрии *SS433*, полученных с временным разрешением  $\approx 1$  с.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения были выполнены на Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150)<sup>1</sup>, используя ПЗС-фотометр, установленный в фокусе Кассегрена,  $f = 1/7.7$ . Фотометрические измерения проводились при помощи ПЗС-матрицы Андор *DW-436*. Это обратно-освещенная ПЗС-матрица, размером  $2048 \times 2048$  ячеек, охлаждаемая электронным образом до температуры  $-60$  К. Матрица имеет высокую квантовую эффективность (более 90% в полосе *R*) пренебрежимо малый темновой ток и довольно низкий шум считывания (около  $2 e$ ). В указанном выше фокусе телескопа угловой размер элемента матрицы составляет  $0.24''$ , размер поля зрения — около  $8'$ .

### Установки прибора

Для того, чтобы повысить скорость считывания ПЗС-матрицы наблюдения проводились так, как это показано на рис. 1. Поскольку скорость считывания ПЗС-матрицы зависит, в основном, от линейного размера изображения вдоль оси считывания, наведение на объект выполнялось так, чтобы объект и опорная звезда оказывались параллельно тому краю матрицы, в сторону которого происходит ее считывание. Затвор во время наблюдений постоянно находился в открытом состоянии, поэтому, чтобы избежать засорения данных яркими звездами вне вырезанной полосы, обе звезды устанавливались близко к стороне считывания.

Во время наблюдений считывалась только узкая полоса матрицы, в которой находились объект и опорная звезда. Ширина полосы была выбрана таким образом, чтобы в нее заведомо попадала подавляющая часть крыльев функции отклика на точечный источник. Она была

постоянной от наблюдения к наблюдению и составляла  $12''$  (50 ячеек матрицы). Наведение телескопа проводилось таким образом, чтобы эти две звезды были установлены как можно точнее к центру вырезанной полосы матрицы, после чего сразу же включалось ведение по яркой звезде. Точность ведения телескопа в этом режиме составляет несколько десятых долей секунды дуги, поэтому можно быть уверенным, что обе звезды во время наблюдений оставались в центре вырезанной полосы с достаточно высокой точностью.

Полоса ПЗС-матрицы считывалась не в виде изображения, а в виде одномерной линейки данных путем группировки всех 50 ячеек матрицы по ширине полосы в одну (рис. 1). Кроме того, матрица сбивалась также по 2 ячейки и в направлении длины считываемой полосы. Это дало возможность существенно уменьшить время и шум считывания, при этом поток фона неба оставался все еще много меньше потока объекта. При таких установках время считывания ПЗС-матрицы составляло около 0.3 с.

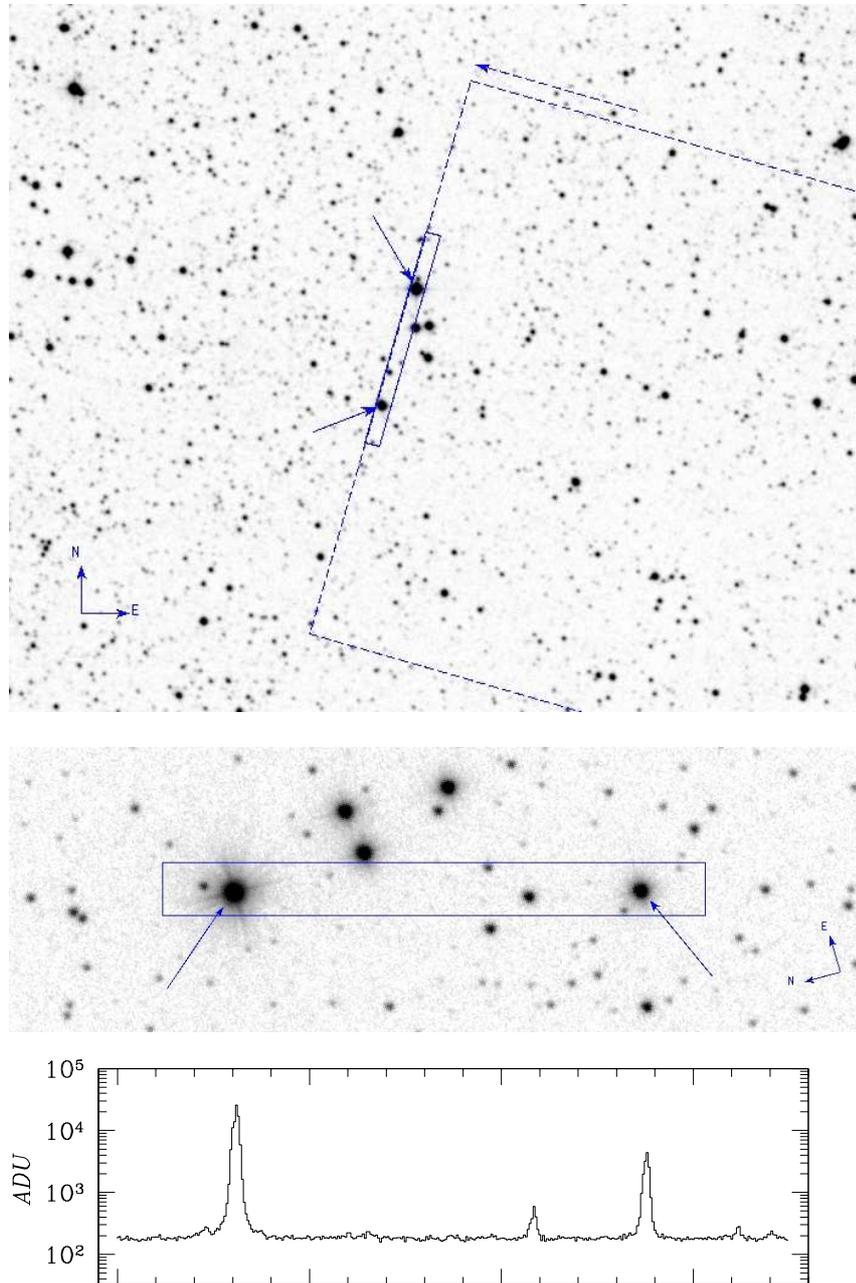
Время экспозиции было выбрано около 0.7 с таким образом, что во время всех наблюдений цикл экспозиции и считывания составлял точно 0.974 с. Запись данных производилась сначала в оперативную память вычислительной машины и только каждые 1000 измерений производилась запись на жесткий диск. Это позволило уверенно избежать возможных задержек, связанных с записью данных на жесткий диск внутри блоков по 1000 измерений.

В момент записи на жесткий диск в данные ставилась также метка абсолютной привязки времени. Из-за технических сложностей, которые имелись на время наблюдений, точная привязка данных при помощи сигнала *GPS* не использовалась. Проводилась синхронизация внутренних часов вычислительной машины по сигналу *GPS* каждый вечер перед наблюдениями и во время наблюдений использовались метки времени полученные по этим часам. Таким образом, точность абсолютной привязки данных по времени не должна быть хуже нескольких десятых долей секунды.

