

УДК 524.74-56:520.82

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ЭХОКАРТИРОВАНИЕ BLR-ОБЛАСТЕЙ AGN В ДИАПАЗОНЕ $0.1 < z < 0.8$. I. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

© 2019 Р. И. Уклеин^{1*}, Е. А. Малыгин²,
Е. С. Шабловинская¹, А. Е. Перепелицын¹, А. А. Гроховская¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 26 декабря 2018 года; после доработки 23 сентября 2019 года; accepted 23 сентября 2019 года

Уточнение калибровочной зависимости для определения размеров области формирования широких линий (broad-line region, BLR) по наблюдаемой в оптическом диапазоне светимости активных ядер галактик (AGN) является необходимой задачей для исследования таких фундаментальных параметров далёких AGN, как, например, масса центральной сверхмассивной чёрной дыры. Наиболее популярным способом оценки размеров BLR-областей на сегодняшний день является метод эхокартирования, основанный на измерении временной задержки между континуальным потоком и потоком в эмиссионной линии. В своей работе мы применяем метод фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах, адаптированный для наблюдений на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН, для исследования AGN с широкими линиями в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 0.8$. В данной работе описаны использованные методы наблюдений и обработки данных, приведена выборка объектов и продемонстрирована стабильность используемого метода. В качестве предварительного результата для 2MASX J08535955+7700543 на $z = 0.1$ мы получили оценки времени задержки $\tau(\text{ICCF}) = 32.2^{\pm 10.6}$ дня и $\tau(\text{JAVELIN}) = 39.5_{-15.8}^{+23.0}$ дня, которые согласуются между собой и находятся в пределах точности существующих калибровочных зависимостей.

Key words: *методы: наблюдательные — техника: фотометрия — галактики: активные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, в центрах большинства массивных галактик находятся сверхмассивные чёрные дыры (supermassive black holes, SMBH) массой от миллиона до десятков миллиардов солнечных масс. В активных ядрах галактик (active galactic nucleus, AGN) наличие сверхмассивной чёрной дыры приводит к высвобождению огромного количества энергии посредством аккреции газа на SMBH. Переменное излучение диска в ультрафиолетовой части спектра ионизует облака газа в области формирования широких линий (broad-line region, BLR), которые затем, вследствие фоторекомбинации, переизлучают энергию в эмиссионных линиях. Метод эхокартирования (reverberation mapping, RM) состоит в измерении времени задержки τ между излучением аккреционного диска, ответственного за формирование континуума, и излучением в эмиссионных линиях, которое испущено облаками газа в BLR-области [1]. Предполагается, что размер области BLR $R_{\text{BLR}} \equiv c\tau$ [2], где c — скорость

света. Тогда R_{BLR} может быть определён путём измерения временного сдвига (запаздывания) τ кривой блеска AGN в линии относительно кривой блеска в континууме, связанных интегральным преобразованием, ядром которого является кросс-корреляционная функция.

Первые измерения временной задержки τ между излучением в линии $\text{H}\alpha$ и в ультрафиолетовом континууме в галактиках с активными ядрами проведены в работе Черепашука и Лютого в 1973 г. [3]. В ней были исследованы галактики NGC 4151, NGC 3516 и NGC 1068, для которых задержки составили 30, 25 и 15 дней соответственно, что даёт размер области BLR $c\tau \sim 0.02$ пк. Метод эхокартирования получил развитие в ряде работ (см. например, [1, 4, 5] и другие).

В статье Peterson и др. [6] были собраны и проанализированы данные по размерам BLR за предыдущие 15 лет, полученные для AGN методом RM. В статье Bentz and Katz [7] приводится описание базы данных с компиляцией всех на тот момент опубликованных (63 AGN) оценок масс центральных чёрных дыр. Однако база данных [7] содержит наблюдательные данные лишь для близких AGN

*E-mail: uklein@sao.ru

до $z \sim 0.3$, как и многие более поздние работы по эхокартированию BLR (например, [8–10]).

Особый интерес представляет эхокартирование далёких AGN. Поскольку динамика газа в области BLR определяется гравитационным влиянием SMBH, из вириального соотношения следует, что её масса связана с размером r и скоростями газа в BLR-области v_{line} формулой:

$$M_{\text{SMBH}} = f c \tau v_{\text{line}}^2 G^{-1},$$

где G — гравитационная постоянная; c — скорость света; τ — время запаздывания данной спектральной линии; v_{line} — характерная скорость газа, излучающего данную линию; f — безразмерный множитель порядка единицы, зависящий от структуры и кинематики BLR-области и угла наклона системы по отношению к наблюдателю.

Таким образом, продление выборки AGN с известными размерами R_{BLR} на более далёкие красные смещения даст возможность проследить эволюцию масс центральных чёрных дыр. Наиболее крупной кампанией по эхокартированию BLR-областей на больших z является проект SDSS-RM [11], в рамках которого ведётся мониторинг 849 квазаров с широкими линиями в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 4.5$. Команда SDSS-RM представила измерения времени задержки τ в диапазоне красных смещений $0.11 < z < 1.13$: для 44 квазаров — с использованием линии $H\beta$ и для 18 квазаров — с использованием линии $H\alpha$ [12, 13]. Также отмечается, что для далёких объектов естественно наблюдать задержку τ в линиях с более высокими потенциалами ионизации, находящимися в более коротковолновой части спектра по сравнению с серией Бальмера, например, в линии $Mg\ II$ (2798 \AA) (работа [14] и ссылки в ней).

