ИЗМЕРЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР В ЯДРАХ ДВУХ АКТИВНЫХ ГАЛАКТИК МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ЭХОКАРТИРОВАНИЯ

© 2020 г. Е. А. Малыгин^{1*}, Е. С. Шабловинская¹, Р. И. Уклеин¹, А. А. Гроховская¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия Поступила в редакцию 01.09.2020 г. После доработки 07.10.2020 г.; принята к публикации 27.10.2020 г.

Представлены результаты многолетнего фотометрического мониторинга двух активных ядер галактик — 2MASX J08535955+7700543 ($z \sim 0.106$) и VII Zw 244 ($z \sim 0.131$), исследуемых методом эхокартирования в среднеполосных фильтрах. Для оценки размера области формирования широких линий проведен анализ кривых блеска посредством кода JAVELIN. Ширины эмиссионных линий измерены с помощью спектральных данных, полученных на 6-м телескопе БТА САО РАН. В статье даны оценки масс сверхмассивных черных дыр $\lg(M/M_{\odot})$, равные соответственно 7.398^{+0.153}_{-0.171} и 7.049^{+0.068}_{-0.075}.

Ключевые слова: активные ядра галактик, сверхмассивные черные дыры, фотометрическое эхокартирование, спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0320010820110054

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных характеристик галактик является масса сверхмассивной черной дыры (СМЧД), находящейся в ее центре. Сейчас известно, что массы СМЧД коррелируют как со светимостью родительской галактики, так и с дисперсией скоростей звезд в ней (Гебхардт и др., 2000; Феррарэз и Мэррит, 2000). Также изучается эволюционная связь между СМЧД и сфероидальными звездными компонентами (балджами) галактик, а также с галактическими темными гало (см., например, Засов и др., 2017, и ссылки внутри). Измерения масс СМЧД в ядрах достаточно близких галактик проводятся с помощью изучения динамики звезд, газа и мазерных источников в гравитационном поле черной дыры. Однако в активных ядрах галактик (АЯГ) околоядерная область пространственно неразрешима и засвечена центральным источником, из-за чего прямое исследование динамики гравитируемого вещества невозможно.

Одним из наиболее надежных методов измерения масс центральных черных дыр в АЯГ является световое эхокартирование (reverberation mapping, Блэндфорд и МакКи 1982) центральных областей. Масса определяется в предположении вириализации газа, излучающего в области формирования широких линий (broad line region, BLR):

$$M_{\rm SMBH} = f \times (R_{\rm BLR} \vartheta_{\rm line}^2 G^{-1}), \qquad (1)$$

где G — гравитационная постоянная, R_{BLR} — размер BLR, ϑ_{line} — скорость газа в BLR, излучающего исследуемую линию, а f — безразмерный фактор порядка единицы, зависящий от структуры и кинематики BLR, а также наклона системы относительно наблюдателя (см., например, Петерсон и др., 2004). Размер BLR определяется как $R_{\rm BLR} \equiv$ $\equiv c\tau$, где c — скорость света, τ — запаздывание во времени излучения в исследуемой эмиссионной линии. формирующейся в BLR-области. относительно континуального излучения аккреционного диска (Петерсон, 1993). Чаще всего для эхокартирования используется линия Н*β* 4861 Å (Бентц и др., 2013). хотя, например, в пионерской работе (Черепащук и Лютый, 1973) исследование проводилось в линии $H\alpha$ 6563 А. Для более далеких галактик исследуется задержка излучения в линиях Mg II 2798 Å (Хомаюни и др., 2020; Заячек и др., 2020) и С IV 1549 А (Шэнь и др., 2019).

Для уверенного определения задержки между кривыми блеска в линии и в континууме необходимо проводить продолжительный мониторинг АЯГ (порядка нескольких лет для характерных размеров $R_{\rm BLR} \sim 0.02$ пк), что является непростой

^{*}Электронный адрес: male@sao.ru

Таблица 1. Характеристики исследуемых АЯГ. В таблице слева направо даны: название объекта, координаты на эпоху J2000, звездная величина в полосе V, красное смещение z, эмиссионная линия, в которой проводится эхокартирование, и используемые для этого фильтры из набора SED, где число соответствует центральной длине волны пропускания фильтра

Объект	Координаты (RA, Dec, J2000)	V	z	Линия	Фильтры (line + cont)
2MASX 108535955+7700543	$08^{h}53^{m}59^{s}4 + 77^{\circ}00'55''$	17.0	0.106	Нα	SED725
					SED700
VII 7 _W 944	$08^{h}44^{m}45^{s}3 + 76^{\circ}53'09''$	15.7	0.131	Hβ	SED550
V11 Zw 244					SED525

задачей в смысле затрат телескопного времени. На фоне спектрального метода в последнее десятилетие набирает популярность метод фотометрического эхокартирования в средне- или узкополосных фильтрах (Хаас и др., 2011).