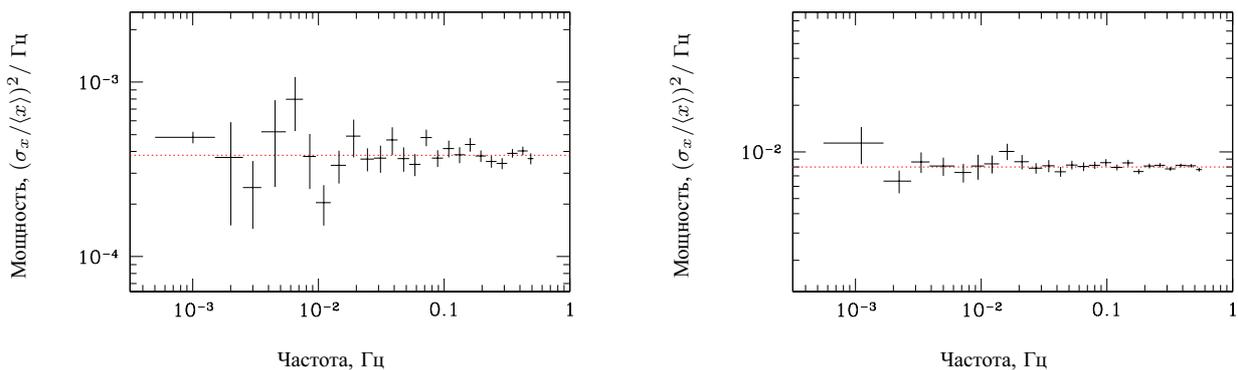
Важно, что использованный способ проведения наблюдений позволяет проводить одновременное измерение потоков излучения по крайней мере двух звезд — опорной и объекта. Это дает возможность проводить разностные фотометрические измерения, что позволяет избавиться от влияния поглощения на разных зенитных расстояниях и в легких облаках. Кроме того, как показано ниже, это позволяет в основном учесть также влияние на фотометрические измерения переменного поглощения и дрожания звезд, которые возникают вследствие турбулентности атмосферы, вплоть до частот порядка 0.5 Гц.

Измерения потоков проводились внутри окна, центрированного на профиль сигнала от звезды (рис. 1). Размер окна устанавливался для каждого отрезка по

<sup>1</sup><http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/>



**Рис. 1.** Поле объекта SS433. Показано, каким образом производилось наведение на объект и какая часть ПЗС-матрицы считывалась во время наблюдений. На верхнем рисунке пунктирной стрелкой показано направление считывания ПЗС-матрицы. Стрелками показаны объект SS433 и более яркая опорная звезда. Внизу для примера показана линейка данных, которая считывалась с матрицы после каждой экспозиции.



**Рис. 2.** Спектры мощности непериодических звезд. Слева — результат наблюдений непериодических звезд в те же ночи, когда проводились наблюдения *SS433*, справа — результат наблюдений, проведенных позже и с несколько другим отношением сигнал-шум.

1000 измерений отдельно, величиной в 6 среднеквадратичных ширин функции отклика на точечный источник. Таким образом, за пределами окна оказывалось не более долей процента потока звезд. Фон приближался линейной функцией в каждой считываемой полосе данных отдельно, исключение потока звезд достигалось применением обычного алгоритма отбрасывания отклоняющихся точек.

#### *Влияние атмосферной турбулентности на фотометрические измерения*

Для исследования аperiodической переменности различных объектов необходимо хорошо знать свойства шумов, которые возникают при измерении потоков. Для того, чтобы настоящая форма спектра мощности переменного излучения объекта не была искажена, ошибки измерения потока должны быть независимы в каждом измерении. В этом случае спектр мощности шумов является постоянной величиной, которую можно вычистить из спектра мощности измеренного излучения объекта для того, чтобы получить спектр мощности его собственной переменности.

Свой вклад в ошибки измерений потока дает шум счета фотонов, который является заведомо независимым для разных измерений, однако в наших условиях ошибки могут возникать и по другим причинам. В первую очередь это влияние турбулентности атмосферы. Из-за наличия этой турбулентности в атмосфере всегда имеются хаотические изменения температуры и показателя преломления среды. Это приводит к искажению плоского фронта волны, что выражается в дрожании, изменении формы и мерцании звезд. Все это, в свою очередь, может сказываться на результатах фотометрических измерений, причем соответствующие ошибки измерений будут иметь сложный спектр мощности, который будет зависеть от вида турбулентности атмосферы.

По предварительным данным исследований дрожания звезд при наблюдениях на телескопе РТТ-150, существенную часть искажений вносит турбулентность, воз-

никающая на куполе телескопа. Такая турбулентность влияет одинаково на все звезды в поле зрения телескопа и поэтому она не должна оказывать влияния на разностные фотометрические измерения.

Существенное влияние на наблюдения может оказать также турбулентность на большой высоте. Начиная с высоты 2.5 км, на которой расположена обсерватория ТУБИТАК, основная часть переменности показателя преломления набирается до высоты около 10 км (например, Зуев и др., 1988). На такой высоте угловое расстояние в  $1.7'$  между объектом *SS433* и опорной звездой соответствует линейному расстоянию около 3–4 м, что больше размера зеркала телескопа, поэтому свет этих звезд проходит через разные части атмосферы и их дрожание может различаться. Однако, при скорости ветра  $\sim 10$  м/с, за время  $\sim 1$  с турбулентность будет существенно усредняться в неподвижной области размером порядка размера зеркала телескопа. Поэтому, можно ожидать, что и эта турбулентность не внесет большого вклада в ошибки измерения потоков звезд.

Для того, чтобы проверить это предположение напрямую, были проведены наблюдения непериодических звезд при таких же установках прибора, которые были использованы для наблюдений *SS433*. Последующая обработка данных также была проведена точно таким же образом. Полученные спектры мощности показаны на рис. 2. В левой части рисунка показан спектр мощности непериодических звезд, наблюдения которых проводились в те же ночи, что и наблюдения *SS433*. При этом звезды выбирались таким образом, чтобы их потоки были близкими к потокам *SS433* и опорной звезды рядом с этим объектом. Видно, что в пределах ошибок измерений вид спектра мощности согласуется с предположением о том, что мощность не зависит от частоты. При этом, постоянное значение мощности близко к тому, которое получается при наблюдениях объекта *SS433* (см. ниже).

В правой части рис. 2 приведены результаты наблю-

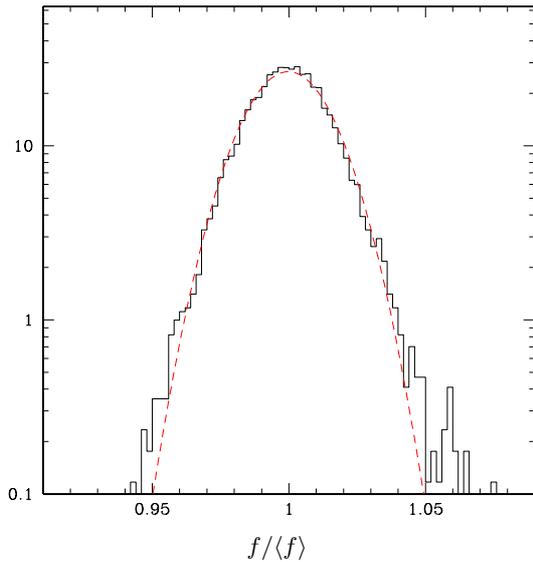


Рис. 3. Распределение отклонений при измерениях потока непременных звезд.