Однако метод эхокартирования требует накопления длинного ряда наблюдательных данных, что затрудняет его широкое применение. Было замечено, что для активных ядер существует зависимость между светимостью и размером BLR-области: $R_{\text{BLR}} \propto L^\alpha$. В настоящее время существует несколько эмпирических зависимостей, связывающих размер R_{BLR} , полученный по измерению задержек кривых блеска в разных линиях, от светимостей в различных диапазонах длин волн электромагнитного спектра. Наиболее популярна зависимость, применяемая для близких объектов: $R_{\text{BLR}} - L_\lambda(5100 \text{ \AA})$, где R_{BLR} — размер области BLR, измеренный по задержке излучения в линии $H\beta$, а $L_\lambda(5100 \text{ \AA})$ — светимость галактики в диапазоне $4400\text{--}5850 \text{ \AA}$ [15, 16].

Основная цель нашего исследования — дополнить имеющиеся калибровочные зависимости

$R_{\text{BLR}}(L)$ новыми измерениями $R_{\text{BLR}} = c\tau$ для далёких AGN до $z \sim 0.8$, используя выборку объектов, не пересекающуюся с другими обзорами. Кроме того, в ходе исследования мы адаптируем метод фотометрического эхокартирования [17] для наблюдений в среднеполосных фильтрах на телескопе 1-м класса (Цейсс-1000, САО РАН).

В данной статье мы приводим методику наблюдений в рамках мониторинга по фотометрическому эхокартированию BLR-областей AGN, в том числе описание приборов и обработки данных, а также представляем выборку наблюдаемых объектов с ожидаемыми задержками, оценёнными по литературным спектральным данным, и методические результаты, подтверждающие стабильность реализуемого метода.

2. ВЫБОРКА

Для проведения фотометрического мониторинга по эхокартированию BLR-областей с помощью баз данных NED¹ и SDSS² была составлена выборка из восьми активных ядер с широкими линиями (эквивалентная ширина $W_\lambda > 200 \text{ \AA}$), находящихся в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 0.8$. Поскольку для проведения наблюдений предполагалось использование 1-м телескопа Цейсс-1000, ограничение на яркость объектов составило $m < 20 \text{ mag}$ в фильтре V . Для возможности мониторинга в течение года были отобраны незаходящие приполярные объекты ($\text{Dec} > 68^\circ$). Итоговая выборка приведена в таблице 1. В колонках таблицы указаны: (1) идентификационный номер в выборке; (2) название галактики; (3) координаты на эпоху J2000; (4) звёздная величина в фильтре V ; (5) красное смещение z ; (6) наблюдаемая широкая эмиссионная линия; (7) ожидаемая задержка τ в днях; (8) используемые фильтры SED для измерения потоков в линии и континууме

Каждый объект выборки наблюдается в двух фильтрах: один соответствует области широкой эмиссионной линии $H\beta(\alpha)$, другой — континууму в области, близкой к линии. Таким образом возможно учесть вклад, вносимый переменным континуумом в наблюдаемый поток в эмиссионной линии, тем самым увеличив контраст задержки одной кривой блеска относительно другой при последующем кросс-корреляционном анализе. В эксперименте используются среднеполосные интерференционные фильтры SED³ с шириной полосы

¹NASA NED, <https://ned.ipac.caltech.edu>

²<https://dr14.sdss.org/>

³Edmund Optics, <https://www.edmundoptics.com>

Таблица 1. Наблюдаемая выборка активных ядер

| # | Название галактики | RA Dec (J2000) | Mag (V) | z | Эмиссия | τ , дни | Фильтры |
|-----|---------------------------|--|---------|-------|------------|--------------|---------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 1 | 2MASX J08535955+7700543 | 08 ^h 53 ^m 59 ^s .4 +77°00'55'' | 17.0 | 0.106 | H α | 27 | 725/700 |
| 2 | VII Zw 244 | 08 ^h 44 ^m 45 ^s .3 +76°53'09'' | 15.7 | 0.131 | H β | 34 | 550/525 |
| 3 | SDSS J093702.85+682408.3 | 09 ^h 37 ^m 02 ^s .9 +68°24'08'' | 18.0 | 0.294 | H β | 47 | 625/600 |
| 4 | SDSS J094053.77+681550.3 | 09 ^h 40 ^m 53 ^s .8 +68°15'50'' | 19.4 | 0.371 | H α | 59 | 900/875 |
| 5 | SDSS J100057.50+684231.0 | 10 ^h 00 ^m 57 ^s .5 +68°42'31'' | 19.0 | 0.499 | H β | 80 | 725/700 |
| 6 | 2MASS J01373678+8524106 | 01 ^h 37 ^m 36 ^s .7 +85°24'11'' | 16.6 | 0.499 | H β | 79 | 725/700 |
| 7 | SDSS J095814.46+684704.8 | 09 ^h 58 ^m 14 ^s .4 +68°47'05'' | 19.7 | 0.662 | H β | 92 | 800/775 |
| 8 | GALEX 2486024515200490156 | 10 ^h 01 ^m 51 ^s .6 +69°35'27'' | 19.6 | 0.847 | H β | 124 | 900/875 |

пропускания 250 Å, перекрывающие область оптического диапазона длин волн 5000–9000 Å также с шагом 250 Å. Для большинства объектов выборки набор фильтров подобран для наблюдения линии H β и континуума возле неё. Однако для двух объектов выборки — #1 и #4 — линия H β приходится на границу полос пропускания соседних фильтров, поэтому для их исследования была выбрана линия H α . Выбор фильтров с их полосами пропускания проиллюстрирован на рис. 1. Спектры взяты из статей [18–20].

