

УДК 524.7-423

ГРАВИТАЦИОННАЯ ЛИНЗА Q2237+0305: МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2007 г. Е. А. Коптелова, Б. П. Артамонов,
Е. В. Шимановская, В. В. Бруевич, А. С. Гусев, О. В. Ежкова

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

Поступила в редакцию 06.12.2006 г.; принята в печать 05.04.2007 г.

Представлены результаты *VRI*-фотометрии гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 по данным наблюдений на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории в период 2004–2005 гг. Подробно описана методика обработки наблюдательных данных. Проведен анализ вариаций блеска и цвета компонентов системы.

PACS: 98.54.Aj, 95.75.De, 98.62.Sb

1. ВВЕДЕНИЕ

Данные программ долговременного мониторинга гравитационно-линзированных квазаров позволяют исследовать наиболее удаленные объекты во Вселенной — квазары и галактики. Наблюдаемые вариации блеска изображений квазара являются основным источником информации о системе и связаны с процессами, происходящими в самом источнике, и микролинзовыми вариациями на компактных объектах линзирующей галактики.

С момента открытия в 1985 г. Хукрой и др. [1] гравитационно-линзовая система Q2237+0305, известная также как “Крест Эйнштейна”, стала объектом пристального исследования. Высокая поверхностная плотность и близость спиральной галактики ($z_l = 0.039$ — это в 10 раз ближе самого квазара, для которого $z_q = 1.695$), приводят к тому, что микролинзовые вариации, в том числе и вариации с высоким усилением яркости, в данной системе происходят в несколько раз чаще, чем в других известных системах. Кроме того, продолжительность событий позволяет наблюдать микролинзовую активность за разумные промежутки времени.

Первый международный проект длительностью три года был выполнен на двух различных телескопах с перерывами между наблюдениями чуть меньше года [2]. С 1990 г. в течение пяти лет проводились регулярные наблюдения системы в фильтрах *V*, *R*, *I* на Скандинавском оптическом телескопе NOT [3]. В 2002 г. появились данные мониторинга группы GLITP (Gravitational Lens International Time Project), продолжавшегося в период с октября 1999 г. по февраль 2000 г. [4].

С 1998 г. регулярный мониторинг Q2237+0305 в фильтре *V* ведется группой OGLE (Optical Gravitational Lens Experiment). Данные мониторинга отличаются высокой плотностью и общедоступны. С 1995 г. регулярные наблюдения системы ведутся также на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории. Получен большой массив данных в фильтрах *V*, *R* и *I*. Результаты *VRI*-фотометрии системы за 1995–2000 гг. опубликованы в работе [5]. Кривые блеска компонентов в фильтре *R* на основе последующих наблюдений, выполненных в 2002–2003 гг., получены в работе [6].

Накопленный разными наблюдательными группами материал наглядно демонстрирует, что в системе происходят заметные вариации блеска компонентов с временными масштабами от нескольких месяцев до нескольких лет, никак не коррелируемые между собой. За время наблюдений в системе зафиксировано несколько событий микролинзирования с высоким усилением яркости. Ирвин и Вебстер [7], имея в своем распоряжении только две ночи наблюдений (18 августа и 16 сентября 1988 г.), представили первое свидетельство микролинзирования с высоким усилением компонента А системы. Обобщенные кривые блеска, построенные Корриганом [2] по данным наблюдений нескольких групп в течение лета–осени 1988 г., подтвердили эти наблюдения. Амплитуда переменности составила 0.16^m , продолжительность события — 100 дней. В 1999 г. наблюдались два события микролинзирования с высоким усилением в компонентах А и С системы. Событие микролинзирования компонента С в 1999 г. сопровождалось увеличением его яркости на 1^m в фильтре *R* и изменением показателя цвета

Таблица 1. Звездные величины опорных звезд α и β в фильтрах I , R , V , по данным работы [2]

Звезда	I	R	V
α	17.26	17.28	17.50
β	17.70	17.83	18.18

$V-I$ на 0.42^m . Во время события микролинзирования 1999 г. компонент А увеличил свою яркость на 0.45^m в фильтре R и его показатель цвета $V-I$ изменился на 0.15^m . События наблюдались группой OGLE в фильтре V [8, 9] и группой GLITP в фильтрах V и R [4]. Полученные данные характеризуются высоким качеством наблюдательного материала и высокой плотностью наблюдений.

Одновременно с наблюдениями развиваются методы фотометрической обработки системы [3, 10–14]. Выбор метода диктуется условиями наблюдений системы, качеством наблюдательного материала и требуемой точностью определения фотометрических и астрометрических характеристик. В данной работе обработка данных, полученных в рамках мониторинга системы Q2237+0203 в 2004–2005 гг., проводилась методом, предложенным в работах [6, 15].

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдательные данные были получены на 1.5-м телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в период с июня 2004 г. по ноябрь 2005 г. Объект наблюдался в фильтрах V , R и I с использованием ПЗС-камеры, установленной в коротком (1 : 8) фокусе телескопа АЗТ-22. Полученные изображения содержат, помимо самого объекта, три звезды сравнения (α , β , γ), для которых независимыми методами измерены звездные величины [2, 10]. Звездные величины звезды сравнения α и опорной звезды β приведены в табл. 1. Время экспозиции не превышало 3 мин.

Для предварительной обработки данных нами использовались возможности пакета MIDAS (Munich Image Data Analysis System). Первичная обработка включала в себя вычитание кадра сдвига, коррекцию за плоское поле с использованием суперфлэта с высоким отношением сигнала к шуму, учет фона неба, чистку космических лучей. Малое значение темнового тока, вследствие низкой температуры, при которой работает матрица, позволяет исключить вычитание кадров темного поля из процесса предварительной обработки данных. Из исходного изображения вырезался кадр размером 64×64 пикс. ($17.1'' \times 17.1''$), центрированный на ядро линзирующей галактики.

3. ФОТОМЕТРИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Модель изображения, снятого на ПЗС-матрицу наземного телескопа, обычно описывается уравнением свертки:

$$t(i, j) * z(i, j) = u(i, j), \quad (1)$$

где i и j — координаты пиксела, $z(i, j)$ — неизвестное распределение яркости, $t(i, j)$ — функция рассеяния точки (ФРТ), $u(i, j)$ — наблюдаемое распределение яркости. Фотометрические измерения сводятся к тому, чтобы по наблюдаемому размытому изображению $u(i, j)$, а также по заданной функции рассеяния точки $t(i, j)$ найти по возможности более полные характеристики исходного объекта $z(i, j)$.