дений, которые проводились в другие ночи и с несколькими другими установками ПЗС-матрицы и соотношением потоков звезд. В пределах ошибок вид этого спектра мощности также согласуется с константой. Во время этих наблюдений отношение сигнал-шум отличалось от того, с которым проводились наблюдения *SS433*. Это выражается в том, что значение константы в спектре мощности получается другое. Однако, все неопределенности измерения потоков звезд, которые могут возникнуть из-за турбулентности атмосферы, должны быть мультипликативными (изменения прозрачности атмосферы, доли потока в крыльях отклика и т.п.). Поэтому для оценки возможных искажений спектра мощности следует иметь ввиду именно относительные отклонения от постоянного значения.

Распределение ошибок при измерениях потока непременных звезд показано на рис. 3. В этих наблюдениях звезды были подобраны таким образом, чтобы отношение сигнал-шум в время этих наблюдений было близко к тому, которое получалось при наблюдениях объекта *SS433*. Видно, что это распределение в общем согласуется с гауссовым, небольшие отличия от гауссового распределения имеются только при отклонениях  $> 2\sigma$ .

Таким образом, ошибки измерения потоков в наших наблюдениях объекта *SS433* с хорошей точностью являются независимыми и гауссовыми. Поэтому, спектр мощности собственной переменности объекта можно правильно измерить, вычитая постоянное значение мощности, которое определяется ошибками измерений потока во время наблюдений.

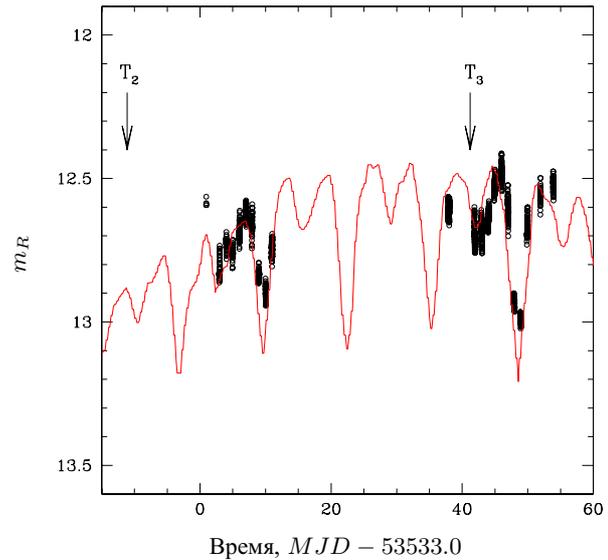


Рис. 4. Точками показаны измерения звездной величины объекта *SS433* в полосе *R*. Сплошной кривой показана средняя кривая блеска в полосе *V* по данным наблюдений Горанского и др. (19986), взятая из обзора Фабрики (2004).

#### Наблюдения объекта *SS433*

Наблюдения объекта *SS433*, о которых идет речь в этой статье, проводились на телескопе РТТ-150, при помощи ПЗС-фотометра, как это описано выше, в основном, летом 2005 г. Кроме того, небольшое число наблюдений было проведено также летом 2004 и осенью 2005 г. Наблюдения проводились в фильтре *R*. Подробные данные об этих наблюдениях представлены в таблице 1. В ней даются сведения о дате проведения наблюдений (колонки 1, 2 и 3), временном разрешении во время наблюдений ( $\Delta t$ , колонка 4) и о прецессионной, орбитальной и нугационной фазе объекта *SS433* на время наблюдения (колонки 5, 6 и 7, соответственно), согласно эфемеридам, взятым из обзора Фабрики (2004), см. также работу Горанского и др. (19986).

На рис. 4 показаны измерения звездной величины объекта *SS433* в полосе *R*, полученные во время наблюдений летом 2005 г. Сплошной кривой показана средняя кривая блеска в полосе *V* по данным наблюдений Горанского и др. (19986), взятая из обзора Фабрики (2004). Для того, чтобы совместить эту кривую с нашими данными фаза была установлена по эфемеридам орбитального периода, взятым из этого же обзора, а звездные величины смещены так, чтобы они примерно совпадали с нашими наблюдениями в полосе *R*. Стрелкой показано время максимума прецессионной переменности, когда аккреционный диск максимально развернут лицевой стороной по направлению к наблюдателю ( $T_3$ ,  $\varphi_{\text{прец.}} = 1$ ), также согласно эфемеридам из работы Фабрики (2004).

Из таблицы 1 и рис. 4 видно, что наблюдения прово-

Таблица 1. Журнал наблюдений

Дата ггммдд	начало	конец	$\Delta t$ , с	Фаза, $\varphi$		
	<i>MJD</i>			прец.	орб.	нут.
040830	53247.9597	53247.9929	0.393	0.99	0.51	0.83
040831	53248.8927	53248.9947	0.393	1.00	0.58	0.99
040901	53249.8724	53249.9653	0.393	1.00	0.66	0.14
050612	53533.9452	53533.9525	1.273	0.75	0.37	0.31
050614	53535.9376	53536.0348	1.009	0.76	0.52	0.64
050615	53536.9746	53537.0547	1.275	0.77	0.60	0.80
050616	53537.9440	53538.0480	0.975	0.78	0.68	0.96
050617	53538.9852	53539.0754	0.974	0.78	0.76	0.12
050618	53539.9572	53540.0797	0.974	0.79	0.83	0.28
050619	53540.9113	53540.9917	0.974	0.80	0.90	0.43
050620	53541.9255	53542.0343	0.974	0.80	0.98	0.59
050621	53542.9881	53543.0764	0.974	0.81	0.06	0.76
050622	53543.8850	53544.0576	0.974	0.81	0.13	0.91
050719	53570.8337	53571.0766	0.974	0.98	0.20	0.20
050723	53574.8387	53575.0375	0.974	1.00	0.50	0.83
050724	53575.8974	53576.0754	0.974	0.01	0.58	1.00
050725	53576.9456	53577.0697	0.974	0.02	0.66	0.16
050726	53577.8752	53578.0444	0.974	0.02	0.73	0.31
050727	53578.9636	53579.0651	0.974	0.03	0.81	0.48
050728	53579.9470	53580.0485	0.974	0.04	0.89	0.64
050729	53580.8228	53580.9920	0.974	0.04	0.96	0.78
050730	53581.8715	53581.9959	0.974	0.05	0.04	0.95
050731	53582.8602	53582.9989	0.974	0.05	0.11	0.10
050802	53584.9164	53584.9763	0.974	0.07	0.27	0.42
050804	53586.8539	53586.9369	0.974	0.08	0.42	0.73
051014	53657.8000	53657.8011	0.982	0.51	0.84	0.01
051028	53671.7010	53671.7236	0.974	0.60	0.90	0.22

Таблица 2. Результаты измерений

<i>MJD</i>	<i>f</i>	$\delta f$
53247.959665	0.1324	0.0220
53247.959670	0.1383	0.0229
53247.959674	0.1242	0.0218
53247.959679	0.1467	0.0214
53247.959683	0.1296	0.0215
53247.959688	0.1459	0.0218
53247.959692	0.1220	0.0213
53247.959697	0.1630	0.0239
53247.959702	0.1588	0.0228
53247.959706	0.1463	0.0230
...	...	...

