

УДК 524.7-56:520.82

# КРИВЫЕ БЛЕСКА ЛИНЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ В ДВОЙНЫХ ГРАВИТАЦИОННО-ЛИНЗИРОВАННЫХ КВАЗАРАХ SDSS J2124+1632 И SDSS J0806+2006

© 2024 Д. Х. Беков<sup>1</sup>, Т. А. Ахунов<sup>1,2\*</sup>, О. А. Бурхонов<sup>2</sup>, Н. Р. Алимова<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, 100174 Узбекистан<sup>2</sup>Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, 100052 Узбекистан

Поступила в редакцию 8 августа 2023 года; после доработки 4 сентября 2023 года; принята к публикации 4 сентября 2023 года

В статье представлены результаты многолетнего фотометрического мониторинга двух двойных гравитационно-линзированных квазаров, SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006, проводившегося в Майданакской обсерватории в 2017–2022 гг. Проанализированы полученные кривые блеска линзированных компонентов обеих систем. Переменность SDSS J2124+1632 оказалась достаточно большой: до  $0^m50$  для системы в целом и до  $0^m75$  для компонента А. Найдено долговременное микролинзирование на фоне общего увеличения видимого блеска источника-квазара. Изменения блеска в SDSS J0806+2006 менее интенсивны: размах около  $0^m20$  для системы в целом, а у обоих компонентов — до  $0^m25$ . Анализ кривых блеска не показал здесь наличия микролинзирования. Также мы вычислили вероятные значения времени задержки:  $\Delta t_{AB} = 102 \pm 20$  дней (компонент В лидирует) и  $\Delta t_{AB} = -53.0 \pm 6.0$  дней (с лидированием компонента А) в SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006 соответственно. Величина  $\Delta t_{AB}$  для SDSS J2124+1632 согласуется с ранее найденными временными задержками для двойных гравитационно-линзированных систем. В случае второй системы время задержки совпадает с более ранними теоретическими расчетами, согласно которым предполагалось, что время задержки должно быть около 50 дней.

Ключевые слова: микролинзирование — квазары: отдельные: SDSS J2124+1632, SDSS J080623.70+200631.9

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение гравитационно-линзирования стало одним из мощных инструментов при решении астрофизических задач различного масштаба: от малых областей вокруг компактных объектов в нашей и других галактиках вплоть до космологических расстояний. Особое место среди широкого класса гравитационно-линзированных систем занимают гравитационно-линзированные квазары (ГЛК). Информация о конфигурации линзированных систем, временные задержки в них, микролинзирование и многие другие сведения позволяют нам изучать тонкую подструктуру, распределение массы и эволюцию линзирующих галактик. Например, время задержки между линзированными компонентами используется для определения постоянной Хаббла — важнейшего космологического параметра при определении размера, возраста и критической плотности Вселенной (Refsdal, 1964; Schneider

et al., 1992). Если учесть, что между оценками постоянной Хаббла по наблюдениям объектов ранней и поздней Вселенной есть существенная разница, то независимые ее измерения на примере квазаров с разными красными смещениями становятся особенно актуальными (Verde et al., 2019).

В последние годы число новых обнаруженных ГЛК в проектах GRAL, Gaia, SDSS и др. постоянно увеличивается (Lemon et al., 2018, 2019, 2022; Stern et al., 2021; Chan et al., 2022). При этом возрастает необходимость непрерывных мониторинговых наблюдений избранных ГЛК и фотометрической обработки этих данных с целью определения для исследуемых объектов времени задержки.

В этой статье представлены результаты фотометрического мониторинга двойных ГЛК, SDSS J2124+1632<sup>1</sup> и SDSS J0806+2006 (SDSS J080623.70+200631.8), который проводился в 2017–2022 годах в Майданакской обсерватории.

\*E-mail: t. axunov@nuu.uz

<sup>1</sup>Название условное. В базе данных NED объект может быть найден как WISE J2124+1632:[DWK2018]G.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

*SDSS J2124+1632*. Объект открыт относительно недавно, о чем сообщалось в статье Lemon et al. (2018). Авторы цитируемой работы спектроскопически подтвердили 24 новых линзированных квазара, обнаруженных космической обсерваторией Gaia, а также вычислили их предварительные характеристики.

Система J2124+1632 ( $\alpha_{2000} = 321^{\circ}07029$ ,  $\delta_{2000} = 16^{\circ}53841$  (Lemon et al., 2018)) состоит из двух линзированных изображений квазара с красным смещением  $z_q = 1.28$ , угловое расстояние между которыми  $\theta = 3''.02$  (рис. 1а). На момент открытия их видимый блеск составлял  $m_A = 18^m.11$  и  $m_B = 18^m.40$  соответственно. Из-за того, что изображение галактики расположено очень близко к компоненту В, измерить блеск галактики и ее красное смещение не удалось. Однако на основе внешнего вида системы были проведены модельные расчеты сингулярной изотермической сферы. В итоге было получено, что радиус кольца Эйнштейна  $b = 1''.41$ , позиционный угол  $PA = 176^{\circ}$ , отношение осей  $q = 0.39$ , а усиление блеска  $\mu = 2.7$ . Заметим, что величины ошибок измерения каждого из этих параметров сопоставимы с самой величиной. О других публикациях об этом объекте нам неизвестно.

*SDSS J0806+2006*. Этот двойной ГЛК был открыт в 2006 году в результате анализа данных SDSS (Inada et al., 2006). Координаты объекта  $\alpha = 121^{\circ}59875$ ,  $\delta = 20^{\circ}108861$ . Красное смещение источника-квазара  $z_q = 1.54$ , угловое расстояние между двумя линзированными изображениями  $\theta = 1''.4$  (рис. 1б). На момент открытия видимый блеск компонентов в *R*-фильтре составлял  $m_A = 18^m.93$  и  $m_B = 19^m.36$ . Между мнимыми компонентами находится линзирующая галактика, видимый блеск которой достаточно слабый ( $m_G = 21^m.20$ ). Из-за этого ее поток не дает заметного вклада в измерение звездных величин компонентов и им можно пренебречь, как было ранее в случаях других двойных ГЛК (см., например, Gaynullina et al., 2005; Akhupov et al., 2007).