Фотометрия компонентов системы Q2237+0305 затруднена в силу ряда причин. Расстояние между компонентами квазара Q2237+0305 порядка $1''$, т.е. оно сравнимо с качеством изображений, характеризующим шириной точечного источника на половине интенсивности (FWHM). Даже при хорошем качестве изображений крылья распределений яркостей компонентов перекрываются. В течение наблюдательного сезона величина FWHM не остается постоянной и меняется в среднем в диапазоне $0.8''$ – $2.0''$. Малые расстояния между компонентами системы, присутствие яркого ядра галактики и размытие вследствие ограниченной разрешающей способности прибора и турбулентности атмосферы приводят к тому, что потоки компонентов перекрываются. Методы апертурной фотометрии, которую используют в областях с малой концентрацией звездообразных источников и равномерным подстилающим фоном, в данном случае оказываются непригодными.

Модель искомого распределения яркости $z(i, j)$ в уравнении (1) может быть представлена как сумма точечных звездообразных компонентов квазара (δ -функций) и распределения яркости линзирующей галактики $g(i, j)$:

$$z(i, j) = \sum_{k=1}^4 I_k \delta(i - x_k, j - y_k) + g(i, j), \quad (2)$$

где δ — функция Дирака. Суммирование производится по количеству точечных источников с координатами (x_k, y_k) и интенсивностями I_k . Неизвестными параметрами являются координаты компонентов квазара (x_k, y_k) , их интенсивности I_k и распределение яркости галактики $g(i, j)$. Даже если не принимать во внимание присутствие неравномерного фона галактики (слагаемое $g(i, j)$ в уравнении (2)), точное определение положений компонентов и их интенсивностей представляет весьма сложную задачу. Общая стратегия может

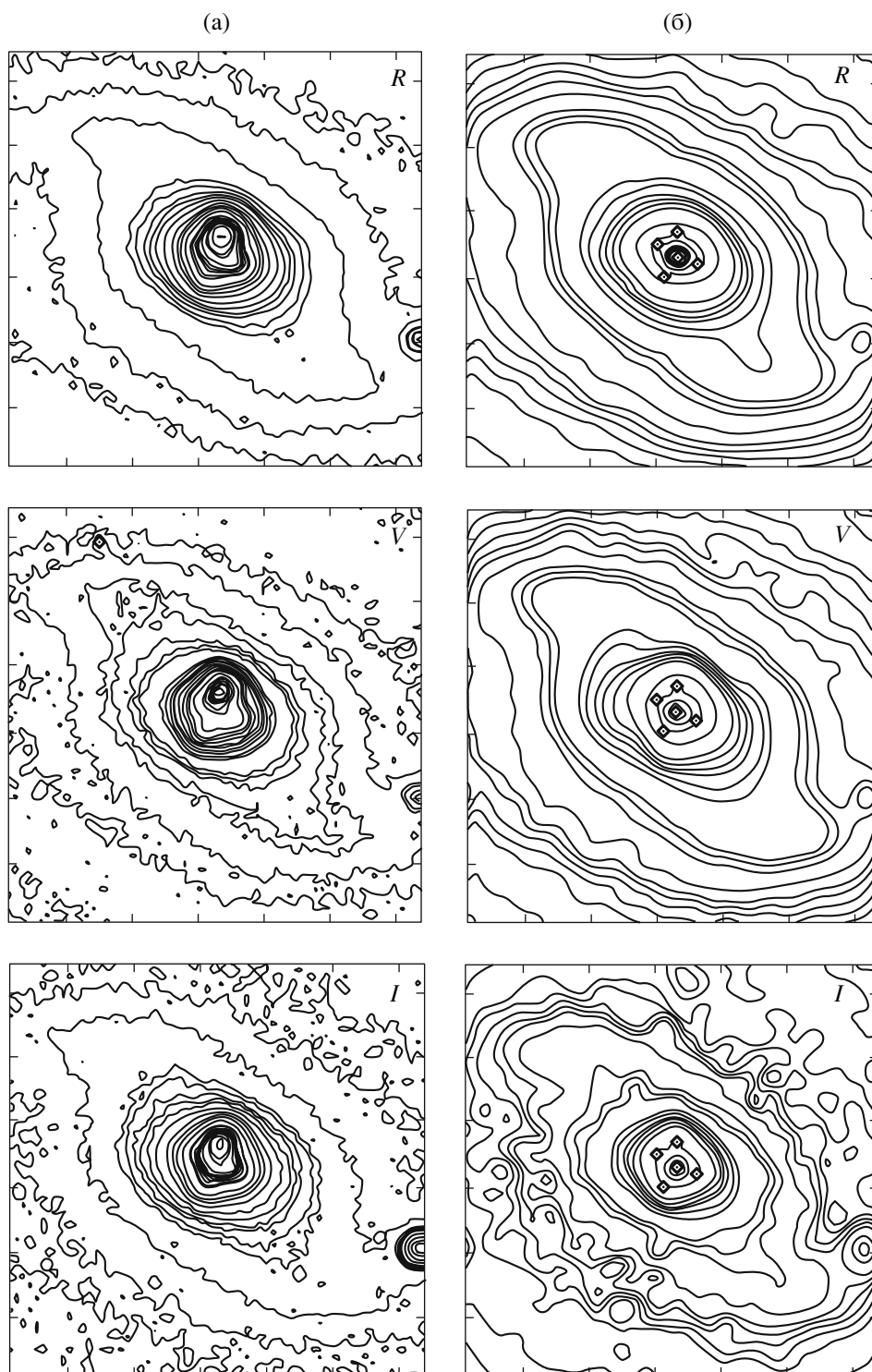


Рис. 1. Линии одинаковой яркости исходного (а) и восстановленного, свободного от ФРТ (б), изображения Q2237+0305 в фильтрах R , V , I . Размер области кадра 64×64 пикс. ($17.1'' \times 17.1''$).

быть определена следующим образом: получение модели подстилающей галактики, определение положений и интенсивностей компонентов. При этом

точность астрометрических измерений существенным образом влияет на конечный результат.