Замечание: — Здесь для примера показана только небольшая часть таблицы. Таблица содержит 238638 строк и доступна полностью в электронной версии журнала, а также в сети по адресу: [http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/ru/ss433\\_pazh10/](http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/ru/ss433_pazh10/)

дидись, в основном, близко по времени к прецессионной фазе  $T_3$ . Это было сделано для того, чтобы увеличить чувствительность по отношению к переменному излучению объекта, поскольку предполагалось, что амплитуда переменности наиболее высока именно в этой фазе прецессии. Наблюдения проводились также и во время затмений диска — всего наблюдалось три затмения летом и осенью 2005 г.

Из-за ограничений по погоде а также из-за сбоев аппаратуры наблюдения не всегда удавалось проводить непрерывно в течение ночи. Тем не менее, основная часть данных представляет из себя непрерывные временные отрезки наблюдений длительностью по несколько часов. Всего в нашей работе использовано около 240 тысяч измерений потока оптического излучения объекта SS433, из них около 190 тысяч — это измерения с временным разрешением около 1 с, полученные в течение 2005 г. Результаты измерений потока излучения объекта SS433 в полосе  $R$ , использованные в нашей работе, сведены в таблице 2. На рис. 5 показаны примеры полученных кривых блеска объекта SS433 с различным временным разрешением. Здесь и везде ниже, если это не оговаривается особо, поток оптического излучения объекта SS433 дается в полосе  $R$  в единицах долей потока опорной звезды, указанной выше (рис. 1), звездная величина которой, согласно нашим измерениям, равна  $m_R = 10.57$ .

Ошибки измерения потоков менялись от наблюдения к наблюдению, поскольку они зависят от фона неба, ширины функции отклика на точечный источник, которая определяется степенью турбулентности атмосферы и т.п. Однако, в большинстве наблюдений они составляют величину около 2% измеряемого потока. Исключением являются наблюдения, выполненные в конце лета 2004 г., поскольку в этих наблюдениях экспозиции были

слишком сильно уменьшены для того, чтобы получить более высокое временное разрешение.

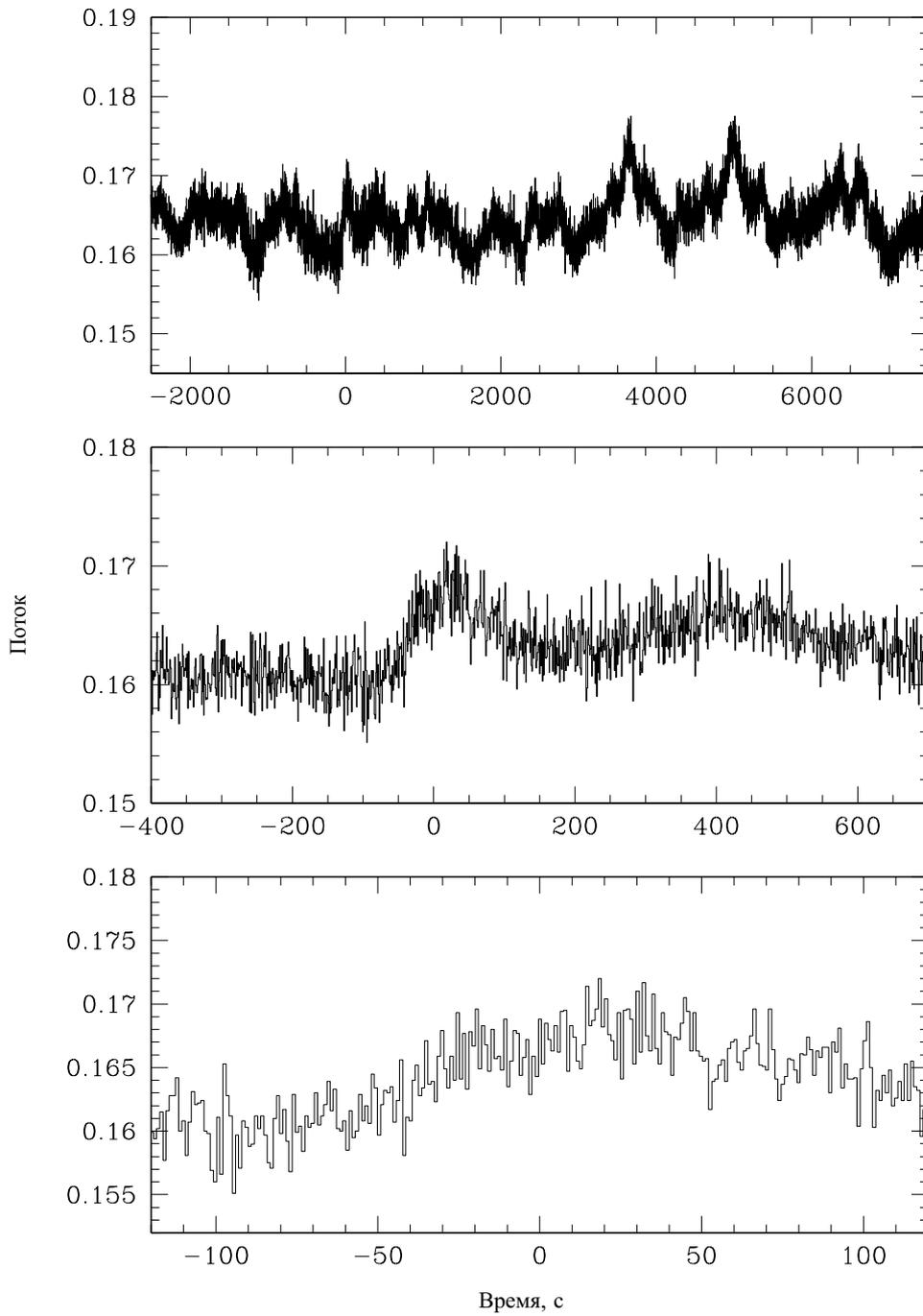
Ошибки, представленные в таблице 2, получены исходя из пуассоновского шума электронов, регистрируемых ПЗС-матрицей. Чтобы учесть влияние дрожания атмосферы и другие эффекты, этот шум умножался на поправку, вычисленную по наблюдениям непостоянных звезд, которая оказалась равной множителю около 2. Таким образом, ошибки в таблице 2 должны быть близкими к настоящим ошибкам измерений. Они могут быть использованы для оценки качества данных, однако, для исследования переменности объекта нигде ниже эти ошибки не используются.

## СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ

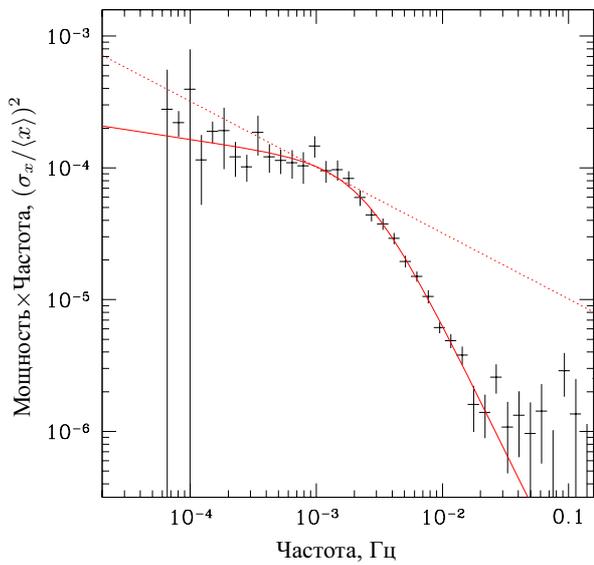
Спектры мощности переменности оптического излучения объекта SS433, полученные по нашим измерениям кривой блеска, показаны на рис. 6 и 7. Они измерены при помощи усреднения периодограмм Ломба-Скаргла (Ломб, 1976; Скаргл, 1982), вычисленных по всем непрерывным отрезкам данных и перенормированных таким образом, чтобы получить спектральную плотность мощности переменности в единицах квадрата относительного среднеквадратичного отклонения. На рис. 6 и 7 спектральная плотность мощности дополнительно еще умножена на частоту, таким образом, чтобы показать как соотносятся значения мощности в характерных интервалах частот.