Спектроскопия и наблюдения в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах показали, что изображения квазара имеют одинаковое красное смещение, а между ними находится протяженный объект, который, вероятно, является линзирующей галактикой с красным смещением  $z_l = 0.573$  (Inada et al., 2006; Sluse et al., 2012). В поле около SDSS J0806+2006 есть несколько близких галактик, которые могут существенно возмущать систему.

Inada et al., (2006) и Sluse et al. (2012) провели также модельные расчеты на основе сингулярного изотермического эллипсоида (a singular isothermal

ellipsoid — SIE — model). В результате было получено, что радиус кольца Эйнштейна, позиционный угол, отношение осей, усиление блеска равны  $b = 0''.69$ ,  $PA = 28^{\circ}$ ,  $q = 0.08$  и  $\mu = 4.62$  соответственно. Более того, в рамках модели была вычислена величина времени задержки:  $\Delta t_{AB} \sim 32 h^{-1}$  дней.

Этот объект привлек внимание и Sluse et al. (2008), которые по оптическому спектру определили, что на непрерывном участке отношение потоков  $A/B = 1.3$ , а в линиях ионизированного магния  $A/B = 2.2$ . Также, основываясь на инфракрасных данных телескопа VLT, с той же моделью SIE Sluse et al. (2008) получили теоретическую величину времени задержки:  $\Delta t_{AB} \approx 50$  дней.

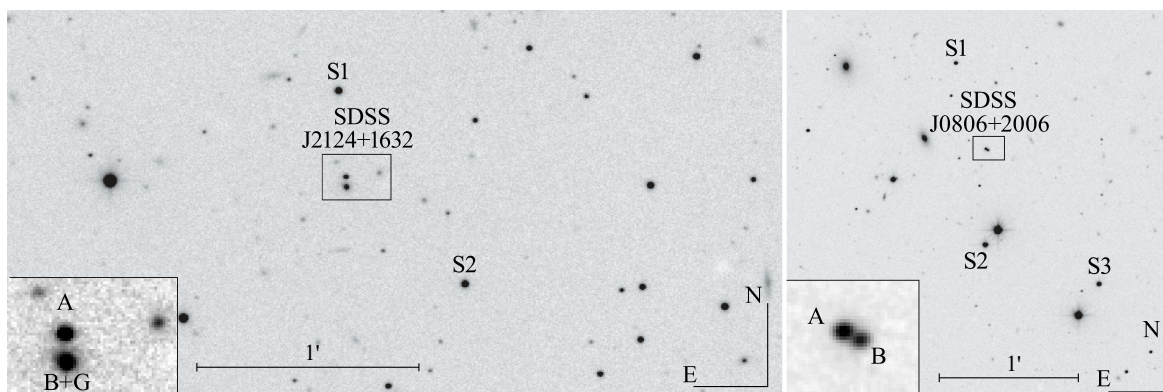
## 3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Наблюдения квазаров SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006 (см. рис. 1) проводились в период с 2017 по 2022 год в ходе мониторинга линзированных квазаров в Майданакской обсерватории (Ehgamberdiev et al., 2000; Artamonov et al., 2010; Tillaev et al., 2023). Цифровые изображения в фильтре *R* получены на 1.5-м телескопе АЗТ-22 с ПЗС-камерой SNUCAM формата  $4096 \times 4096$ , с масштабом  $0''.268$  на пиксель и полем зрения  $18'.1 \times 18'.1$ . Мы получали в среднем пять кадров за ночь со временем одиночной экспозиции 180 с. Сведения о данных наблюдениях приведены в таблице 1.

Мониторинг охватывает шесть наблюдательных сезонов, включая 250 наблюдательных ночей в случае SDSS J2124+1632 и 129 ночей для SDSS J0806+2006, причем все данные получены в *R*-фильтре. Каждая наблюдательная точка есть результат усреднения комбинации всех кадров, полученных в течение соответствующей ночи. В ходе анализа данных мы исключили из дальнейшего рассмотрения данные ночей с плохими наблюдательными условиями. Для SDSS J2124+1632 пороговыми мы приняли качество изображения хуже  $1''.55$  и яркость фона неба более 3000 ADU/пиксель. В случае SDSS J0806+2006 требования были более жесткими — качество изображения  $1''.4$  и фон неба более 2000 ADU/пиксель. В итоге осталось 218 и 98 ночей для SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006 соответственно.

## 4. ОБРАБОТКА ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ И КРИВЫЕ БЛЕСКА

*SDSS J2124+1632*. Фотометрическая обработка и измерение видимого блеска системы в целом



**Рис. 1.** Изображения ГЛК SDSS J2124+1632 (а) и SDSS J0806+2006 (б) по наблюдениям в Майданакской обсерватории на телескопе АЗТ-22 в  $R$ -фильтре. Масштаб изображения  $0''.268$  на пиксель. Прямоугольник выделяет врезку, показанную в нижнем левом углу каждой панели в большем масштабе. Метки S1–S3 соответствуют опорным звездам — стандартам поля. Буквами на крупномасштабных врезках обозначены компоненты систем А и В; G — галактика-линза.

**Таблица 1.** Сведения о наблюдательных данных по двум ГЛК, SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006, полученные в 2017–2022 гг. В скобках указано число ночей после отбора данных по критериям соответствия качеству (см. подробнее в тексте)

Сезон	SDSS J2124+1632		SDSS J0806+2006	
	Даты, дд/мм	Число ночей	Даты, дд/мм	Число ночей
2017	—	—	25/01–21/11	15 (14)
2018	21/05–22/10	55 (49)	17/01–14/12	19 (16)
2019	07/05–12/11	53 (45)	05/01–01/12	37 (28)
2020	22/05–10/11	54 (45)	08/01–25/11	31 (22)
2021	27/04–16/10	50 (45)	11/02–16/12	18 (13)
2022	02/06–07/10	38 (34)	29/03–06/10	9 (5)

и компонентов по отдельности проводились с помощью программ IRAF<sup>2</sup>. Линзирующая галактика слабая, однако она расположена достаточно близко к компоненту В, что привело к большому разбросу измеренных звездных величин (см. далее).