Присутствие яркой галактики и различный подход к ее описанию и учету при фотометрических

Таблица 2. Звездные величины линзирующей галактики в фильтрах R , V , I по данным работы [20] в апертуре $18.2'' \times 18.2''$ и полученные на основе наблюдений на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в апертуре $17.1'' \times 17.1''$

Телескоп	R	V	I
NOT	15.10 ± 0.03	15.53 ± 0.04	14.87 ± 0.03
АЗТ-22	14.61 ± 0.08	15.03 ± 0.09	14.24 ± 0.06

измерениях являются причиной несоответствия результатов различных программ мониторинга, а также приводят к различным результатам фотометрии при применении различных методов к одним и тем же данным [4, 11]. Определение соотношения вкладов точечных источников и фона в результирующее изображение является одной из проблем фотометрической обработки системы.

Для описания закона распределения яркости галактики обычно используют аналитическую [3–5] или численную модель [10, 11]. Преимуществом использования аналитической модели является существенно меньшее число неизвестных параметров задачи, что значительно сокращает время вычислений. Уменьшение временных затрат особенно важно при обработке больших массивов данных, полученных в рамках мониторинга системы. Однако распределение яркости спиральной галактики с баром трудно описать аналитической моделью. Неадекватная модель галактики ведет к систематическим ошибкам фотометрии компонентов.

Определение численной модели галактики представляет собой самостоятельную задачу. Численное описание галактики использовалось в работах [7, 10], а также в работе [2] для построения первой обобщенной кривой блеска компонентов квазара. Метод, описанный в работе [10], заключался в последовательном вычитании компонентов квазара и сглаживании изображения галактики, после чего полученная таким образом модель галактики учитывалась при фотометрии компонентов квазара. В работах [2, 7] применялась более сложная процедура. Сначала с помощью фильтрации и интерполяции из RB -изображения Q2237+0305 удалялись компоненты квазара, а потом конструировались численные модели балджа, бара и спиральных рукавов. Применение алгоритма, описанного в работе [11], для фотометрии компонентов системы Q2237+0305 исследовалось в работе Белокурова и др. [16]. Однако применение данного метода, основанного на теории регуляризации, к каждому отдельно взятому кадру, полученному с экспозицией 3 мин, затруднительно вследствие малых значений величины отношения сигнала к шуму. Кроме того, как показано в работах [17,

18], наиболее стабильные результаты получаются, если ввести в алгоритм предположение о близости распределения яркости в галактике к одному из модельных профилей. Для поиска численной модели галактики к изображению, полученному усреднением кадров с качеством изображения $\sim 0.8''$, был применен алгоритм, описанный в работе [15]. Операции сложения и усреднения производились для увеличения отношения сигнала к шуму. На рис. 1 показаны контуры исходного изображения объекта и восстановленного изображения, свободного от ФРТ, в фильтрах R , V , I , соответственно.

Задача поиска численной модели галактики вовлекает большое число свободных параметров (в нашем случае число свободных параметров составляло 4108 при размере обрабатываемого кадра 64×64 пикс.). Применение алгоритма для фотометрической обработки данных мониторинга потребовало бы очень много времени. Поскольку галактика дает постоянный вклад в интенсивности компонентов, оптимизация процедуры обработки кадров может быть достигнута путем учета фона, создаваемого галактикой, в предположении, что он остается постоянным от кадра к кадру. Таким образом, известное распределение яркости галактики может быть использовано для обработки каждого отдельно взятого кадра с получением астрометрических и фотометрических параметров гравитационной линзы. Поскольку величина сигнала и уровень фона меняются от кадра к кадру, распределение яркости галактики в общем случае может быть представлено в виде:

$$G(i, j) = \lambda_1 g(i, j) + \lambda_2, \quad (3)$$

где коэффициент λ_1 задает уровень интенсивности галактики в каждом кадре, а коэффициент λ_2 задает фон. Описание алгоритма и сравнение с итеративным методом CLEAN [19] дано в работе [15]. Применение алгоритма к данным мониторинга было описано в работе [6]. При такой постановке задачи параметр λ_1 может быть использован для определения звездной величины галактики. Так как мы используем для обработки данных заданный размер кадра (64×64 пикс.) и поскольку галактика имеет одну и ту же яркость, постоянство потока от галактики в заданной апертуре от кадра к кадру является хорошим тестом для проверки работы алгоритма. Небольшие флуктуации (до нескольких процентов) могут быть вызваны различием условий наблюдений. В табл. 2 приведены значения звездных величин линзирующей галактики в фильтрах R , V , I по данным работы [20] в апертуре $18.2'' \times 18.2''$ и полученные нами в апертуре $17.1'' \times 17.1''$.

Для реализации алгоритма фотометрической обработки требуется предварительная подготовка наблюдательного материала. Необходимо, чтобы

Таблица 3. Результаты фотометрии Q2237 + 0305 в фильтре V по данным наблюдений на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в 2004–2005 гг.: юлианская дата, величина FWHM (характеризующая качество изображения) и звездные величины для четырех компонентов квазара