Из спектров вычтена постоянная, соответствующая гауссовому шуму ошибок измерений, которая определялась по величине мощности на частотах  $f > 0.2$  Гц. Таким образом, считалось, что вся переменность на этих частотах обусловлена ошибками измерений. Это с хорошей точностью соответствует действительности, поскольку уже на частотах  $f > 0.03$  Гц мощность получается практически точно постоянной и ее значение, равное для разных отрезков кривой блеска от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-4}$ , хорошо согласуется с постоянным значением мощности, которое получалось при наблюдениях непостоянных звезд с близкими звездными величинами (см. выше, рис. 2).

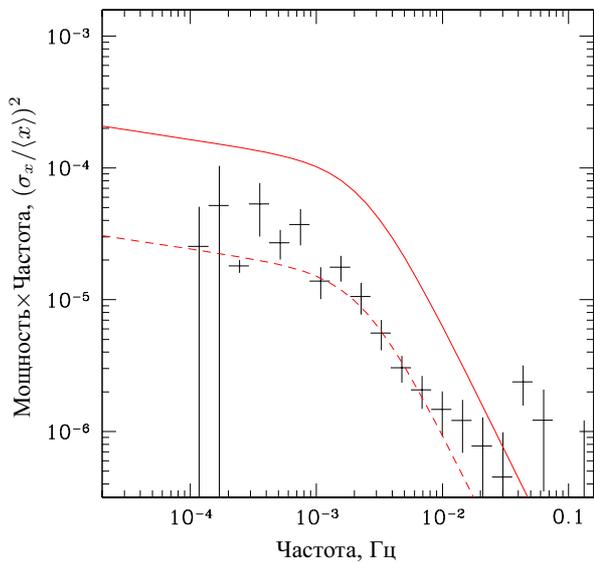
На рис. 6 показан спектр мощности переменности кривой блеска, из которой были исключены затмения аккреционного диска, т.е. данные, полученные при орбитальной фазе  $|\varphi_{\text{орб.}}| > 0.1$ . Также на этом рисунке показано наилучшее приближение спектра моделью  $P(f) = f^{\alpha_1} [1 + (f/f_0)^{2\alpha_2}]^{1/2}$ , где  $P(f)$  — спектральная плотность мощности. Параметры оказываются равными  $\alpha_1 = -1.15 \pm 0.06$ ,  $\alpha_2 = -1.80 \pm 0.13$  и  $f_0 = 2.43 \pm 0.29 \cdot 10^{-3}$  Гц. На рисунке пунктиром показан также степенной закон с наклоном  $-1.5$ , который был получен по наблюдениям переменности объекта SS433 в диапазоне частот  $10^{-7}$ – $10^{-2}$  Гц (Ревнивцев и др., 2006)



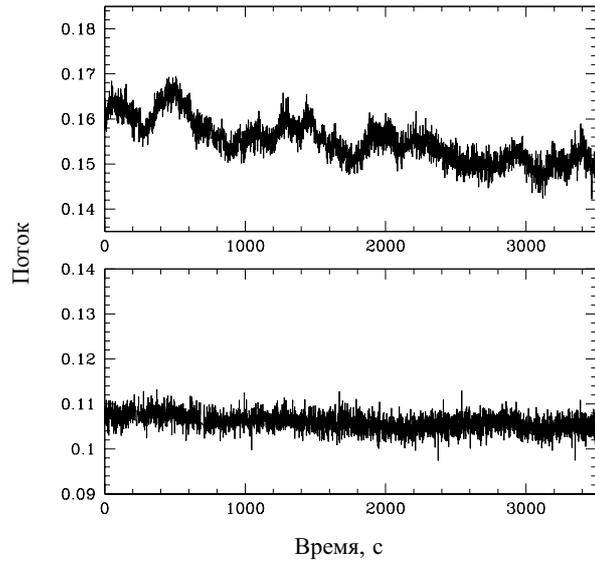
**Рис. 5.** Отрезок кривой блеска объекта *SS433*, показанный на разных временных масштабах. Начало времени на всех рисунках соответствует  $MJD = 53577.92245$ .



**Рис. 6.** Спектр мощности переменности оптического излучения объекта *SS433* вне затмений аккреционного диска.



**Рис. 7.** Спектр мощности переменности оптического излучения объекта *SS433* в течение затмений аккреционного диска.

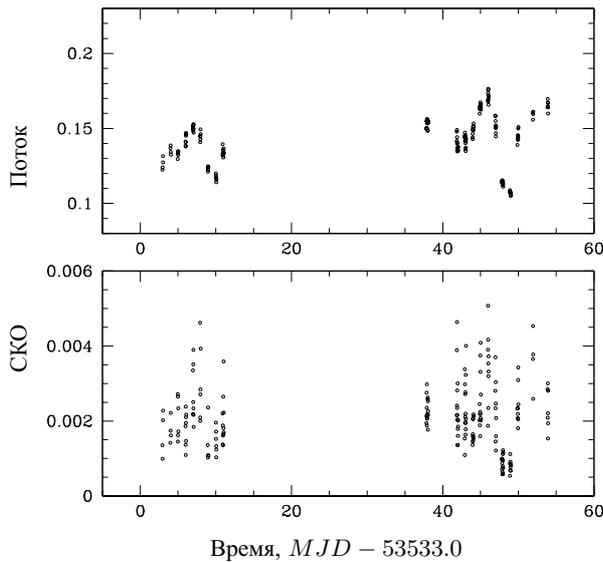


**Рис. 8.** Примеры кривых блеска объекта *SS433*. Сверху — вне затмения аккреционного диска, снизу — во время затмения.

Степенной наклон спектра мощности на высоких частотах равен  $\alpha_1 + \alpha_2 = -2.95$ , т.е. является существенно более крутым по сравнению с наклоном спектра на низких частотах измеренным по нашим данным ( $\alpha_1 = -1.15$ ), а также по сравнению с наклоном  $\alpha_1 = -1.5$ , который был измерен по наблюдениям на более низких частотах в работе Ревнивцева и др. (2006). Таким образом, по нашим данным наблюдается завал спектра мощности на частоте около  $2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц.

На рис. 7 показан спектр мощности по данным наблюдений в течение затмений аккреционного диска, при орбитальной фазе  $|\varphi_{\text{орб.}}| < 0.1$ . Видно, что переменность излучения сильно уменьшается в течение затмений диска. При этом форма спектра мощности, насколько можно судить из данных, остается примерно такой же, как и вне затмений, а нормировка уменьшается примерно в 4.5 раза. Для примера, на рис. 8 показаны отрезки кривых блеска объекта *SS433* вне и в течение затмения аккреционного диска. Падение амплитуды переменности оптического излучения во время затмения видно на этом рисунке невооруженным глазом.