Из известных зависимостей $R_{\text{BLR}}-L$ для линии H β для исследуемых AGN были рассчитаны ожидаемые задержки τ (см. таблицу 1). Для объектов с красными смещениями до 0.5 (объекты ## 1, 3–5) был рассчитан поток L_{λ} на 5100 Å, измеряемый в диапазоне 4400–5850 Å. Тогда из калибровочной зависимости $R_{\text{BLR}}-L_{\lambda}(5100 \text{ Å})$:

$$\lg(R_{\text{BLR}}) = -21.3_{-2.8}^{+2.9} + 0.519_{-0.066}^{+0.063} \lg(\lambda L_{\lambda}),$$

где $L_{\lambda} = L_{\lambda}(5100 \text{ Å})$ — поток на длине волны 5100 Å, R_{BLR} — размер области BLR в линии H β [21].

В случае, когда $z > 0.5$, а также для объекта #2, для которого имеются спектральные данные лишь в небольшом интервале длин волн (3500–7000 Å), диапазон, где рассчитывается поток $L_{\lambda}(5100 \text{ Å})$, выходит за пределы доступных оптических спектров. В связи с этим для объектов ##2, 6–8 была использована калибровка по потоку в линии $L_{\lambda}(\text{H}\beta)$ [22]:

$$\lg(R_{10}) = 0.85 \pm 0.05 + (0.53 \pm 0.04) \lg(L_{43}(\text{H}\beta)),$$

где $R_{10} = R_{\text{BLR}}/10$ св. дней — размер BLR-области, нормированный на 10 св. дней, а светимость в

линии H β , нормированная на 10^{43} эрг с⁻¹:

$$L_{43}(\text{H}\beta) = L_{\lambda}(\text{H}\beta)/10^{43} \text{ эрг с}^{-1}.$$

В таблице 1 ожидаемые задержки τ приведены с точностью до 10%.

Известно, что вещество BLR-области стратифицировано [23, 24], и область излучения в линии H α шире области излучения в линии H β . Однако калибровочная зависимость $L_{\lambda}(\text{H}\alpha)$ непопулярна, поскольку для многих AGN большой вклад в поток в широкой H α вносит узкая линия N II (6583 Å), принадлежащая излучению облаков NLR (narrow-line region, область формирования узких линий). Чтобы оценить возможную разницу задержки переменности в линии H α для объектов #1 и #4, мы воспользовались данными каталога [7] для 29 AGN, для которых эхокартирование дало задержку одновременно в двух линиях — H α и H β , а также данными по Sy I 3C 390.3, полученными из спектрополяриметрического мониторинга на 6-м телескопе БТА [25]. Сравнение наблюдаемого запаздывания в линиях приведено на рис. 2. Наклон прямой составил $k = \tau(\text{H}\beta)/\tau(\text{H}\alpha) = 0.88 \pm 0.03$. Таким образом, задержка в H α для #1 и #4 совпадает с ожидаемой по H β в пределах 10%.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

3.1. Приборы

С февраля 2018 г. наблюдения выборки AGN проводились ежемесячно в полутёмные и светлые ночи на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН с помощью приборов MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines [26]) и MMPP (Multi-Mode Photometer-Polarimeter) в фотометрическом