На первом этапе мы получили кривую блеска системы в целом (рис. 2). Она оказалась очень многообещающей. Видно, что источник-квазар демонстрирует заметные изменения блеска, связанные, скорее всего, с его внутренней переменностью. В самом начале наблюдений, в 2018 году, блеск квазара находился на самом нижнем уровне и в тот год не менялся. Начиная со следующего сезона блеск системы стал резко расти и к концу сезона 2021 года увеличился примерно на  $0^m.50$ , а потом началось его постепенное снижение.

Такое значительное изменение общего блеска источника-квазара объясняется, по-видимому,

<sup>2</sup>IRAF распространяется Национальной оптической астрономической обсерваторией, которая управляется AURA по соглашению о сотрудничестве с Национальным научным фондом.

тем, что мы имеем дело не только с внутренней переменностью квазара (например, вследствие прецессионного движения оси вращения), но и с активным микролинзированием. В связи с этим интересно было посмотреть на поведение компонентов по отдельности. Фотометрическая подгонка функции рассеяния точки (ФРТ) к нашим изображениям осуществлялась функцией Моффата с показателем степени 2.5. Соответствующие параметры рассчитывались на основе звезд S1 и S2 (рис. 1). Детали фотометрической обработки изображений в тесных полях можно найти в работах Stetson et al. (1990), Akhunov et al. (2007), Asfandiyarov et al. (2020).

Применив фотометрический метод подгонки ФРТ, мы получили кривые блеска компонентов А и В (рис. 3). Для компонента А кривая блеска показана на рисунке со смещением вверх по оси относительной звездной величины на  $-0^m.2$ , чтобы избежать наложения и смешения двух наборов данных в первый сезон 2018 года. Поведение блеска компонентов повторяет изменения блеска

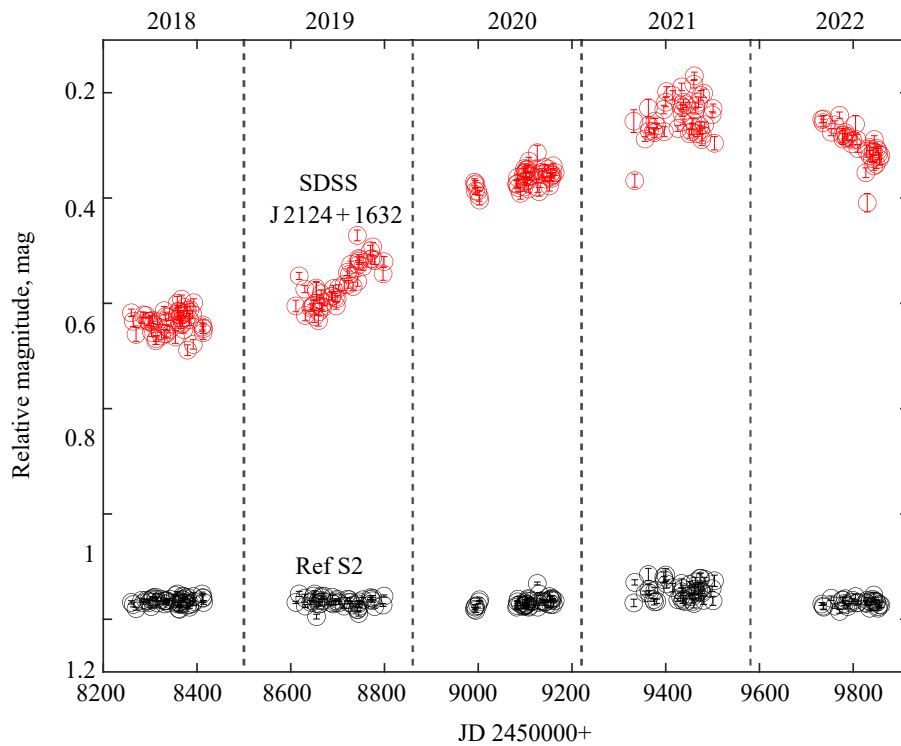


Рис. 2. Кривые блеска ГЛК SDSS J2124+1632 в целом и опорной звезды-стандарта S2 в  $R$ -полосе в 2018–2022 гг.

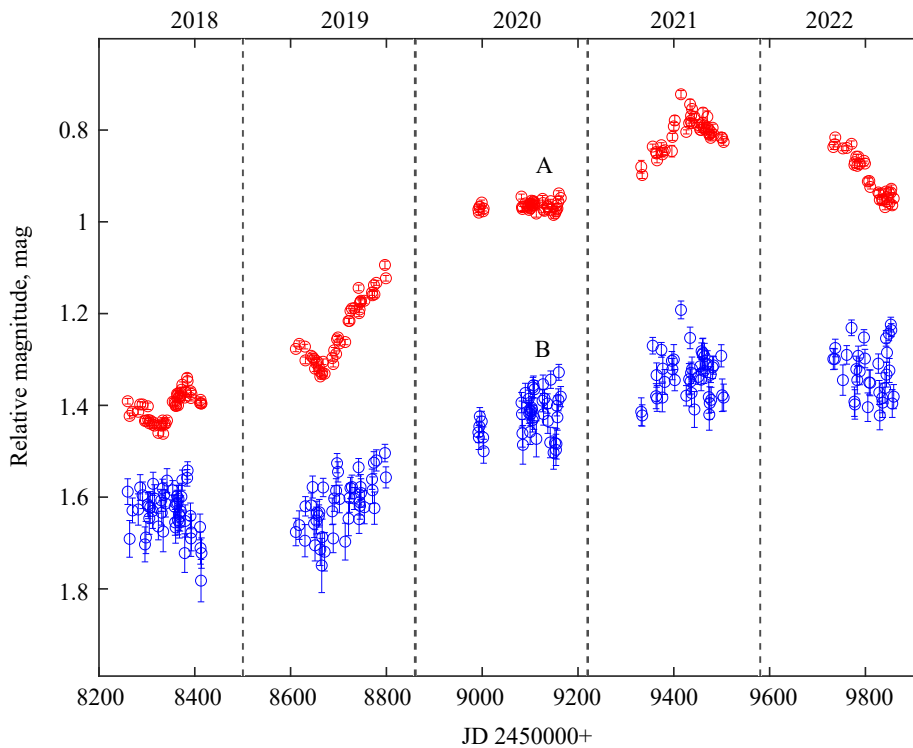


Рис. 3. Кривая блеска линзированных компонентов А и В ГЛК SDSS J2124+1632 в течение наблюдательных сезонов 2018–2022 гг.