JD–2450000	FWHM	A	B	C	D
53 163.0	1.3''	17.175 ± 0.005	18.583 ± 0.038	18.165 ± 0.015	18.322 ± 0.019
53 164.0	2.4	17.178 ± 0.006	18.531 ± 0.033	18.081 ± 0.014	18.249 ± 0.024
53 167.0	1.2	17.177 ± 0.006	18.536 ± 0.028	18.104 ± 0.013	18.278 ± 0.018
53 168.0	1.2	17.173 ± 0.006	18.437 ± 0.026	18.121 ± 0.014	18.322 ± 0.022
53 169.0	1.1	17.168 ± 0.005	18.524 ± 0.030	18.092 ± 0.012	18.356 ± 0.019
53 171.0	1.7	17.176 ± 0.006	18.575 ± 0.042	18.086 ± 0.017	18.412 ± 0.025
53 172.0	1.1	17.237 ± 0.004	18.546 ± 0.027	18.210 ± 0.011	18.395 ± 0.019
53 173.0	1.1	17.239 ± 0.005	18.557 ± 0.029	18.238 ± 0.011	18.344 ± 0.018
53 176.0	1.1	17.177 ± 0.005	18.515 ± 0.030	18.160 ± 0.012	18.379 ± 0.021
53 178.0	1.2	17.178 ± 0.006	18.534 ± 0.032	18.098 ± 0.015	18.348 ± 0.022
53 188.0	1.0	17.235 ± 0.005	18.554 ± 0.029	18.211 ± 0.013	18.361 ± 0.019
53 190.0	1.2	17.232 ± 0.004	18.554 ± 0.031	18.245 ± 0.015	18.397 ± 0.021
53 195.0	0.9	17.263 ± 0.007	18.555 ± 0.026	18.223 ± 0.011	18.324 ± 0.017
53 196.0	0.9	17.294 ± 0.004	18.528 ± 0.023	18.246 ± 0.011	18.372 ± 0.015
53 205.0	1.2	17.126 ± 0.006	18.541 ± 0.035	18.042 ± 0.015	18.313 ± 0.022
53 207.0	1.3	17.128 ± 0.005	18.571 ± 0.032	18.077 ± 0.013	18.210 ± 0.019
53 208.0	1.0	17.247 ± 0.009	18.525 ± 0.025	18.210 ± 0.012	18.338 ± 0.017
53 209.0	0.8	17.232 ± 0.006	18.575 ± 0.022	18.199 ± 0.011	18.496 ± 0.016
53 213.0	1.0	17.228 ± 0.005	18.527 ± 0.026	18.214 ± 0.013	18.398 ± 0.018
53 214.0	1.0	17.195 ± 0.004	18.511 ± 0.025	18.178 ± 0.014	18.295 ± 0.017
53 215.0	1.2	17.141 ± 0.005	18.533 ± 0.031	18.133 ± 0.013	18.295 ± 0.019
53 216.0	1.4	17.129 ± 0.007	18.561 ± 0.035	18.138 ± 0.015	18.288 ± 0.022
53 221.0	1.2	17.197 ± 0.005	18.507 ± 0.028	18.149 ± 0.014	18.182 ± 0.018
53 222.0	1.1	17.204 ± 0.005	18.550 ± 0.027	18.231 ± 0.013	18.309 ± 0.016
53 224.0	1.1	17.197 ± 0.006	18.555 ± 0.026	18.211 ± 0.012	18.329 ± 0.017
53 226.0	1.2	17.157 ± 0.007	18.478 ± 0.031	18.115 ± 0.015	18.273 ± 0.019
53 227.0	1.1	17.183 ± 0.006	18.504 ± 0.028	18.164 ± 0.013	18.336 ± 0.019
53 230.0	1.0	17.178 ± 0.005	18.455 ± 0.025	18.197 ± 0.012	18.296 ± 0.017
53 231.0	1.1	17.194 ± 0.006	18.428 ± 0.028	18.192 ± 0.013	18.307 ± 0.019
53 232.0	1.3	17.183 ± 0.008	18.493 ± 0.034	18.004 ± 0.016	18.258 ± 0.021
53 234.0	1.2	17.115 ± 0.006	18.480 ± 0.029	18.113 ± 0.014	18.286 ± 0.021
53 235.0	1.1	17.130 ± 0.005	18.501 ± 0.028	18.162 ± 0.013	18.203 ± 0.017
53 237.0	1.0	17.183 ± 0.005	18.510 ± 0.026	18.175 ± 0.013	18.301 ± 0.018
53 239.0	1.0	17.193 ± 0.006	18.508 ± 0.023	18.217 ± 0.014	18.317 ± 0.016
53 243.0	1.0	17.183 ± 0.007	18.502 ± 0.028	18.239 ± 0.015	18.298 ± 0.018

Таблица 3. Продолжение

JD-2450000	FWHM	A	B	C	D
53 250.0	0.9''	17.143 ± 0.009	18.392 ± 0.034	18.120 ± 0.018	18.309 ± 0.022
53 253.0	1.2	17.212 ± 0.010	18.336 ± 0.022	18.157 ± 0.019	18.325 ± 0.023
53 257.0	1.1	17.196 ± 0.009	18.405 ± 0.019	18.148 ± 0.014	18.360 ± 0.021
53 259.0	0.9	17.193 ± 0.007	18.499 ± 0.015	18.291 ± 0.011	18.376 ± 0.016
53 266.0	1.3	17.188 ± 0.009	18.280 ± 0.031	18.133 ± 0.017	18.304 ± 0.023
53 268.0	1.0	17.198 ± 0.011	18.440 ± 0.026	18.228 ± 0.023	18.308 ± 0.027
53 289.0	1.2	17.199 ± 0.012	18.322 ± 0.028	18.126 ± 0.024	18.358 ± 0.022
53 292.0	1.0	17.192 ± 0.008	18.388 ± 0.016	18.216 ± 0.014	18.345 ± 0.018
53 297.0	1.1	17.200 ± 0.008	18.341 ± 0.017	18.197 ± 0.016	18.352 ± 0.022
53 300.0	1.3	17.188 ± 0.009	18.325 ± 0.023	18.148 ± 0.018	18.331 ± 0.026
53 307.0	0.9	17.239 ± 0.007	18.379 ± 0.015	18.273 ± 0.014	18.363 ± 0.018
53 309.0	0.9	17.192 ± 0.007	18.416 ± 0.021	18.139 ± 0.013	18.329 ± 0.014
53 320.0	1.1	17.197 ± 0.008	18.336 ± 0.018	18.198 ± 0.019	18.337 ± 0.021
53 527.0	1.1	17.188 ± 0.008	17.773 ± 0.020	18.158 ± 0.018	18.191 ± 0.038
53 528.0	1.0	17.196 ± 0.007	17.769 ± 0.016	18.188 ± 0.015	18.286 ± 0.032
53 535.0	1.1	17.190 ± 0.008	17.828 ± 0.020	18.150 ± 0.017	18.255 ± 0.029
53 536.0	1.0	17.225 ± 0.007	17.823 ± 0.018	18.264 ± 0.019	18.202 ± 0.027
53 537.0	1.0	17.221 ± 0.008	17.806 ± 0.019	18.176 ± 0.017	18.227 ± 0.031
53 541.0	1.1	17.229 ± 0.008	17.841 ± 0.021	18.181 ± 0.019	18.327 ± 0.035
53 542.0	1.1	17.219 ± 0.008	17.839 ± 0.020	18.217 ± 0.019	18.282 ± 0.035
53 544.0	1.3	17.246 ± 0.010	17.849 ± 0.028	18.142 ± 0.023	18.378 ± 0.042
53 545.0	1.7	17.223 ± 0.010	17.871 ± 0.029	18.104 ± 0.023	18.345 ± 0.034
53 551.0	1.1	17.199 ± 0.008	17.879 ± 0.021	18.194 ± 0.019	18.248 ± 0.033
53 552.0	1.0	17.243 ± 0.009	17.885 ± 0.024	18.193 ± 0.019	18.322 ± 0.043
53 554.0	1.1	17.240 ± 0.008	17.868 ± 0.019	18.244 ± 0.023	18.326 ± 0.026
53 555.0	1.2	17.233 ± 0.008	17.841 ± 0.020	18.240 ± 0.022	18.320 ± 0.021
53 556.0	0.9	17.282 ± 0.009	17.871 ± 0.016	18.265 ± 0.020	18.339 ± 0.019
53 557.0	1.0	17.283 ± 0.007	17.819 ± 0.017	18.276 ± 0.021	18.351 ± 0.017
53 558.0	1.2	17.225 ± 0.008	17.847 ± 0.024	18.327 ± 0.022	18.349 ± 0.024
53 559.0	1.3	17.184 ± 0.009	17.793 ± 0.023	18.246 ± 0.021	18.381 ± 0.023
53 564.0	1.0	17.269 ± 0.007	17.850 ± 0.017	18.294 ± 0.019	18.349 ± 0.019
53 565.0	1.1	17.255 ± 0.008	17.855 ± 0.021	18.296 ± 0.023	18.346 ± 0.020
53 566.0	1.2	17.253 ± 0.007	17.781 ± 0.022	18.260 ± 0.024	18.396 ± 0.023
53 569.0	1.1	17.264 ± 0.007	17.852 ± 0.019	18.302 ± 0.022	18.332 ± 0.019
53 570.0	1.1	17.272 ± 0.008	17.912 ± 0.017	18.319 ± 0.020	18.383 ± 0.016
53 571.0	1.0	17.299 ± 0.009	17.890 ± 0.017	18.288 ± 0.018	18.391 ± 0.023