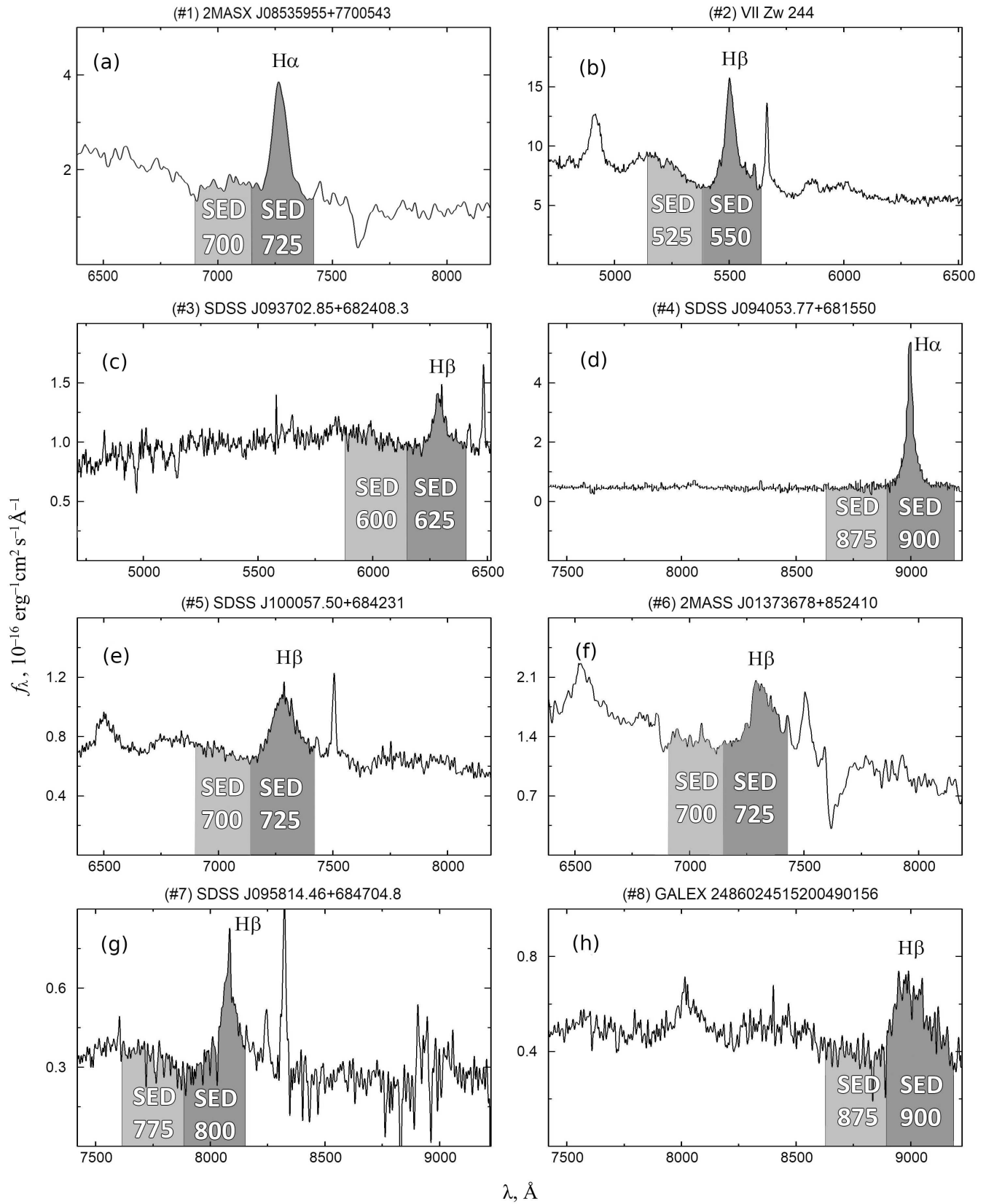


Рис. 1. Полосы пропускания подобранных фильтров SED на спектрах исследуемых AGN.

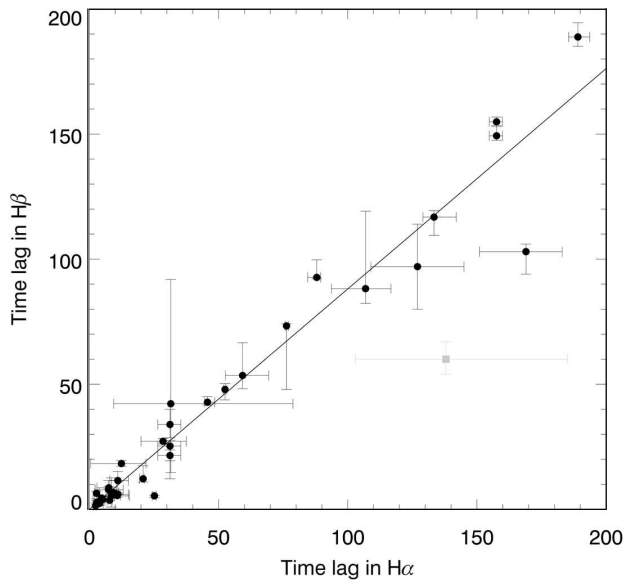


Рис. 2. Сравнение наблюдаемого запаздывания в линии $H\beta$ относительно запаздывания в линии $H\alpha$ по данным каталога [7] (чёрным) и мониторинга [25] (серым).

режиме с использованием десяти среднеполосных интерференционных SED-фильтров. Размеры поля зрения составили $8'7 \times 8'7$ для MaNGaL и $7'2 \times 7'2$ для MPPR.

В ходе наблюдений были использованы три различных приёмника излучения: Andor CCD iKon-M 934 (1024×1024 px), Andor Neo sCMOS (2560×2160 px) и Eagle V CCD (2048×2048 px). Квантовая эффективность данных приёмников в интересующих полосах приведена в таблице 2. Для достижения минимальных шумов во всех трёх случаях при наблюдениях использовалось водяное охлаждение.

3.2. Фотометрические стандарты

Наблюдения объектов выборки чередовались с наблюдениями фотометрических звёзд-стандартов из статьи [28]. Стандарты наблюдались до и/или после получения кадров с исследуемым полем в тех же фильтрах и на максимально близкой высоте. Такая методика наблюдений позволяет определить связь инструментальных звёздных величин с абсолютными заатмосферными.

Для абсолютной привязки нами была выбрана система АВ-величин. Эта система определяется таким образом, что при монохроматическом потоке f_ν , измеряемом в $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Гц}^{-1}$:

$$m_{\text{AB}} = -2.5 \times \lg(f_\nu) - 48.60.$$

Пропускание фильтров SED измерено в лабораторных условиях. Обозначим его как функцию $filter(\nu)$ и свернём с непрерывным распределением энергии фотометрического стандарта f_ν для определения его заатмосферной АВ-величины согласно формуле:

$$m_{\text{AB}} = -2.5 \times \lg \left[\frac{\int f_\nu \times filter(\nu) \times d\nu}{\int filter(\nu) \times d\nu} \right] - 48.60,$$

где поток стандарта f_ν также указан в единицах $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Гц}^{-1}$.