С 2018 г. в рамках программы эхокартирования проводится фотометрический мониторинг выборки АЯГ преимущественно на 1-м телескопе Цейсс-1000 CAO PAH (Комаров и др., 2020). В этой статье мы представляем результаты наблюдений для двух наиболее ярких галактик с широкими линиями из исследуемой выборки (Уклеин и др., 2019) — 2MASX J08535955+7700543 (далее — J0853+77) и VII Zw 244: их кривые блеска и обнаруженные задержки переменности излучения. Для оценки скоростей газа на БТА были получены спектральные данные. Результатом работы является измерение масс центральных СМЧД в ядрах двух исследуемых галактик, причем ранее для этих объектов проводилась оценка M_{SMBH} лишь на основе косвенных методов.

НАБЛЮДЕНИЯ

Характеристики исследуемых галактик приведены в табл. 1. Наблюдения проводились с помощью телескопов CAO PAH: 1-м Цейсс-1000 и 6-м БТА. Первый использовался для ежемесячных фотометрических наблюдений, на БТА проводилась спектроскопия, а также было получено несколько фотометрических наблюдательных эпох.

Фотометрия

Наблюдения каждого объекта подразумевают использование двух интерференционных светофильтров: один соответствует области широкой эмиссионной линии бальмеровской серии, другой — континууму в области, близкой к линии. В эксперименте используются среднеполосные фильтры с характерными ширинами полос пропускания ~250 А. Область спектрального диапазона

изучаемых галактик. охватываемая используемыми фильтрами, проиллюстрирована на рис. 3.

За время мониторинга на 1-м телескопе последовательно использовались З прибора, устанавливающихся в фокусе Кассегрена:

- MaNGaL (Моисеев и др., 2020) + Andor iKon-M 934/Andor Neo sCMOS (2560 × \times 2160);
- ММРР (Емельянов и Фатхуллин, 2019) + + Eagle V (2048 \times 2048);
- StoP (Афанасьев и др., 2021) + Andor iKon-L 936 (2048 \times 2048).

Для получения дополнительных фотометрических данных осуществлялись наблюдения на БТА с помощью редуктора SCORPIO-2 (Афанасьев, Моисеев, 2011) + E2V 42-90/E2V 261-84.

На рис. 1 приведена гистограмма, иллюстрирующая количество наблюденных эпох для каждого объекта исследования на различных приборах. Для галактики J0853+77 всего получено 36 эпох наблюдений, для VII Zw 244 получено 30 эпох. Продолжительность мониторинга для J0853+77 и VII Zw 244 составляет 814 и 610 дней соответственно.

Методика фотометрических наблюдений детально изложена в статье Малыгин и др. (2020). Полученные кривые блеска АЯГ изображены на рис. 2 (слева).

Спектроскопия на БТА

VII Zw 244. Спектр низкого разрешения VII Zw 244 был получен 9 октября 2019 г. на 6-м телескопе БТА с использованием SCORPIO-1 (Афанасьев и Моисеев, 2005) в режиме длинной щели для обновления предыдущих спектральных данных, полученных более 25 лет назад в работе Боросон и Грин (1992). Более того, спектр Боросон

МАЛЫГИН и др.



Рис. 1. Количество полученных фотометрических данных с помощью различных приборов.



Рис. 2. Кривые блеска (слева) и соответствующие распределения задержек τ (справа) для J0853+77 и VII Zw 244. Синие треугольники отражают фотометрические измерения AB-величин континуума возле линии, красные кружки соответствуют фотометрическим измерениям AB-величин спектральной области, в которой находится широкая эмиссионная линия бальмеровской серии. Отсчет юлианских дат начинается с 1 января 2018 г.