системы в целом — в течение 2019–2021 гг. блеск непрерывно увеличивается, а с 2022 года начинается его постепенное снижение. Однако в деталях между ними есть отличия — темп увеличения

блеска у двух компонентов разный. Так, если блеск компонента А увеличился примерно на  $0^{\text{m}}70$ , то у компонента В этот показатель близок к  $0^{\text{m}}45$ . Подобные изменения явно указывают на долгопе-

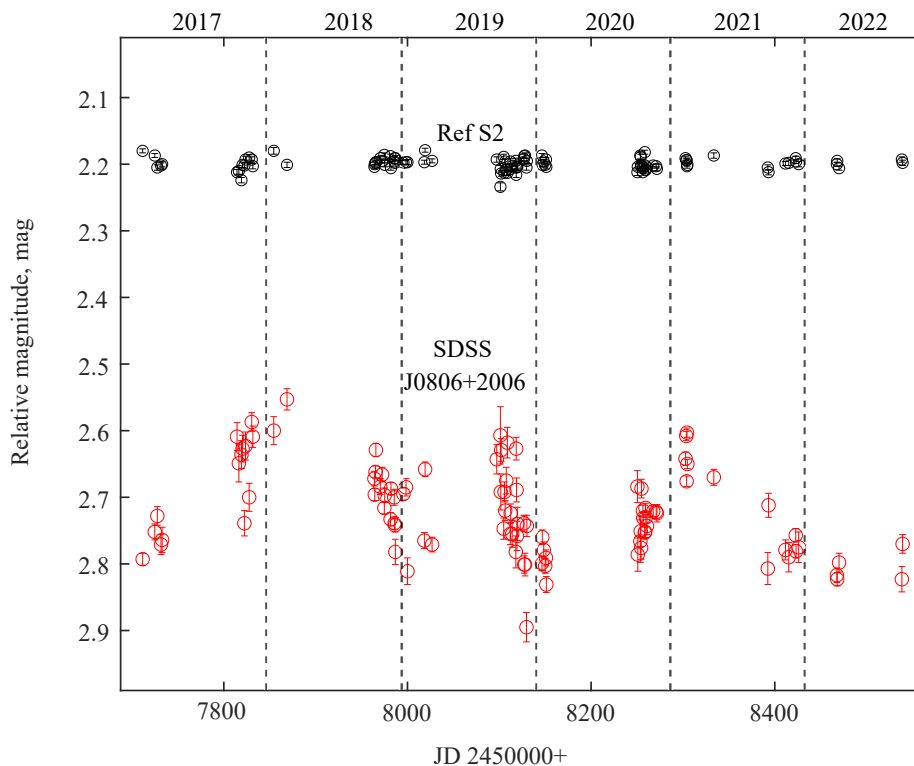


Рис. 4. Относительные кривые блеска квазара SDSS J0806+2006 в целом и опорной звезды S2 в период 2017–2022.

риодическое событие микролинзирования. Такое явление наблюдалось ранее и в других двойных ГЛК, например в SBS 0909+532, SBS 1520+530 (Gaynullina et al., 2005; Wickramasinghe et al., 2005; Ullán et al., 2006).

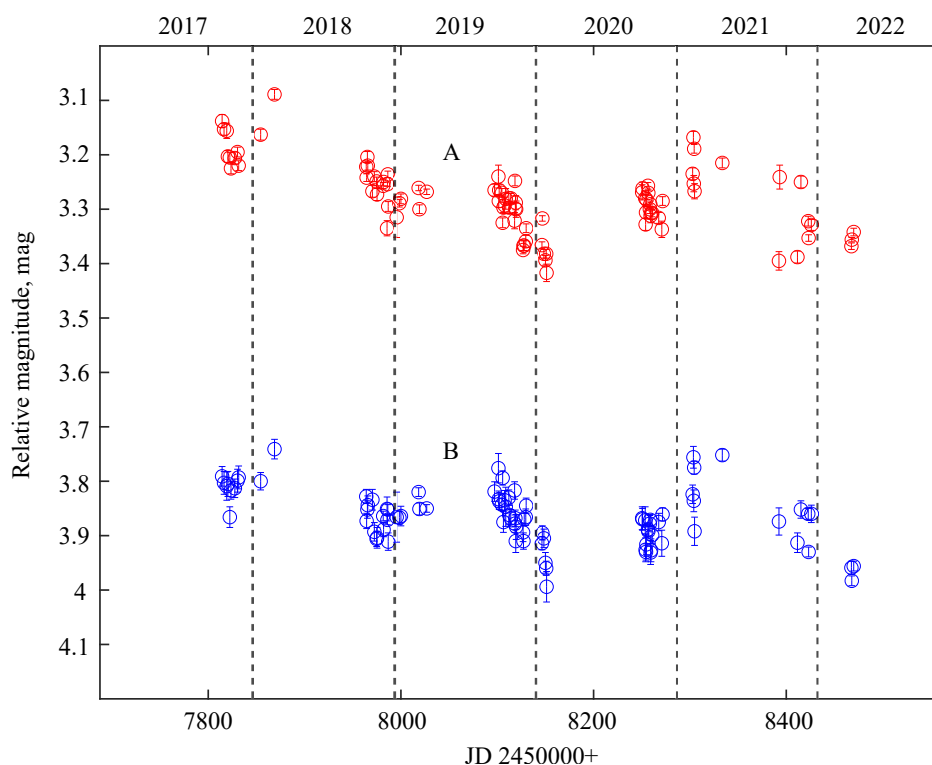
*SDSS J0806+2006.* Здесь также измерения видимого блеска компонентов А и В проводились в среде программ IRAF. Между компонентами находится протяженная линзирующая галактика, но из-за слабости ее потока вклад галактики несущественный и мы его отдельно не учитывали.