На рис. 9 и 10 показано, как соотносятся средний поток оптического излучения объекта *SS433* и его среднеквадратическое отклонение (СКО) на временном масштабе 1000 с. На рис. 10 сплошными кружками показаны измерения во время затмения, когда орбитальная фаза имеет значение  $|\varphi_{\text{орб.}}| < 0.1$  (затмение), тогда как открытые кружки соответствуют  $|\varphi_{\text{орб.}}| > 0.1$  (вне затмения). Измерения с потоками около 0.14 в фазе соответствующей затмению, а также измерения кружки с потоками около 0.09 в фазе вне затмения, соответствуют наблюдениям 19 июля и 28 сентября 2005 г соответственно, когда орбитальная фаза близка к граничному

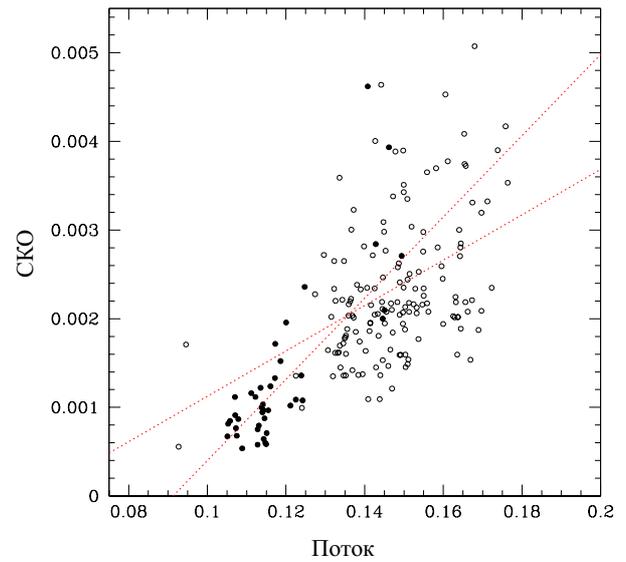


**Рис. 9.** Поток оптического излучения объекта *SS433* (вверху) и его среднеквадратическое отклонение на временном масштабе 1000 с (внизу).

значению  $\varphi_{\text{орб}} \approx 0.9$ . Таким образом, из наших данных следует, что вход в затмение происходит немного в разное время при разном значении фазы прецессии.

За исключением этих точек, все остальные измерения показывают не только падение потока оптического излучения в течение затмения, но и существенное падение амплитуды переменности источника. Кроме того, из рис. 9 и 10 видно, что амплитуда переменности оптического излучения уменьшается не только во время затмений, но и при уменьшении оптического потока вне затмения. Правда, оказывается, это происходит несколько медленнее, чем во время затмения. На рис. 10 показаны прямые, которые наилучшим образом описывают данные при значениях потока больше и меньше 0.14. Видно, что эти прямые имеют разный наклон, и можно утверждать, что наклоны этих прямых различаются на уровне значимости около  $3\sigma$ .

Изменение наклона зависимости СКО – средний поток в этих двух случаях не является чем-то неожиданным, поскольку затмение области аккреционного диска звездой компаньоном изменяет соотношение долей потоков переменной и постоянной компонент в полном оптическом излучении, регистрируемом на Земле. Действительно, в аккрецирующих системах обычно наблюдается прямая пропорциональность между амплитудой аperiодических вариации потока и величиной среднего потока (см. Лютыи и Окнянский 1987; Аттли и МакХарди 2001). Если бы мы могли наблюдать только одну переменную составляющую излучения двойной системы, то следовало бы ожидать наблюдать такую же зависимость между СКО и величиной среднего потока. Однако, наличие в оптическом диапазоне значительного



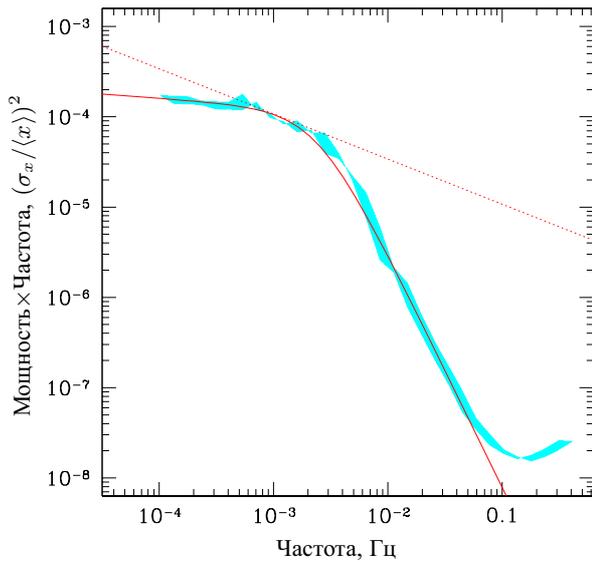
**Рис. 10.** Соотношение потока оптического излучения объекта *SS433* и его среднеквадратического отклонения на временном масштабе 1000 с. Сплошными кружками показаны измерения во время затмения, при  $\varphi_{\text{орб}} < 0.1$ .

вклада непременного потока от звезды-компаньона изменяет эту зависимость. В затмении доли переменной и постоянного потоков претерпевают дополнительные изменения, что приводит к изменению наклона зависимости СКО – средний поток относительно незатмненного состояния. Из рис. 10 видно, что в оптическом излучении объекта *SS433* в течение затмений имеется непременная составляющая с потоком около 0.09, что соответствует звездной величине  $m_R \approx 13.2$ .

#### СГЛАЖИВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ И ГЕОМЕТРИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБЛАСТИ

Как показано выше, спектр мощности переменности оптического излучения объекта *SS433*, полученный по нашим измерениям кривой блеска вне затмения аккреционного диска, показывает излом на частоте около  $2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц. Наличие такого завала в спектре мощности переменности на высоких частотах является ожидаемым, поскольку переменность должна исчезать на малых временных масштабах, сравнимых с задержкой времени прихода фотонов от разных частей источника переменного излучения. Частота  $f \approx 2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц соответствует характерному времени  $T = 1/2\pi f \approx 70$  с и расстоянию  $R \approx 2 \cdot 10^{12}$  см.

Форма и точное положение завала в спектре мощности определяются геометрией источника переменного излучения. Например, если все переменное излучение рождается на поверхности однородной сферы, которая, в свою очередь подсвечивается центральным источником, то поток излучения от бесконечно короткой вспышки этого источника будет регистрироваться удаленным



**Рис. 11.** Закрашенной полосой показан спектр мощности переменности наблюдаемого оптического излучения однородной сферы, размером  $R = 2.46 \cdot 10^{12}$  см (82.1 с), поверхность которой излучает переменное излучение со спектром мощности  $P \propto f^{-1.5}$  (пунктирная линия). Сплошной кривой показана аналитическая модель этого спектра мощности.

наблюдателем в виде вспышки с временным профилем  $\propto (1 - t/Rc)$ . Если центральный источник обладает внутренней переменностью, то поток, регистрируемый удаленным наблюдателем будет представлять собой поток центрального источника, свернутый с этой функцией отклика, а спектр мощности переменности потока, регистрируемого наблюдателем, будет являться произведением спектра мощности внутренней переменности центрального источника и квадрата Фурье-образа функции отклика сферы.