Таблица 3. Окончание

JD–2450000	FWHM	A	B	C	D
53 577.0	1.0''	17.311 ± 0.007	17.919 ± 0.018	18.320 ± 0.021	18.393 ± 0.033
53 578.0	1.1	17.272 ± 0.009	17.924 ± 0.024	18.324 ± 0.025	18.335 ± 0.039
53 579.0	1.2	17.232 ± 0.008	17.892 ± 0.020	18.243 ± 0.023	18.392 ± 0.021
53 580.0	1.1	17.267 ± 0.007	17.940 ± 0.021	18.308 ± 0.021	18.389 ± 0.027
53 582.0	1.1	17.235 ± 0.009	17.942 ± 0.019	18.291 ± 0.024	18.309 ± 0.021
53 584.0	1.3	17.186 ± 0.010	17.898 ± 0.022	18.227 ± 0.018	18.263 ± 0.024
53 585.0	1.0	17.209 ± 0.007	17.925 ± 0.018	18.281 ± 0.023	18.292 ± 0.019
53 586.0	1.1	17.283 ± 0.009	17.881 ± 0.015	18.343 ± 0.027	18.308 ± 0.021
53 589.0	1.1	17.286 ± 0.008	17.864 ± 0.018	18.329 ± 0.033	18.332 ± 0.011
53 590.0	1.1	17.261 ± 0.005	17.860 ± 0.020	18.332 ± 0.019	18.365 ± 0.022
53 591.0	1.2	17.248 ± 0.008	17.869 ± 0.019	18.318 ± 0.026	18.349 ± 0.024
53 597.0	1.1	17.268 ± 0.007	17.854 ± 0.025	18.283 ± 0.028	18.319 ± 0.021
53 599.0	1.1	17.263 ± 0.010	17.905 ± 0.017	18.332 ± 0.021	18.361 ± 0.033
53 608.0	1.1	17.253 ± 0.007	17.916 ± 0.024	18.319 ± 0.019	18.315 ± 0.037
53 610.0	1.3	17.208 ± 0.012	17.904 ± 0.022	18.324 ± 0.019	18.292 ± 0.026
53 614.0	1.2	17.248 ± 0.008	17.918 ± 0.018	18.313 ± 0.022	18.311 ± 0.024
53 615.0	1.1	17.256 ± 0.006	17.907 ± 0.020	18.325 ± 0.025	18.270 ± 0.031
53 619.0	1.1	17.235 ± 0.011	17.916 ± 0.017	18.361 ± 0.029	18.277 ± 0.025
53 623.0	1.1	17.169 ± 0.013	17.884 ± 0.017	18.320 ± 0.021	18.305 ± 0.030
53 625.0	1.2	17.222 ± 0.007	17.879 ± 0.012	18.358 ± 0.016	18.326 ± 0.032
53 662.0	1.0	17.216 ± 0.005	17.871 ± 0.012	18.295 ± 0.021	18.311 ± 0.021
53 663.0	1.2	17.156 ± 0.015	17.891 ± 0.018	18.271 ± 0.029	18.331 ± 0.042
53 679.0	1.0	17.146 ± 0.007	17.853 ± 0.016	18.254 ± 0.019	18.345 ± 0.018
53 703.0	1.4	17.145 ± 0.008	17.835 ± 0.013	18.214 ± 0.022	18.355 ± 0.026
53 704.0	1.6	17.128 ± 0.011	17.832 ± 0.025	18.221 ± 0.032	18.349 ± 0.043
53 705.0	1.0	17.171 ± 0.011	17.816 ± 0.026	18.254 ± 0.034	18.344 ± 0.045

оба изображения — изображение численной модели галактики и изображение системы — были приведены к единой системе координат и центр численной модели галактики был совмещен с центром галактики обрабатываемого кадра.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ *VRI*-ФОТОМЕТРИИ

Результаты фотометрии компонентов системы в фильтре *V* представлены в табл. 3. Показатели цвета *V–R* и *V–I* компонентов приведены в табл. 4 и 5. Кривые блеска, полученные в фильтре *V*, показаны на рис. 2 в сравнении с данными группы OGLE за тот же период наблюдений. Для наглядного представления кривые блеска компонентов B, C и D смещены вдоль оси звездных величин на -0.3^m , 0.4^m и 0.9^m , соответственно. На

рис. 2 показана также кривая блеска звезды сравнения α относительно опорной звезды β ($\Delta m = m_\beta - m_\alpha$). Калибровка результатов фотометрии произведена по звезде α (табл. 1). Звезда α находится на небольшом угловом расстоянии от объекта, поэтому эффекты атмосферной экстинкции и переменности воздушной массы нами не учитывались. Так как объект наблюдался сериями по 6–10 кадров, ошибка определения звездных величин была получена как среднеквадратичное отклонения от среднего по серии, деленное на корень квадратный из числа кадров в серии.