Прежде всего мы получили кривую блеска системы в целом. Она представлена на рис. 4, где также показана относительная кривая блеска опорной звезды, которая примерно на  $2^m 50$  ярче нашего объекта (на графике данная кривая смещена вниз на  $2^m 0$ ). Блеск самого квазара меняется незначительно, попеременно относительно сезонов с размахом до  $0^m 20$ . Большой разброс измерений объясняется относительной слабостью системы. Явных признаков микролинзирования здесь не видно. Однако это положение позволит нам более точно вычислить наиболее вероятное значение времени задержки между компонентами. Применяв тот же подход, что и в предыдущем случае, мы получили кривые блеска А- и В-компонентов ГЛК SDSS J0806+2006 (рис. 5). Поведение блеска компонентов не отличается от изменений блеска системы в целом — в течение 2017–2022 гг.

размах изменений блеска компонентов составляет примерно  $0^m 25$ . Следует отметить, что компоненты меняют свой блеск почти синхронно друг с другом. А значит, время задержки в этой системе должно быть относительно небольшим (см. также работы Inada et al. (2006); Sluse et al. (2008)) и влияние микролинзирования практически не сказывается.

## 5. ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ И МИКРОЛИНЗИРОВАНИЕ

*SDSS J2124+1632.* Взяв за основу кривые блеска линзированных изображений SDSS J2124+1632, мы провели измерение параметра времени задержки в этой системе. При этом мы использовали два метода: стандартную минимизацию  $\chi^2$  и формулы Пельта (Pelt et al., 1996; Gil-Merino et al., 2002). Из-за постоянного влияния микролинзирования разница видимого блеска компонентов от сезона к сезону меняется, поэтому для определения величины времени задержки каждый сезон мы рассматривали по отдельности. Кроме того, с целью минимизации различного рода факторов, влияющих на измерения звездных величин и приводящих к значительному рассеянию точек (что особенно заметно на кривой блеска компонента В), мы провели медианное сглаживание фотометрических точек (см., например, Akhupov et al., 2017).



**Рис. 5.** Кривая блеска линзированных компонентов А и В ГЛК SDSS J0806+2006 в течение наблюдательных сезонов 2017–2022 гг.

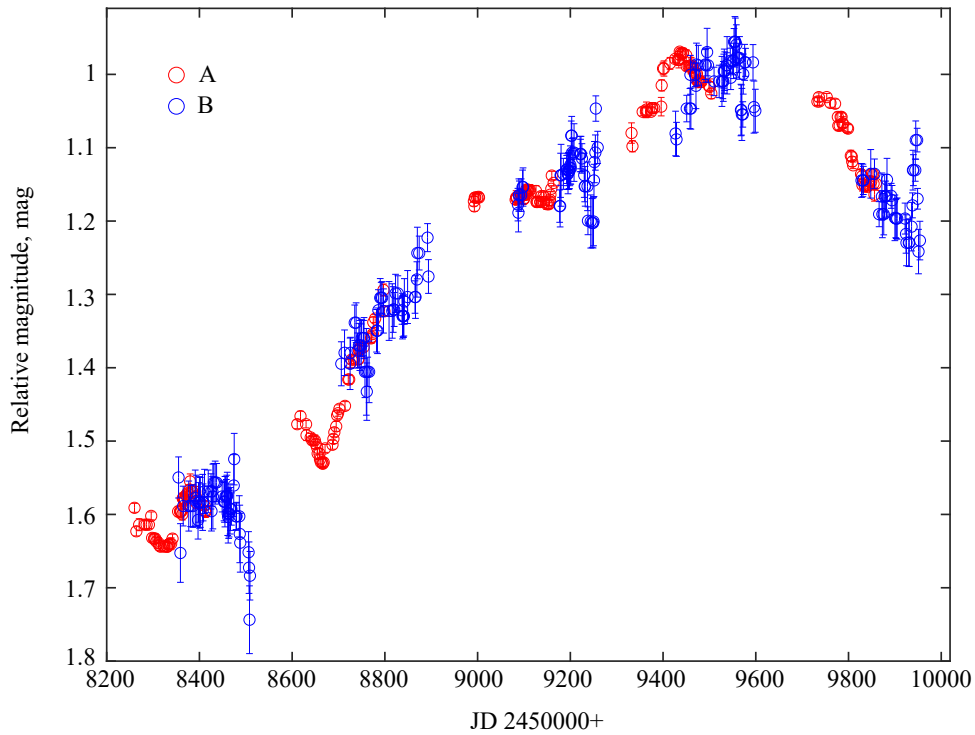
В результате вычисления времени задержки на основе искусственных кривых блеска, которые генерировались способом Монте-Карло, для каждого метода мы получили по 10 вероятных значений времени задержки. Самое главное отличие состояло в том, что некоторые из них были положительными, а некоторые — отрицательными. Положительные значения соответствуют тому, что лидирующим будет компонент В, при отрицательном же значении, наоборот, — компонент А. Руководствуясь этими величинами, мы и выбрали критерий согласованности: наиболее правдоподобным мы будем считать тот вариант, при котором получается большее количество одноименных значений, а окончательное значение времени задержки — определять как среднее всех величин, полученных данным методом. Лучшие результаты, в соответствии с таким критерием, дал метод  $\chi^2$ , при котором в подавляющем числе случаев мы имеем положительные значения времени задержки. Среднее для них оказалось равным  $\Delta t_{AB} = 103 \pm 20$  (рис. 6). Относительно большое значение ошибки измерения объясняется, с одной стороны, большим разбросом фотометрических точек для компонента В, а с другой — большим перерывом между наблюдательными сезонами.