В таблице 3 приведены рассчитанные АВ-величины наблюдаемых абсолютных спектрофотометрических стандартов для используемых SED-фильтров.

3.3. Обработка данных

Для редукиции полученных наблюдательных данных и последующих измерений использовалась среда программирования IDL⁴. В течение наблюдений получались калибровочные изображения (кадры flat по сумеречному небу с движением трубы телескопа для каждого фильтра, bias/dark), которые позволяли исправлять данные за аддитивные и мультипликативные ошибки. Также наблюдались фотометрические стандарты на разных зенитных расстояниях для контроля коэффициента экстинкции в течение ночи.

Наряду с этим в процессе редукиции полученные изображения очищались от следов космических частиц, попадающих рядом с объектом измерений.

Для учёта поглощения света в атмосфере рассчитывались величины воздушных масс согласно формуле [29]:

$$\begin{aligned} M &= \sec(z) - 0.0018167 \times [\sec(z) - 1] \\ &- 0.002875 \times [\sec(z) - 1]^2 \\ &- 0.0008083 \times [\sec(z) - 1]^3. \end{aligned}$$

Существует заблуждение, что при съёмке достаточно большого количества кадров с последующим их сложением возможно улучшить отношение сигнал/шум (S/N) при фотометрических измерениях. Критерии правильной оценки отношения S/N приводятся в статье [30]. Поскольку измеряемые потоки от объектов — случайные величины, каждый отдельный кадр обрабатывается независимо, после чего производится статистическая оценка усреднением случайной величины робастными методами, что даёт её несмещённое среднее.

⁴<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>

Таблица 2. Квантовая эффективность приёмников в исследуемых фотометрических полосах

| Приёмник | Квантовая эффективность, % | | | | |
|------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 5500 Å | 6000 Å | 7000 Å | 8000 Å | 9000 Å |
| Andor iKon-M 934 | 95 | 96 | 91 | 77 | 47 |
| Andor Neo sCMOS | 54 | 56 | 49 | 31 | 14 |
| Eagle V CCD | 92 | 95 | 89 | 75 | 50 |

Таблица 3. Потоки спектрофотометрических звёзд-стандартов в единицах АВ-величин в полосах пропускания фильтров SED

| Звезды-стандарты | m_{AB}, mag | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | SED 525 | SED 550 | SED 600 | SED 625 | SED 700 | SED 725 | SED 775 | SED 800 | SED 875 | SED 900 |
| G 193 – 74 | 15.63 | 15.61 | 15.58 | 15.58 | 15.58 | 15.59 | 15.61 | 15.62 | 15.68 | 15.73 |
| BD +75°325 | 9.47 | 9.56 | 9.73 | 9.81 | 10.03 | 10.10 | 10.22 | 10.28 | 10.46 | 10.51 |
| Feige 34 | 11.09 | 11.17 | 11.35 | 11.43 | 11.63 | 11.69 | 11.79 | 11.84 | 11.90 | 12.05 |
| BD +33°2642 | 10.71 | 10.78 | 10.91 | 10.97 | 11.13 | 11.18 | 11.28 | 11.33 | 11.43 | 11.45 |
| BD +28°4211 | 10.43 | 10.52 | 10.70 | 10.78 | 10.99 | 11.05 | 11.18 | 11.24 | 11.42 | 11.50 |
| BD +25°4655 | 9.60 | 9.69 | 9.87 | 9.95 | 10.16 | 10.22 | 10.35 | 10.41 | 10.59 | 10.68 |
| Feige 110 | 11.76 | 11.85 | 12.03 | 12.10 | 12.32 | 12.39 | 12.50 | 12.57 | 12.74 | 12.79 |

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Вторичные стандарты

Для исследования переменности излучения AGN вблизи каждого объекта в пределах нескольких угловых минут были выбраны одиночные непременные звёзды — вторичные стандарты. Использование локальных звёзд сравнения для дифференциальной фотометрии существенно повышает точность измерений потоков энергии от исследуемых AGN, а также позволяет для достаточно ярких объектов проводить наблюдения в лунное время и в условиях нестабильной прозрачности атмосферы.

В результате первого года мониторинга была сформирована сеть звёзд сравнения для фотометрической привязки AGN с целью получения калиброванных кривых блеска в эмиссии и континууме. Измерения потоков для наиболее стабильных локальных стандартов, к которым осуществляется привязка потоков AGN, сведены в таблицу 4. В колонках таблицы содержатся следующие данные: (1) идентификационный номер в выборке; (2) координаты на эпоху J2000; (3) АВ-величина звезды сравнения в фильтре, соответствующем наблюдаемому диапазону континуума объекта; (4) АВ-величина звезды сравнения в фильтре,

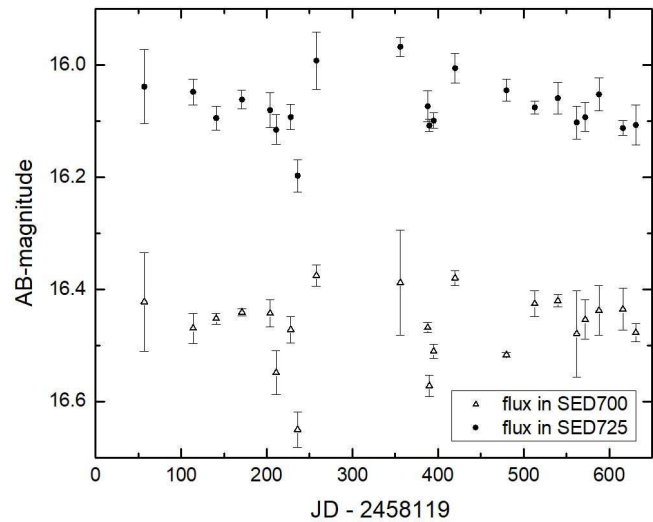


Рис. 3. Кривые блеска AGN #1, полученные в фильтрах SED, соответствующие потокам в линии и в континууме вблизи этих линий. Отсчёт юлианских дат начинается с 1 января 2018 года.