Наиболее заметным событием в системе за рассматриваемый период явилось значительное изменение яркости компонента B. С 2000 г. компонент B был самым слабым компонентом системы.

Таблица 4. Показатели цвета $V-R$ и $V-I$ компонентов А и В квазара Q2237 + 0305, полученные по данным наблюдений на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в 2004–2005 гг.

JD–2450000	Компонент А		Компонент В	
	$V-R$	$V-I$	$V-R$	$V-I$
53 171.0	0.072 ± 0.011	0.209 ± 0.019	0.242 ± 0.015	0.412 ± 0.016
53 202.0	0.130 ± 0.010	0.263 ± 0.018	0.236 ± 0.012	0.436 ± 0.021
53 232.0	0.094 ± 0.006	0.244 ± 0.011	0.243 ± 0.014	0.428 ± 0.017
53 260.0	0.155 ± 0.009	0.303 ± 0.010	0.236 ± 0.026	0.377 ± 0.016
53 294.0	0.158 ± 0.009	0.305 ± 0.006	0.201 ± 0.016	0.369 ± 0.013
53 539.0	0.125 ± 0.007	0.321 ± 0.009	0.176 ± 0.015	0.217 ± 0.012
53 568.0	0.132 ± 0.008	0.342 ± 0.009	0.121 ± 0.011	0.215 ± 0.013
53 599.0	0.117 ± 0.009	0.347 ± 0.011	0.151 ± 0.012	0.219 ± 0.014
53 620.0	0.113 ± 0.012	0.331 ± 0.022	0.157 ± 0.013	0.210 ± 0.017
53 662.0	0.117 ± 0.021	0.307 ± 0.019	0.187 ± 0.029	0.223 ± 0.024

Таблица 5. Показатели цвета $V-R$ и $V-I$ компонентов С и D квазара Q2237 + 0305, полученные по данным наблюдений на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в 2004–2005 гг.

JD–2450000	Компонент С		Компонент D	
	$V-R$	$V-I$	$V-R$	$V-I$
53 171.0	0.153 ± 0.019	0.341 ± 0.036	0.165 ± 0.023	0.322 ± 0.041
53 202.0	0.160 ± 0.011	0.331 ± 0.019	0.187 ± 0.014	0.352 ± 0.027
53 232.0	0.173 ± 0.012	0.320 ± 0.021	0.146 ± 0.013	0.317 ± 0.015
53 260.0	0.189 ± 0.023	0.345 ± 0.028	0.169 ± 0.016	0.340 ± 0.025
53 294.0	0.197 ± 0.024	0.371 ± 0.034	0.177 ± 0.017	0.371 ± 0.026
53 539.0	0.131 ± 0.037	0.349 ± 0.018	0.161 ± 0.015	0.393 ± 0.022
53 568.0	0.212 ± 0.016	0.396 ± 0.017	0.211 ± 0.010	0.404 ± 0.021
53 599.0	0.167 ± 0.017	0.399 ± 0.019	0.184 ± 0.016	0.395 ± 0.021
53 620.0	0.191 ± 0.015	0.402 ± 0.029	0.179 ± 0.014	0.391 ± 0.038
53 662.0	0.182 ± 0.027	0.398 ± 0.014	0.167 ± 0.024	0.401 ± 0.036

В 2004–2005 гг. произошло существенное увеличение яркости компонента с максимумом в мае 2005 г. В среднем звездная величина компонента В изменилась на 0.9^m . Продолжительность события составила ~ 300 дней. Наблюдения конца 2005 г. показали, что яркость компонента В не вернулась к уровню 2004 г. В 2004–2005 гг. происходило монотонное увеличение яркости компонента В. Новый сезон наблюдений объекта в 2005 г. начался сразу после того, как яркость компонента достигла максимального значения. Яркость компонентов С и D незначительно изменилась за рассматриваемый период.

Значительные изменения яркости одного из компонентов системы могут происходить при

прохождении вблизи или пересечении источником каустики [21], что в наблюдаемых кривых блеска сопровождается увеличением звездной величины одного из компонентов квазара до значительных долей звездной величины. Кроме того, теоретические расчеты, проведенные в работе [22], показали, что вариации цвета при микролинзировании коррелируют с вариациями яркости. Для микролинзовых событий в компонентах А и С в 1999 г. отмечены значительные вариации цветов компонентов и тенденция компонентам быть голубее по мере увеличения яркости. В работе [5] представлены результаты измерений цветов всех четырех компонентов и их вариации на основе наблюдательных данных, полученных в 1995–2000 гг.

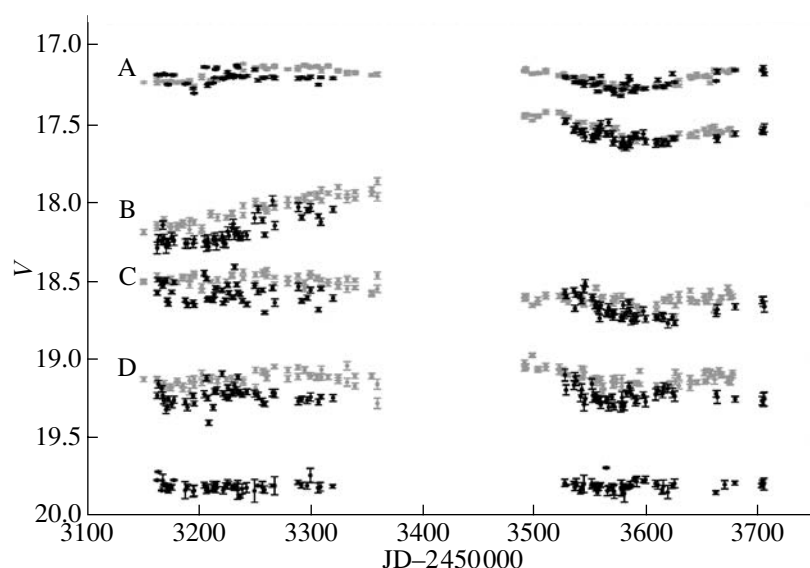


Рис. 2. Кривые блеска компонентов системы Q2237+0305 по данным наблюдений на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории в 2004–2005 гг. в фильтре V . Внизу приведена кривая блеска звезды сравнения. Серым цветом показаны кривые блеска компонентов, полученные группой OGLE в фильтре V за тот же период наблюдений.