На рис. 6 приведена комбинированная кривая блеска источника в ГЛК SDSS J2124+1632. Видно, что система с 2019 года находится в стадии

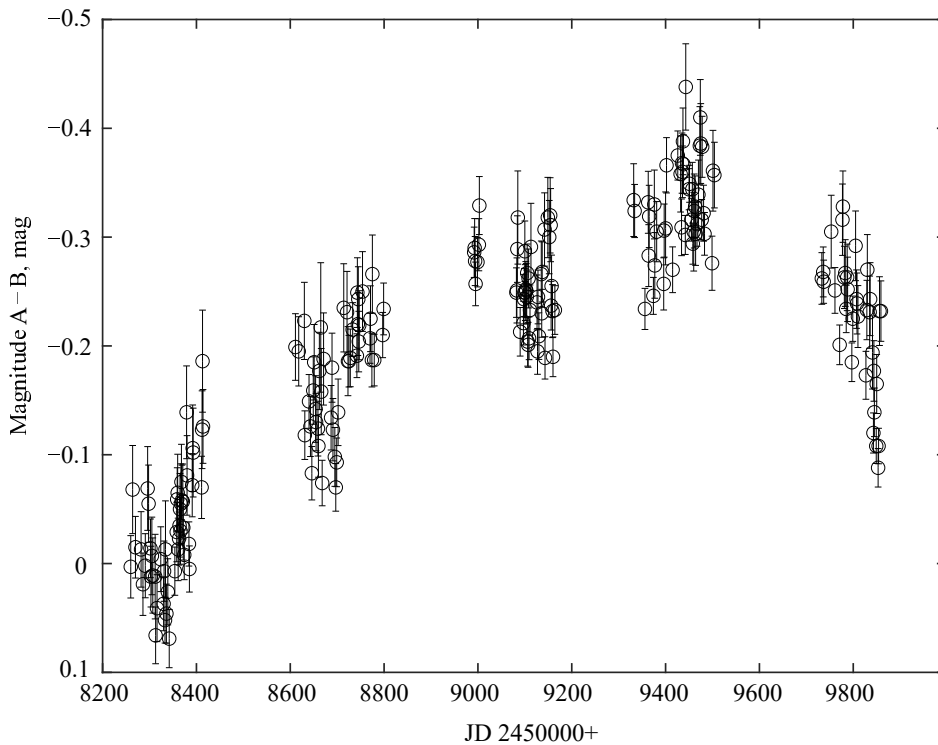
увеличения блеска, которое можно объяснить совпадением эффекта микролинзирования в компоненте А с процессами в самом источнике-квазаре. Скорее всего, здесь мы имеем дело с явлением долгопериодического микролинзирования, которое наблюдается в некоторых двойных ГЛК (Pelt et al., 1996; Gil-Merino et al., 2002; Gaynullina et al., 2005; Wickramasinghe et al., 2005; Ullán et al., 2006).

В отличие от ситуации с временем задержки, для разницы звездных величин двух компонентов все оказалось проще. Все методы и подходы для каждого наблюдательного сезона дали совпадающие результаты. При этом разница блеска компонентов, как мы и ожидали, меняется от сезона к сезону: в среднем, в 2018 г.  $\Delta m_{AB} = -0^m.0384$ ; в 2019 г.  $\Delta m_{AB} = -0^m.2814$ ; в 2020 г.  $\Delta m_{AB} = -0^m.2814$ ; в 2021 г.  $\Delta m_{AB} = -0^m.3339$  и в 2022 г.  $\Delta m_{AB} = -0^m.1544$ . На рис. 7 показано, что в течение наблюдательных сезонов 2018–2021 гг. разница звездных величин линзированных компонентов А и В постоянно возрастает, а в последнем сезоне стремится к первоначальному уровню. Такое поведение можно объяснить, скорее всего, тем, что излучение компонента А испытывало влияние микролинзирования с максимумом в 2021 г.

*SDSS J0806+2006.* Взяв за основу полученные нами кривые блеска линзированных компонентов SDSS J0806+2006, мы измерили время задержки



**Рис. 6.** Восстановленная кривая блеска источника-кварзара SDSS J2124+1632 с учетом времени задержки и разницы звездных величин между компонентами.



**Рис. 7.** Изменение разницы звездных величин компонентов А и В ГЛК SDSS J2124+1632 вследствие микролинзирования.

между изменениями их видимого блеска. Этот случай отличается от предыдущего тем, что здесь мы имеем всего лишь по 15–20 наблюдений в сезон (с октября по март), практически отсутствует мик-

ролинзирование и блеск компонентов изменяется равномерно. С учетом этого мы решили применить несколько иной подход, заключающийся в следующем: сдвигая кривую блеска компонента В как

по оси времени, так и по оси звездных величин, образуем объединенную кривую блеска и затем получаем путем интерполяции, например полиномами, сглаженную кривую блеска. Соответствие между данными наблюдений и сглаженной кривой вычисляем с помощью известной формулы:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(m_{AB, \text{obs}, i} - m_{AB, \text{calc}, i})^2}{\sigma_{AB, i}^2}, \quad (1)$$

где  $N$  — число данных наблюдений,  $\sigma_{AB, i}^2$  — среднеквадратичные ошибки измерений звездных величин компонентов А и В,  $m_{AB, \text{obs}}$  — наблюдаемый блеск соответствующих компонентов,  $m_{AB, \text{calc}}$  — интерполированная последовательность этих величин. Причем

$$m_{AB, \text{calc}, i} = \sum_{j=0}^K a_j t_i^j. \quad (2)$$

При вычислении мы отбросили данные начальной и конечной эпох наблюдений, где очень мало точек. Искомыми параметрами являются время задержки  $\Delta t$ , разница звездных величин компонентов  $\Delta m$  и полиномы  $a_j$ . Те параметры, что соответствуют наименьшему значению  $\chi^2$ , приравниваются к искомым величинам. Число многочленов в выражении (2) мы задали  $K = 6$ . Для выяснения степени достоверности времени задержки методом Монте-Карло мы сгенерировали 10 000 искусственных кривых блеска для обоих линзированных компонентов и применили к ним описанный метод. На рис. 8 показано, что наиболее вероятное значение времени задержки между двумя компонентами равно  $\Delta t_{AB} = -53.0 \pm 6$  дням (лидирует компонент А), а разница их звездных величин составляет  $\Delta m = 0^m 587 \pm 0^m 0008$  (рис. 9).

На рис. 10 показана обобщенная кривая блеска источника в ГЛК SDSS J0806+2006. Видно, что система с 2017 года претерпевает периодические изменения. Этот период приблизительно равен трем годам, если обратить внимание на два последовательных увеличения блеска примерно в  $JD = 8140$  и  $JD = 9240$ . В течение всех наблюдательных сезонов разница звездных величин компонентов А и В не меняется, что позволяет нам утверждать об отсутствии в этой системе влияния микролинзирования.