соответствующем широкой эмиссионной линии объекта. Ошибки измерения потоков для каждой точки в среднем не превосходят $\sigma = 0.02 \text{ mag}$.

Таблица 4. Звёзды сравнения для объектов выборки

| # | RA Dec (J2000) | Continuum | Line | # | RA Dec (J2000) | Continuum | Line |
|-----|---|--------------|--------------|-----|---|--------------|--------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (1) | (2) | (3) | (4) |
| #1 | | SED 700 | SED 725 | #5 | | SED 700 | SED 725 |
| 1-1 | 08 ^h 54 ^m 16 ^s .3 +76°59'44" | 15.00 ± 0.01 | 14.95 ± 0.01 | 5-1 | 10 ^h 00 ^m 55 ^s .4 +68°41'01" | 16.26 ± 0.01 | 16.23 ± 0.01 |
| 1-2 | 08 ^h 53 ^m 48 ^s .5 +76°59'27" | 15.16 ± 0.01 | 15.13 ± 0.01 | 5-2 | 10 ^h 00 ^m 50 ^s .0 +68°40'32" | 15.70 ± 0.01 | 15.70 ± 0.01 |
| #2 | | SED 525 | SED 550 | #6 | | SED 700 | SED 725 |
| 2-1 | 08 ^h 44 ^m 32 ^s .0 +76°53'49" | 12.54 ± 0.01 | 12.47 ± 0.01 | 6-1 | 01 ^h 37 ^m 15 ^s .5 +85°22'28" | 14.82 ± 0.01 | 14.84 ± 0.01 |
| 2-2 | 08 ^h 45 ^m 22 ^s .4 +76°50'12" | 14.03 ± 0.01 | 13.96 ± 0.01 | 6-2 | 01 ^h 36 ^m 44 ^s .1 +85°23'31" | 15.40 ± 0.01 | 15.43 ± 0.01 |
| #3 | | SED 600 | SED 625 | #7 | | SED 775 | SED 800 |
| 3-1 | 09 ^h 36 ^m 44 ^s .7 +68°25'46" | 13.73 ± 0.01 | 13.72 ± 0.01 | 7-1 | 09 ^h 58 ^m 21 ^s .7 +68°45'58" | 15.48 ± 0.01 | 15.45 ± 0.01 |
| 3-2 | 09 ^h 36 ^m 54 ^s .6 +68°24'39" | 16.63 ± 0.07 | 16.60 ± 0.06 | 7-2 | 09 ^h 58 ^m 45 ^s .4 +68°45'09" | 16.93 ± 0.01 | 16.84 ± 0.01 |
| #4 | | SED 875 | SED 900 | #8 | | SED 875 | SED 900 |
| 4-1 | 09 ^h 40 ^m 51 ^s .8 +68°15'10" | 15.57 ± 0.02 | 15.54 ± 0.02 | 8-1 | 10 ^h 01 ^m 56 ^s .4 +69°32'46" | 16.13 ± 0.02 | 16.16 ± 0.03 |
| 4-2 | 09 ^h 41 ^m 06 ^s .9 +68°16'41" | 14.99 ± 0.02 | 14.95 ± 0.02 | 8-2 | 10 ^h 02 ^m 04 ^s .6 +69°34'02" | 17.26 ± 0.02 | 17.19 ± 0.04 |

4.2. Предварительный результат

Измерения потоков исследуемых AGN были проведены относительно наиболее стабильных вторичных стандартов. Кривые блеска потоков в континууме и в линии одного из наиболее прописанных AGN #1 (2MASX J08535955+7700543) приведены на рис. 3.

После вычитания континуального потока из интегрального потока в линии наблюдается короткопериодическая переменность на уровне 0.2 АВ-величины для потоков в континууме и в линии, причём характер переменности повторяется. Наблюдаемая амплитуда превышает среднюю ошибку измерения излучения AGN: метод дифференциальной фотометрии обеспечивает точность порядка 0.03 mag.

Для оценки временной задержки между двумя кривыми блеска объекта #1 выборки были применены классический метод кросс-корреляции ICCF, а также JAVELIN — метод с использованием кода JAVELIN [31, 32]. Полученные результаты представлены на рис. 4.

4.2.1. Классический кросс-корреляционный метод

Сплошной кривой на рис. 4 обозначена интерполяционная кросс-корреляционная функция (ICCF). Описание гауссианой самого мощного пика ICCF даёт нам оценку времени задержки $\tau(\text{ICCF}) = 32.2^{+10.6}$ дня. Для данной оценки в качестве погрешности измерения мы приводим полуширину вписанной гауссианы.