Для того, чтобы получить представление о том, как будет выглядеть измеряемый спектр мощности переменности излучения такой сферы, было проведено следующее простое моделирование. На временном отрезке длиной  $10^4$  с (что примерно соответствует времени непрерывного отрезка наблюдений в наших данных) была разыграна кривая блеска со степенным спектром мощности переменности  $P \propto f^{-1.5}$ , которая затем была свернута с функцией отклика сферы, о которой говорилось выше. После этого спектр мощности этого временного ряда был получен при помощи той же процедуры, которая использовалась для расчета спектров мощности при обработке данных наблюдений.

Полученный таким образом спектр мощности показан на рис. 11 закрашенной полосой. Сплошной кривой показана аналитическая модель этого спектра мощности в виде  $P(f) = f^{\alpha_1} [1 + (f/f_0)^{2\alpha_2}]^{1/2}$ , с параметрами  $\alpha_1 = -1.09$ ,  $\alpha_2 = -2.49$ ,  $f_0 = 2.43 \cdot 10^{-3}$  Гц. Для построения этого спектра мощности был взят размер

сферы  $R = 2.46 \cdot 10^{12}$  см (82.1 с). Этот размер был подобран таким образом, чтобы излом получался на частоте  $f \approx 2.43 \cdot 10^{-3}$  Гц, как это наблюдается и в наших данных по переменности объекта SS433. Наклон этого спектра мощности на высоких частотах получается более крутым, чем это наблюдается для объекта SS433 (рис. 6). По-видимому, это говорит о том, что излучающая область, на самом деле, имеет более сложную геометрию.

Кроме завала на характерной частоте, в модельном спектре мощности на рис. 11 видны и другие искажения, связанные с процедурой измерения спектра мощности — из-за утечки красного шума и других эффектов наблюдается уменьшение степенного наклона на низких частотах и добавление дополнительной небольшой шумовой составляющей на высоких частотах, вплоть до частоты Котельникова-Найквиста. Уменьшение наклона спектра на частотах около наиболее низкой измеряемой частоты происходит из-за того, что наблюдаемый спектр мощности является сверткой истинного спектра со спектром мощности функции окна и поэтому мощность на самых низких наблюдаемых частотах размывается в сторону более высоких частот.

Из этого ясно, что в наших измерениях наклон спектра мощности на низких частотах получается заниженным. Для правильного измерения наклона спектра мощности на низких частотах, на самом деле, необходимо проводить соответствующие моделирования. Эту работу предполагается провести в будущем. Тем не менее, эти искажения не должны сильно сказываться на измерении частоты излома спектра мощности.

На приведенном примере видно, что задаваясь определенной моделью источника переменного оптического излучения в объекте SS433, из наблюдаемого спектра мощности можно с хорошей точностью измерять его геометрический размер и даже судить о степени применимости различных моделей источника. Для наиболее правдоподобных моделей источника эту работу также предполагается провести в будущем.

## ОБСУЖДЕНИЕ

При наблюдениях объекта SS433 в оптическом диапазоне нами были использованы такие установки обычной ПЗС-матрицы, когда после каждой экспозиции с нее считывалось не изображение а одномерная полоса данных. Это позволило улучшить временное разрешение фотометрических измерений до величины порядка 1 с. При этом отношение сигнал-шум при измерении потоков остается высоким — разброс при измерениях потока оптического излучения объекта SS433, который имеет звездную величину  $m_R \approx 12.5$ , составляет величину всего около двух процентов потока, т.е. оказывается сравнимым с ожидаемым разбросом из-за пуассоновского фотонного шума.

При этом, важно, что во время таких наблюдений сохраняется возможность одновременно измерять потоки как минимум двух звезд (объекта и опорной) и получать разностные измерения потока объекта. При помощи наблюдений непериодических звезд показано, что это позволяет практически полностью устранить влияние дрожания атмосферы на фотометрические измерения. Поэтому данные, полученные таким способом, хорошо подходят для исследования *аперидической* переменности различных объектов. Мы уже применяли этот способ наблюдений также и для исследования внутренних областей аккреционных дисков набора промежуточных полярных при помощи наблюдений их переменности в оптическом диапазоне (Ревнивцев и др., 2010).

В нашей работе получен и исследован большой объем данных по переменности оптического излучения объекта *SS433*. Наблюдения проводились в течение более 2-х десятков ночей, в основном, летом 2005 г. Для наблюдений была выбрана прецессионная фаза, когда аккреционный диск наибольшим образом развернут к наблюдателю, поскольку в этой фазе переменность источника максимальна.

Спектр мощности переменности оптического излучения объекта *SS433*, полученный по нашим измерениям кривой блеска вне затмения аккреционного диска, показывает излом на частоте около  $2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц. Выше этой частоты спектр мощности переменности быстро падает, степенной наклон спектра мощности составляет  $\approx -2.95$ . Несмотря на это, статистически значимая переменность оптического излучения объекта *SS433* видна вплоть до частот  $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  Гц, при этом на таких частотах ее относительная амплитуда составляет величину всего лишь порядка 0.1%.

Наличие излома в спектре мощности переменности источника мы предлагаем объяснять как проявление сглаживания внутренней переменности источника за счет его конечного размера. Наше измерение этой частоты дает новое, независимое от других методов, измерение размера источника переменного оптического излучения в объекте *SS433*. Частота  $f \approx 2.4 \cdot 10^{-3}$  Гц соответствует характерному времени  $T = 1/2\pi f \approx 70$  с и размеру  $R \approx 2 \cdot 10^{12}$  см. Как показано выше, более точное измерение размера зависит от геометрической модели источника. Однако, задаваясь определенной моделью, из наших данных можно определить его размер с хорошей точностью, а также можно судить о степени применимости этой модели.

Наше измерение размера источника переменного оптического излучения оказывается близким к оценке размера источника горячего оптического излучения  $R \approx 2 \cdot 10^{12}$  см, который получается из моделирования распределения энергии по фотометрии в широких полосах в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах (Долан и др., 1997). Несколько меньший размер,  $R \approx (0.06 \div 0.09)a \approx 3 \cdot 10^{11}$  см, получается по измерению

расстояния, на котором релятивистская струя, излучающая в рентгеновском диапазоне, выходит из непрозрачного облака вещества, окружающего источник (Филиппова и др., 2006). Это может говорить о том, что оптический горячий переменный источник несимметричен в проекции на картинную плоскость.

По результатам наших наблюдений также показано, что амплитуда переменности объекта *SS433* резко уменьшается в течение затмения аккреционного диска, однако, не исчезает полностью. Это говорит о том, что размер источника переменного оптического излучения сравним с размером нормальной звезды, размер которой поэтому должен составлять также  $R_O \approx 2 \cdot 10^{12}$  см  $\approx 30R_{\odot}$ . При этом, затмение происходит таким образом, как если бы кроме переменного источника в объекте имелся бы также непериодический источник яркостью около  $m_R \approx 13.2$ . С учетом поглощения  $A_V \approx 8.4$  (Долан и др., 1997), эта величина соответствует абсолютной величине  $M_R \approx -7.2$ . Отметим, что порядка половины излучения в полосе *R* рождается в ветре вокруг системы (Долан и др., 1997; Горанский и др., 1998а).