Этим данный объект напоминает другой двойной ГЛК UM 673 (Akhunov et al., 2007; Koptelova et al., 2012), где в течение более 10 лет не было зарегистрировано ни одного события микролинзирования. Поэтому и SDSS J0806+2006 и UM 673 удобны при моделировании системы для вычисления постоянной Хаббла либо определения красного смещения линзирующей галактики.

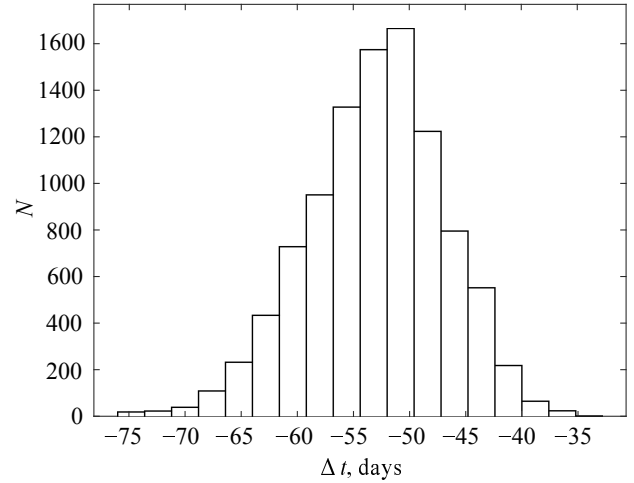


Рис. 8. Распределение вероятных значений времени задержки, полученное в результате применения алгоритма вычисления времени задержки к синтетическим кривым блеска.

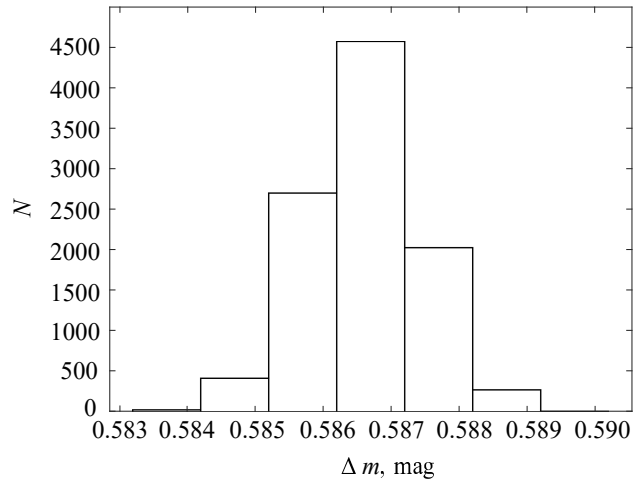
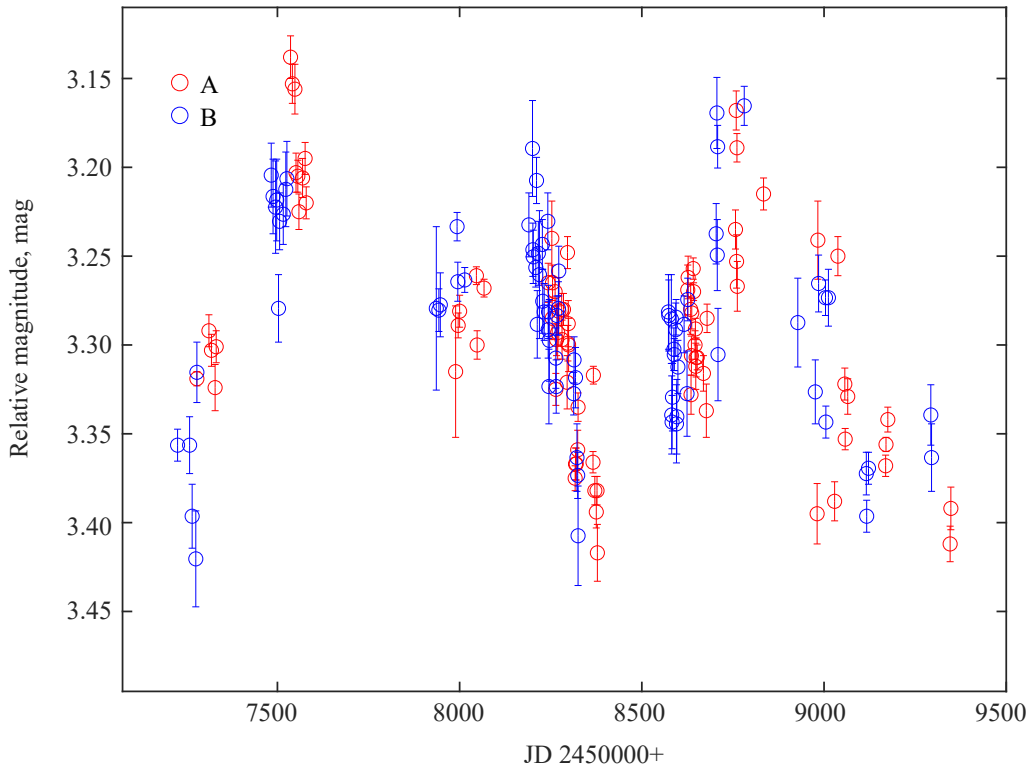


Рис. 9. Распределение разницы звездных величин компонентов.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты фотометрического исследования двойных ГЛК SDSS J2124+1632 и SDSS J0806+2006, которые наблюдались в Майданакской обсерватории в 2017–2022 гг. Представлены кривые блеска как обеих систем в целом, так и их отдельных компонентов.

Масштаб изменения блеска SDSS J2124+1632 оказался достаточно большим, до  $0^m 50$  для системы в целом, а блеск компонента А меняется до  $0^m 75$ . Наши данные указывают на то, что система испытывает влияние долгопериодического микролинзирования на фоне общего увеличения видимого блеска источника-кварара. Изменения блеска в ГЛК SDSS J0806+2006 менее интенсивны:



**Рис. 10.** Обобщенная кривая блеска источника-квазара SDSS J0806+2006 с учетом времени задержки и разницы блеска между двумя компонентами.

размах около  $0^m20$  звездных величин для системы в целом, а у обоих компонентов равен примерно  $0^m25$ . Анализ кривых блеска показал, что система не испытывает влияния микролинзирования.