4.2.2. JAVELIN

Второй метод, JAVELIN, показан на рис. 4 в виде гистограммы, получаемой с помощью кода JAVELIN (Just Another Vehicle for Estimating Lags In Nuclei), реализованного на языке программирования Python. Опишем кратко содержание процедуры определения τ с использованием данного метода. Первым шагом является построение модели континуума методом случайных блужданий DRW (dumped random walk). В результате мы имеем апостериорные распределения двух DRW-параметров переменности континуума — амплитуды и шкалы времени, вычисленные на основе сэмплирования MCMC (Markov chain Monte Carlo)⁵. Вторым шагом является интерполяция кривой блеска континуума, основанная на параметрах, определенных на первом шаге, и затем её смещение, сглаживание и масштабирование для сопоставления с наблюдаемой кривой блеска линии. После еще одного запуска алгоритма MCMC в пакете JAVELIN определяется искомое апостериорное распределение времени задержки между кривыми блеска. В итоге мы получили значение $\tau(\text{JAVELIN}) = 39.5^{+23.0}_{-15.8}$ дня. Сама оценка соответствует медианному значению

⁵MCMC — алгоритм для генерации выборки из апостериорного распределения вероятностей и вычисления интегралов методом Монте-Карло. Последовательность получаемых значений образует обратимую цепь Маркова, устойчивое распределение которой — это целевое апостериорное распределение.

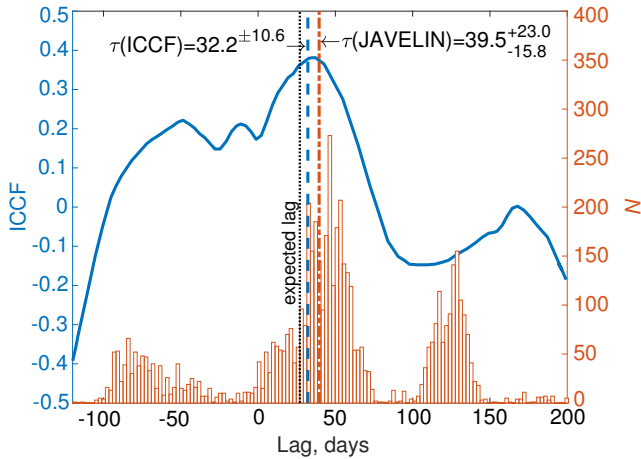


Рис. 4. Кросс-корреляционный анализ временной задержки между потоком в континууме и потоком в эмиссионной линии для 2MASX J08535955+7700543 (#1) с помощью двух методов: классического ICCF (сплошная интерполированная кривая) и JAVELIN (гистограмма, полученная с использованием JAVELIN). Соответствующие оценки времени задержки отмечены штриховой ($\tau(\text{ICCF})$) и штрих-пунктирной линиями ($\tau(\text{JAVELIN})$). Пунктирной линией показано ожидаемое в результате калибровок значение τ .

наиболее мощного пика, расположенного в диапазоне от -20 до 80 дней (см. рис. 4). Нижняя и верхняя оценки времени задержки соответствуют границам интервала наиболее высокой плотности апостериорного распределения (HPD), которые рассчитаны с помощью JAVELIN.

4.2.3. Общие замечания

Итак, для иллюстрации работы методики мы использовали кривые блеска AGN #1 и выявили оценки времени задержки $\tau(\text{ICCF}) = 32.2^{\pm 10.6}$ дня и $\tau(\text{JAVELIN}) = 39.5^{+23.0}_{-15.8}$ дня. В пределах точности наши оценки хорошо согласуются между собой и ожидаемым из калибровочных зависимостей временем задержки $\tau \approx 27$ дней. Несмотря на то, что кросс-корреляционные пики уверенно детектируются, мы предполагаем продолжение накопления наблюдательных данных для уточнения результата AGN #1. Непосредственное сравнение значений погрешности времени задержки $\Delta\tau$ для методов ICCF и JAVELIN некорректно и требует дополнительного исследования в рамках данного проекта. Оба метода работают хорошо даже при наличии систематических ошибок [33].

Стоит отметить, что погрешность измерения задержки $\Delta\tau$ тесно связана с периодом дискретизации кривых блеска t_{cad} , т.е. временем между сетями наблюдений [31]. За прошедшее время средний интервал t_{cad} составил порядка $20\text{--}25$ дней. Для уточнения величины задержки τ необходимо увеличить количество сетов наблюдений, уменьшив

тем самым интервал дискретизации кривых блеска, что особенно важно для активных ядер с ожидаемыми запаздываниями излучения в линии порядка нескольких десятков дней, например, для #1 и #2.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты.

1. Методика наблюдений методом фотометрического эхокартирования адаптирована для телескопов метрового класса и при этом оказывается независимой от используемого прибора.

2. Для каждого из исследуемых активных ядер в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 0.8$ определена сеть вторичных стандартов, что позволяет в дальнейшем использовать метод дифференциальной фотометрии. Фотометрическая точность при этом составляет в среднем около 0.03 mag , что на порядок превосходит ожидаемую амплитуду переменности AGN.

3. Для объекта 2MASX J08535955+7700543 предварительные результаты фотометрического эхокартирования представлены на рис. 3. Видно, что наблюдаемый объект переменный, а используемый метод стабилен. Применение классической кросс-корреляционной функции и JAVELIN дало оценки времени задержки $\tau(\text{ICCF}) = 32.2^{\pm 10.6}$ дня и $\tau(\text{JAVELIN}) = 39.5^{+23.0}_{-15.8}$ дня, которые согласуются между собой и находятся в пределах точности существующих калибровочных зависимостей.