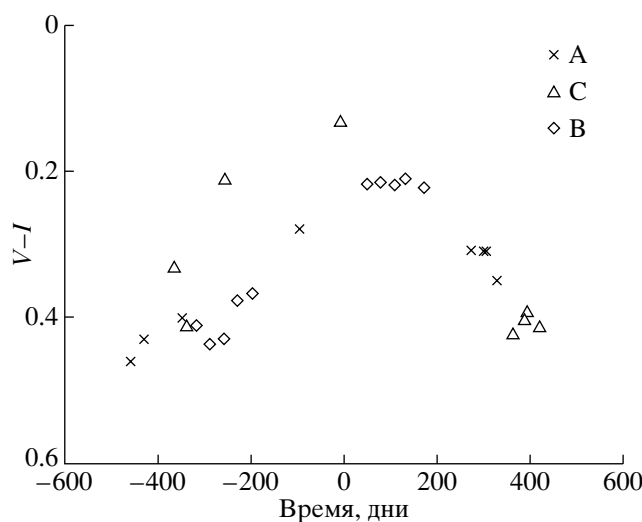


Рис. 3. Кривые показателей цвета $V-I$ для событий микролинзирования в компонентах А и С системы Q2237+0305 в 1999 г. и для пика в компоненте В этой системы в мае 2005 г. Кривые смещены по оси времени с максимумом в точке $t = 0$.

Анализ вариаций блеска и цвета компонентов выявил корреляцию между вариациями цвета $V-I$ и блеска компонентов.

Классификация микролинзового события в компоненте В системы возможна с помощью детального численного моделирования. Возможен также сравнительный анализ с уже наблюдавшимися событиями микролинзирования в компонентах А и С. Изменения среднего показателя цвета $V-I$ компонента В для каждого месяца наблюдений, проведенных в 2004–2005 гг., представлены на рис. 3. На рис. 3 показаны также вариации по-

казателей цвета для событий микролинзирования в компонентах А и С системы в 1999 г. Кривые смещены по оси времени с максимумом в точке $t = 0$. Изменение показателей цвета компонентов А и С приведено с 1997 по 2000 гг. [5]. Как видно из рис. 3, для компонента С наблюдалось симметричное относительно максимума изменение показателя цвета. Для кривой блеска также отмечена высокая степень симметрии, из-за чего данное событие в некоторых работах интерпретировалось как прохождение источника вблизи каспа каустики [23]. Напротив, микролинзовое событие в компоненте А

системы было интерпретировано как пересечение источником линии каустики [24]. Показатель цвета $V-I$ компонента А изменился на 0.15^m , в то время как звездная величина компонента — на 0.45^m . Показатель цвета не вернулся к значению на момент начала микролинзового события. Анализ наблюдений 2004–2005 гг. показал, что показатель цвета $V-I$ компонента В изменился на 0.2^m и не вернулся к значению осени 2004 г. Однако кривые блеска компонентов, построенные на основе дальнейших наблюдений системы, в том числе наблюдений 2006 г., выполненных группой OGLE [25], не дали подтверждения в пользу микролинзового события с пересечением каустики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами представлены результаты фотометрической обработки изображений гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 (табл. 3, 4, 5). Исходный наблюдательный материал был получен на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории. Для фотометрических измерений применен алгоритм, описанный в работе [15]. Все расчеты производились с использованием численной модели линзирующей галактики, полученной методом регуляризации в предположении близости распределения яркости галактики к аналитическому профилю [17, 18]. В результате получены новые данные по переменности компонентов гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 в трех фильтрах V , R и I за период 2004–2005 гг. Из анализа полученных кривых блеска следует, что за это время существенно изменилась яркость компонента В (на 0.9^m) с максимумом в мае 2005 г. Изменение яркости компонента сопровождалось также изменением цвета (табл. 4 и рис. 3).

Различие показателей цвета компонентов было обнаружено уже при первых многоцветных наблюдениях системы, выполненных в работе [10]. Позднее, в работах [2, 26] было отмечено изменение показателей цвета компонентов относительно первых многоцветных измерений. Результаты VRI -фотометрии по данным наблюдений на телескопе NOT [3] показали, что цвета пар компонентов (А, В) и (С, D) приблизительно одинаковы с разницей между парами в V -фильтре $\sim 0.6^m$. В дальнейшем в работах [11, 14] сообщалось, что компонент В стал самым голубым в системе по сравнению с первыми наблюдениями 1987 г. Попытка анализа цветовых изменений в системе Q2237+0305 сделана в работах [27, 28] по данным наблюдений в фильтрах V , R и I , выполненных на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории в 1997–1998 гг. Отмечены значительные вариации цветов компонентов и тенденция компонентов быть голубее по мере увеличения

яркости. Анализ накопленных многоцветных данных фотометрии за 1995–2000 гг., выполненный в работе [5], выявил наличие корреляции между цветовыми изменениями и изменениями звездной величины компонентов.

В настоящее время рассматриваются три основные причины, которые могут приводить к изменению показателей цвета компонентов гравитационно-линзовой системы: время запаздывания между сравниваемыми за одну эпоху кривыми блеска компонентов системы, поглощение в линзирующей галактике, микролинзирование на звездах линзирующей галактики. Времена запаздывания между компонентами системы Q2237+0305 порядка одного дня, поэтому вариации блеска источника должны проявляться почти одновременно во всех четырех компонентах. Первое упоминание о коррелированном изменении яркости компонентов было сделано в работе [3]. В 2003 г. наблюдалось коррелированное изменение яркости, по крайней мере, трех компонентов системы [29, 30]. Исходя из предположения о собственной переменности квазара в работе [30] сделана оценка времени запаздывания между вариациями в фильтре V и фильтре R . Однако полученные разными группами кривые блеска всех четырех компонентов наглядно демонстрируют, что для системы характерны вариации блеска, никак не коррелируемые между собой. Таким образом, основные изменения в системе вызваны микролинзированием на звездах линзирующей галактики. Поскольку наибольшая вероятность вариаций в системе связана именно с микролинзированием, анализ событий микролинзирования, по-видимому, является единственным способом исследования источника.