Также мы вычислили вероятные значения времени задержки. В ГЛК SDSS J2124+1632  $\Delta t_{AB} = 102 \pm 20$  дней (компонент В лидирует). Эта величина согласуется с ранее найденными временными задержками для гравитационно-линзированных систем подобной конфигурации (Gaynullina et al., 2005; Ullán et al., 2006; Koptelova et al., 2012). А в ГЛК SDSS J0806+2006 время задержки оказалось равным  $\Delta t_{AB} = -53.0 \pm 6.0$  дней (здесь лидирует компонент А). Эта величина полностью согласуется с ранее найденными теоретическими предсказаниями времени задержки (Inada et al., 2006; Sluse et al., 2008), где предполагалось, что оно должно быть около 50 дней.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою глубокую признательность руководству и сотрудникам Астрономического института им. Улугбека (Узбекистан) за организацию многолетних наблюдений в Майданакской обсерватории, что позволило получить результаты данной статьи.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта FZ-20200929344, выделенного Министерством высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. A. Akhunov, S. N. Nuritdinov, A. Sergeev, and O. Burkhonov, *Uzbek Journal of Physics* **9**, 291 (2007).
2. T. A. Akhunov, O. Wertz, A. Elyiv, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 3607 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw2951
3. B. P. Artamonov, V. V. Bruevich, A. S. Gusev, et al., *Astronomy Reports* **54** (11), 1019 (2010). DOI:10.1134/S1063772910110077
4. I. M. Asfandiyarov, S. A. Ehgamberdiev, M. Millon, and F. Courbin, *Uzbek Journal of Physics* **22** (6), 325 (2020).
5. J. H. H. Chan, C. Lemon, F. Courbin, et al., *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A140 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142389

6. S. A. Ehgamberdiev, A. K. Baijumanov, S. P. Ilyasov, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **145**, 293 (2000). DOI:10.1051/aas:2000244
7. E. R. Gaynullina, R. W. Schmidt, T. Akhunov, et al., *Astron. and Astrophys.* **440**, 53 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20052852
8. R. Gil-Merino, L. Wisotzki, and J. Wambsganss, *Astron. and Astrophys.* **381**, 428 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20011523
9. N. Inada, M. Oguri, R. Becker, et al., *Astron. J.* **131**, 1934 (2006). DOI:10.1086/500591
10. E. Koptelova, W. P. Chen, T. Chiueh, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, id. A51 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201116645
11. C. Lemon, T. Anguita, M. Auger, et al., *arXiv e-prints astro-ph:2206.07714* (2022). DOI:10.48550/arXiv.2206.07714
12. C. A. Lemon, M. W. Auger, and R. G. McMahon, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, 4242 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty3366
13. C. A. Lemon, M. W. Auger, R. G. McMahon, and F. Ostrovski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 5060 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty911
14. J. Pelt, R. Kayser, S. Refsdal, and T. Schramm, *Astron. and Astrophys.* **305**, 97 (1996). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9501036
15. S. Refsdal, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **128**, 307 (1964). DOI:10.1093/mnras/128.4.307
16. P. Schneider, J. Ehlers, and E. E. Falco, *Gravitational Lenses, XIV* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992).
17. D. Sluse, F. Courbin, A. Eigenbrod, and G. Meylan, *Astron. and Astrophys.* **492**, L39 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:200810977
18. D. Sluse, D. Hutsemekers, F. Courbin, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, id. A62 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201219125
19. D. Stern, S. G. Djorgovski, A. Krone-Martins, et al., *Astrophys. J.* **921**, 42 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/ac0f04
20. P. B. Stetson, L. E. Davis, and D. R. Crabtree, *ASP Conf. Ser.* **8**, 289 (1990).
21. Y. A. Tillaev, A. Azimov, S. A. Ehgamberdiev, and S. Ilyasov, *Atmosphere* **14**, 10 (2023). DOI:10.3390/atmos14020199
22. A. Ullán, L. J. Goicoechea, A. P. Zheleznyak, et al., *Astron. and Astrophys.* **452**, 25 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20054283
23. L. Verde, T. Treu, and A. G. Riess, *Nature Astronomy* **3**, 891 (2019). DOI:10.1038/s41550-019-0902-0
24. N. C. Wickramasinghe, J. T. Wickramasinghe, and E. Mediavilla, *Astrophys. and Space Sci.* **298**, 453 (2005). DOI:10.1007/s10509-005-5835-7

## Light Curves of Lensed Components and Time Delay Measurements in the Binary Gravitationally Lensed Quasars SDSS J2124+1632 and SDSS J0806+2006

D. Kh. Bekov<sup>1</sup>, T. A. Akhunov<sup>1,2</sup>, O. A. Burkhonov<sup>2</sup>, and N. R. Alimova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, 100174 Uzbekistan

<sup>2</sup>Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, 100052 Uzbekistan

The article presents the results of long-term photometric monitoring of two binary gravitationally lensed quasars, SDSS J2124+1632 and SDSS J0806+2006, carried out at the Maidanak Observatory in 2017–2022. The obtained light curves of the lensed components of both systems are analyzed. The variability of SDSS J2124+1632 turned out to be quite large: up to 0<sup>m</sup>50 for the system as a whole and up to 0<sup>m</sup>75 for component A. Long-term microlensing was found against the background of a general increase in the apparent brightness of the quasar source. The brightness variations in SDSS J0806+2006 are less intense: the range is about 0<sup>m</sup>20 for the system as a whole, and up to 0<sup>m</sup>25 for both components. Analysis of the light curves did not show the presence of microlensing here. We also calculated the probable values of the time delay:  $\Delta t_{AB} = 102 \pm 20$  days (component B is in the lead) and  $\Delta t_{AB} = -53.0 \pm 6.0$  days (component A is in the lead) in SDSS J2124+1632 and SDSS J0806+2006, respectively. The value of  $\Delta t_{AB}$  for SDSS J2124+1632 is consistent with previously found time delays for binary gravitationally lensed systems. In the case of the second system, the time delay is consistent with earlier theoretical calculations, which suggested that the time delay should be about 50 days.

Keywords: *gravitational lensing; micro—quasars; individual: SDSS J2124+1632, SDSS J0806+2006*