ACKNOWLEDGMENTS

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензенту за ценные замечания и предложения, которые способствовали улучшению статьи. Авторы также благодарят В. Л. Афанасьева за полезные дискуссии и замечания.

FUNDING

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00826. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. D. Blandford and C. F. McKee, *Astrophys. J.* **255**, 419 (1982).
2. B. M. Peterson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 247 (1993).
3. A. M. Cherepashchuk and V. M. Lyutyi, *Astrophys. Lett.* **13**, 165 (1973).
4. I. I. Antokhin and N. G. Bochkarev, *Sov. Astron.* **27**, 261 (1983).
5. C. M. Gaskell and L. S. Sparke, *Astrophys. J.* **305**, 175 (1986).
6. B. M. Peterson, L. Ferrarese, K. M. Gilbert, et al., *Astrophys. J.* **613**, 682 (2004).
7. M. C. Bentz and S. Katz, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127**, 67 (2015).
8. P. Du, K.-X. Lu, Z.-X. Zhang, et al., *Astrophys. J.* **825**, 126 (2016).
9. L. Jiang, Y. Shen, I. D. McGreer, et al., *Astrophys. J.* **818**, 137 (2016).
10. F. Pozo Nuñez, D. Chelouche, S. Kaspi, and S. Niv, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129**, 094101 (2017).
11. Y. Shen, W. N. Brandt, K. S. Dawson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **216**, 4 (2015).
12. C. J. Grier, J. R. Trump, Y. Shen, et al., *Astrophys. J.* **851**, 21 (2017).
13. C. J. Grier, J. R. Trump, Y. Shen, et al., *Astrophys. J.* **868**, 76 (2018).
14. B. Czerny, A. Olejak, M. Ralowski, et al., arXiv:1901.09757 (2019).
15. S. Kaspi, D. Maoz, H. Netzer, et al., *Astrophys. J.* **629**, 61 (2005).
16. M. C. Bentz, J. L. Walsh, A. J. Barth, et al., *Astrophys. J.* **705**, 199 (2009).
17. M. Haas, R. Chini, M. Ramolla, et al., *Astron. and Astrophys.* **535**, A73 (2011).
18. B. Abolfathi, D. S. Aguado, G. Aguilar, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235**, 42 (2018).
19. T. A. Boroson and R. F. Green, *Astrophys. J. Suppl.* **80**, 109 (1992).
20. J. Y. Wei, D. W. Xu, X. Y. Dong, and J. Y. Hu, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 575 (1999).
21. M. C. Bentz, B. M. Peterson, H. Netzer, et al., *Astrophys. J.* **697**, 160 (2009).
22. J. E. Greene, C. E. Hood, A. J. Barth, et al., *Astrophys. J.* **723**, 409 (2010).
23. B. M. Peterson, *ASP Conf. Ser.*, **69**, 1 (1994).
24. J. A. Baldwin, G. J. Ferland, K. T. Korista, et al., *Astrophys. J.* **582**, 590 (2003).
25. V. L. Afanasiev, A. I. Shapovalova, L. Č. Popović, and N. V. Borisov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **448**, 2879 (2015).
26. A. E. Perepelitsyn, A. V. Moiseev, and D. V. Oparin, *Izvestia Glavnoj Astron. Obs.*, **226**, 65 (2018).
27. E. V. Emelianov, T. A. Fatkhullin, and A. S. Moskvitin, Technical Report No. 340 (Special Astrophysical Observatory of RAS, 2019).
28. J. B. Oke, *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
29. W. A. Hiltner, *Astronomical techniques* (Chicago, University Press, 1962).
30. I. V. Afanasieva, *Astrophysical Bulletin* **71**, 366 (2016).
31. Y. Zu, C. S. Kochanek, S. Kozłowski, and B. M. Peterson, *Astrophys. J.* **819**, 122 (2016).
32. D. Mudd, P. Martini, Y. Zu, et al., *Astrophys. J.* **862**, 123 (2018).
33. Z. Yu, C. S. Kochanek, B. M. Peterson, et al., arXiv:1909.03072 (2019).

Photometric Reverberation Mapping of AGNs at $0.1 < z < 0.8$. I. Observational Technique

R. I. Uklein, E. A. Malygin, E. S. Shablovinskaya, A. E. Perepelitsyn, and A. A. Grokhovskaya

The improvement of the calibration relation for determining the size of the broad-line region from the observed optical luminosity of active galactic nuclei (AGN) is a necessary task to study fundamental parameters of distant AGNs such as mass of the central supermassive black hole. The most popular method of the BLR size estimation is the reverberation mapping based on measuring the time delay between the continuum flux and the flux in the emission lines. In our work, we apply the method of photometric reverberation mapping in medium-band filters, adapted for observations at the Zeiss-1000 telescope of the SAO RAS, for the study of AGN with broad lines in the range of redshifts $0.1 < z < 0.8$. This paper describes the technique of observations and data processing, provides a sample of objects and demonstrates the stability of the used method. As a preliminary result for 2MASX J08535955+7700543 at $z = 0.1$ we have obtained time delay estimates of $\tau(ICCF) = 32.2^{+10.6}$ days and $\tau(\text{JAVELIN}) = 39.5^{+23.0}_{-15.8}$ days that are consistent with each other and also within the accuracy of the existing calibration relations.

Keywords: *methods: observational—techniques: photometry—galaxies: active*