Так, многоцветные наблюдения системы во время событий микролинзирования с большим усилением позволяют оценить размер излучающей области квазара в разных длинах волн [22]. Модельные расчеты на основе данных события микролинзирования в компоненте А системы 1999 г., полученных группой OGLE [32], и верхний предел на трансверсальные скорости в галактике [31] позволили получить ограничения на размеры источника в V - и R -диапазонах. Применение метода непараметрического восстановления источника к наблюдательным данным события микролинзирования в компоненте А позволило получить профиль распределения яркости источника [33].

Еще одной возможной причиной вариаций блеска компонентов является поглощение в линзирующей галактике [34]. При этом и изменение поглощения в галактике, и эффекты микролинзирования приводят к изменению цвета компонентов системы со временем. Разделение между двумя этими

причинами изменения цветов компонентов представляет весьма трудную задачу. Для исследования и разделения двух причин изменения показателей цвета компонентов необходимы регулярные многоцветные наблюдения системы.

Данная работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2637.2006.2 и Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 05-01-00049, 05-02-16454 и 06-02-16857).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Huchra, M. Gorenstein, S. Kent, *et al.*, *Astron. J.* **90**, 691 (1985).
2. R. T. Corrigan, M. J. Irwin, J. Arnaud, *et al.*, *Astron. J.* **102**, 34 (1991).
3. R. Østensen, S. Refsdal, R. Stabell, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **309**, 59 (1996).
4. D. Alcalde, E. Mediavilla, O. Moreau, *et al.*, *Astrophys. J.* **572**, 729 (2002).
5. V. G. Vakulik, R. E. Schild, V. N. Dudinov, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **420**, 447 (2004).
6. E. Koptelova, E. Shimanovskaya, B. Artamonov, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **356**, 323 (2005).
7. M. J. Irwin, R. L. Webster, P. C. Hewett, *et al.*, *Astrophys. J.* **98**, 1989 (1989).
8. P. R. Wozniak, C. Alard, A. Udalski, *et al.*, *Astrophys. J.* **529**, 88 (2000).
9. P. R. Wozniak, A. Udalski, M. Szymanski, *et al.*, *Astrophys. J. (Letters)* **540**, L65 (2000).
10. H. K. C. Yee, *Astron. J.* **95**, 1331 (1988).
11. I. Burud, R. Stabell, P. Magain, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **339**, 701 (1998).
12. P. Magain, F. Courbin, and S. Sohy, *Astrophys. J.* **494**, 472 (1998).
13. C. Alard and R. H. Lupton, *Astrophys. J.* **503**, 325 (1998).
14. V. G. Vakulic, V. N. Dudinov, A. P. Zheleznyak, *et al.*, *Astron. Nachr.* **318**, 73 (1997).
15. Е. Коптелова, Е. В. Шимановская, Б. П. Артамонов и др., *Астрон. журн.* **81**, 1 (2004).
16. А. Белокуров, Е. В. Шимановская, М. В. Сажин и др., *Астрон. журн.* **78**, 876 (2001).
17. E. Koptelova, E. Shimanovskaya, B. Artamonov, *et al.*, in: *Gravitational lensing: a unique tool for cosmology*, eds D. Valls-Gabaud, J. P. Kneib, ASP Conf. Ser. **326**, 45 (2003); astro-ph/0311508.
18. A. Yagola, B. Artamonov, V. Belokurov, *et al.*, in: *Inverse Problems in Engineering Mechanics IV*, Proc. Intern. Symp., ed. M. Tanaka (Elsevier, 2003).
19. J. A. Hogbom, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **15**, 417 (1974).
20. Østensen R., Candidata Scientiarum Thesis (University of Tromsø, 1994).
21. А. Ф. Захаров, *Гравитационные линзы и микролинзы* (Янус-К, М., 1997).
22. J. Wambsganss and B. Paczinski, *Astrophys. J.* **102**, 864 (1991).
23. J. S. B. Wyithe, R. L. Webster, and E. L. Turner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **315**, 51 (2000).
24. R. Gil-Merino, J. González-Cadelo, L. J. Goicoechea, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **371**, 1478 (2006); astro-ph/0607162.
25. A. Udalski, M. K. Szymański, and M. Kubiak, *et al.*, astro-ph/0701300v1 (2007).
26. H. W. Rix, D. P. Schneider, and J. N. Bachall, *Astron. J.* **104**, 959 (1992).
27. В. Н. Дудинов, В. Г. Вакулик, А. П. Железняк и др., *Кинемат. и физ. небесн. тел* **16**, 346 (2000).
28. В. Н. Дудинов, П. Блюх, П. Пачинский и др., *Кинемат. и физ. небесн. тел* **3**, 170 (2000).
29. V. Vakulik, R. Schild, V. Dudinov, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **447**, 905 (2006).
30. E. Koptelova, V. Oknyanskij, E. Shimanovskaya, *Astron. and Astrophys.* **552**, 37 (2006).
31. J. S. B. Wyithe, R. L. Webster, and E. L. Turner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **309**, 261 (1999).
32. V. N. Shalyapin, L. J. Goicoechea, D. Alcalde, *et al.*, *Astrophys. J.* **579**, 127 (2002).
33. М. Б. Богданов, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **79**, 8 (2002).
34. D. Nadeau, H. K. C. Yee, W. J. Forrest, *et al.*, *Astrophys. J.* **376**, 430 (1991).

THE GRAVITATIONAL LENS Q2237+0305: REDUCTION AND ANALYSIS OF THE OBSERVATIONAL DATA

**E. A. Koptelova, B. P. Artamonov, E. V. Shimanovskaya, V. V. Bruevich,
A. S. Gusev, and O. V. Ezhkova**

The results of *VRI* photometry of the gravitationally lensed system Q2237+0305 carried out on the 1.5-m telescope of the Maidanak Observatory in 2004–2005 are presented. The method used to reduce the observational data is described in detail. An analysis of the brightness and color variations of the system's components is presented.