Наша оценка радиуса нормальной звезды, а также величина непериодической составляющей оптической светимости источника, согласуются с предположением о том, что нормальная звезда представляет из себя сверхгигант спектрального класса *A*, как это получалось ранее по результатам фотометрических измерений в затмении (Черепашук и др., 1982) и по результатам наблюдений спектральных линий нормальной звезды (Хиллвиг и др., 2004; Хиллвиг и Гисс, 2008). Также радиус нормальной звезды хорошо сходится с оценкой, полученной по наблюдению затмений в рентгеновском диапазоне (Филиппова и др., 2006).

В целом, геометрические размеры источника, полученные при исследовании переменности оптического излучения объекта *SS433*, хорошо согласуются с результатами измерений этих величин, полученными ранее другими способами. При этом, следует подчеркнуть, что наши измерения получены новым, полностью независимым способом, использующим, в отличие от методов предыдущих работ, новое для таких исследований физическое явление — сглаживание переменности потока за счет конечного времени пролета светом размера излучающей системы. Это говорит о том, что имеющиеся представления о размерах системы являются правильными и не содержат больших систематических ошибок. Кроме того, по результатам нашей работы можно сделать вывод о том, что измерение аперидической переменности рентгеновских двойных систем в оптическом диапазоне является эффективным способом исследования геометрии излучающих областей в таких системах.

Авторы благодарят Государственную обсерваторию ТУБИТАК (ТУГ, Турция), Институт космических исследований РАН и Казанский государственный универси-

тет за поддержку в использовании Российско-Турецкого 1.5-м телескопа (РТТ-150). Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований 07-02-01004, 08-02-00974, 09-02-12384-офи\_м, 10-02-01442, 10-02-01145, 10-02-00492, 10-02-91223-СТ\_а, грантом государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5069.2010.2, а также программами Российской академии наук П-19 и ОФН-16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аттли и МакХарди* (Uttley P., McHardy I. M.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **323**, L26 (2001).
- Бегельман М., Кинг А., Прингл Дж.* (Begelman M. C., King A. R., Pringle J. E.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370**, 399 (2006).
- Долан и др.* (J. F. Dolan, P. T. Boyd, S. Fabrika, S. Tapia, V. Bychkov, A. A. Panferov, M. J. Nelson, J. W. Percival, G. W. van Citters, D. C. Taylor, M. J. Taylor), *Astron. Astrophys.* **327**, 648 (1997).
- Гладышев С. А., Горанский В. П., Черепашук А. М.*, Письма в Астрон. журн. **9**, 1 (1983) [*Soviet Astron. Letters* (Tr. Pisma Astr. Zh.), **9**, 1].
- Горанский В. П., Есинов В. Ф., Черепашук А. М.*, Астрон. журн. **75**, 209 (1998a) [*Astronomy Reports*, **42**, 209].
- Горанский В. П., Есинов В. Ф., Черепашук А. М.*, Астрон. журн. **75**, 383 (1998b) [*Astronomy Reports*, **42**, 336].
- Гильфанов и Арефьев* (Gilfanov M., Arefiev V.), arXiv:astro-ph/0501215.
- Эйкенберри и др.* (Eikenberry S. S., Cameron P. B., Fierce B. W., Kull D. M., Dror D. H., Houck J. R., Margon, B.), *Astrophys. J.* **561**, 1027 (2001).
- Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В.*, Современные проблемы атмосферной оптики, т. 5, «Оптика турбулентной атмосферы», Ленинград, Гидрометеиздат, 1988.
- Котани и др.* (T. Kotani, S. A. Trushkin, R. Valiullin, K. Kinugasa, S. Safi-Harb, N. Kawai, and M. Namiki), *Astrophys. J.* **637**, 486 (2006).
- Кинг* (King A.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **335**, L13 (2002).
- Ломб* (Lomb N. R.), *Astrophys. and Space Sci.* **39**, 447 (1976).
- Любарский* (Lyubarskii Yu. E.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **292**, 679 (1997).
- Лютый В. М., Окнянский В. Л.* (Lyutyj V. M., Oknyanskij V. L.), Астрон. журн. **64**, 465 (1987).
- Ревнивцев и др.* (Revnitsev M., Burenin R., Fabrika S., Postnov K., Bikmaev I., Pavlinsky M., Sunyaev R., Khamitov I., Aslan Z.), *Astron. Astrophys.* **424**, L5 (2004).
- Ревнивцев и др.* (Revnitsev M., Fabrika S., Abolmasov P., Postnov K., Bikmaev I., Burenin R., Pavlinsky M., Sunyaev R., Khamitov I., Sakhibullin N.), *Astron. Astrophys.* **447**, 545 (2006).
- Ревнивцев и др.* (Revnitsev M., Burenin R., Bikmaev I., Kniazev A., Buckley D. A. H., Pretorius M. L., Khamitov I., Ak T., Eker Z., Melnikov S., Crawford S., Pavlinsky M.), *Astron. Astrophys.*, in press; arXiv:1002.4073.
- Скаргл* (Scargle J. D.), *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
- Стюарт и др.* (Stewart G. C., Watson M. G., Matsuoka M., Brinkmann W., Jugaku J., Takagishi K., Omodaka T., Kemp J. C., Kenson G. D., Kraus D. J., Mazeh T., Leibowitz E. M.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **228**, 293 (1987).
- Трушкин и др.* (Trushkin S. A., Nizhelskij N. A., Bursov N. N., Majorova E. K.), “Black Holes from Stars to Galaxies – Across the Range of Masses, Ed. V. Karas and G. Matt, Proceedings of IAU Symposium #238, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 463–464 (2007).
- Фабрика* (Fabrika S.), *Astrophysics and Space Physics Reviews* **12**, 1 (2004); arXiv:astro-ph/0603390
- Фабрика и Мецереяков* (Fabrika S., Mescheryakov A.), “Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions, Proceedings of IAU Symposium #205, Ed. R. T. Schilizzi et al., Publisher Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, California, p. 268. (2001); arXiv:astro-ph/0103070
- Филиппова и др.* (E. Filippova, M. Revnitsev, S. Fabrika, K. Postnov, and E. Seifina), *Astron. Astrophys.* **460**, 125 (2006).
- Хиллиг и др.* (Hillwig T. C., Gies D. R., Huang W., McSwain M. V., Stark M. A., van der Meer A., Kaper L.), *Astrophys. J.* **615**, 442 (2004).
- Хиллиг и Гиес* (Hillwig T. C., Gies D. R.), *Astrophys. J.* **676**, L37 (2008).
- Черепашук* (Cherepashchuk A. M.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **194**, 761 (1981).
- Черепашук и др.* (Cherepashchuk A. M., Aslanov A. A., Kornilov V. G.), Астрон. журн. **59**, 1157 (1982).
- Черепашук* (Cherepashchuk A.), *Space Science Reviews* **102**, 23 (2002).
- Черепашук и др.* (Cherepashchuk A. M., Sunyaev R. A., Fabrika S. N., Postnov K. A., Molkov S. V., Barsukova E. A., Antokhina E. A., Irmambetova T. R., Panchenko I. E., Seifina E. V., Shakura N. I., Timokhin A. N., Bikmaev I. F., Sakhibullin N. A., Aslan Z., Khamitov I., Pramsky A. G., Sholukhova O., Gnedin Yu. N., Arkharov A. A., Larionov V. M.), *Astron. Astrophys.* **437**, 561 (2005).
- Чуразов и др.* (Churazov E., Gilfanov M., Revnitsev M.), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **321**, 759 (2001).