и Грин (1992) указан в диапазоне 4070–5883 Å; в данной статье спектр расширен на диапазон 3800–7700 Å.

Спектр получен со щелью шириной 1" и решеткой VPHG 550G. Обратная дисперсия 2.1 Å/пиксель и инструментальный профиль FWHM 10 Å. Для калибровки спектра использовался адаптер первичного фокуса БТА (Афанасьев и др., 2017). Спектр сравнения по He–Ne–Ar лампе и плоские поля были сняты в одном и том же положении телескопа. Были получены 3 экспозиции по 5 мин. Спектрофотометрический стандарт G191B2B наблюдался в ту же ночь, чтобы скорректировать кривую чувствительности используемого ПЗС E2V42-40 на аналогичных зенитных расстояниях и минимизировать эффекты спектрального пропускания атмосферы. Для учета потерь света на щели и дальнейшей оценки полного потока был снят бесщелевой спектр объекта.

Полученный спектр VII Zw 244 представлен на рис. 3 (снизу).

2MASX J08535955+7700543. Спектр активной галактики J0853+77 был снят 6 ноября 2019 г. на БТА с помощью редуктора SCORPIO-2 с ПЗС E2V42-90 в режиме длинной щели для обновления спектральных данных, полученных в работе Вэй и др. (1999) более 20 лет назад.



Рис. 3. Спектры J0853+77 и VII Zw 244, полученные на БТА. Поверх нанесены полосы пропускания используемых фильтров.

Спектр получен со щелью шириной 2" и решеткой VPHG 940@600 (обратная дисперсия 1.16 Å/пиксель) в спектральном диапазоне 4500—7600 Å. Было получено 4 экспозиции по 15 мин. Спектр сравнения и плоские поля сняты также с помощью адаптера первичного фокуса. Кривая чувствительности матрицы исправлялась по наблюдениям стандарта G191B2B. Спектр представлен на рис. 3 (сверху).

При анализе профиля линии Н α точность спектральных данных оказалась недостаточной (см. ниже), поэтому в дополнение к спектральным данным были использованы спектрополяриметрические данные, полученные 3 марта 2020 г. с помощью редуктора SCORPIO-2. В режиме спектрополяриметрии в пучок вводились решетка VPHG1026@735 и двойная призма Волластона, и на детекторе одновременно регистрировались спектры в четырех направлениях поляризации — 0°, 90° и 45°, 135°. Для подавления второго порядка решетки использовался блокирующий фильтр GS-17. Ширина щели составляла 2". В том же положении телескопа были сняты кадры плоских

полей, спектра сравнения и 3-точечного теста для исправления геометрии поля. Наблюдения проводились в серии из 10 экспозиций (300 с + 9 × × 600 с). Длительная суммарная экспозиция позволила добиться после сложения всех направлений поляризации высокого отношения сигнал—шум как в линиях, так и в континууме для наблюдаемого объекта. Эти спектральные данные использованы для декомпозиции профиля и представлены на рис. 5 (справа).

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Фотометрические данные

Для лучшей фотометрической точности, необходимой для исследований переменности АЯГ, мы использовали метод дифференциальной фотометрии относительно локальных стандартов в поле зрения объекта. Независимая обработка каждого кадра (см. детали в работе Уклеин и др., 2019) обеспечивает характерную погрешность фотометрических измерений 0^m.01-0^m.03. Вторичные стандарты приведены в статье (Уклеин и др., 2019). Кривые



Рис. 4. Моделирование кривых блеска методом JAVELIN для J0853+77 и VII Zw 244. Черными точками отмечены исходные наблюдательные данные с интервалами ошибок. Красные кривые описывают наиболее вероятную модель изменения излучения в эмиссионной линии с вычтенным континуумом, синие кривые — наиболее вероятную модель изменения излучения в континууме. Области, обозначенные бледно-красным и бледно-синим, соответствуют областям допустимых значений для моделей кривых блеска. Отсчет юлианских дат начинается с 1 января 2018 г.

блеска в континууме и линии для VII Zw 244 и J0853+77 представлены на рис. 2 (слева).

Для оценки временной задержки между двумя кривыми блеска для каждого объекта был применен метод с использованием кода JAVELIN (Цзу и др., 2016; Юй и др., 2020), реализованного на языке программирования Python. Полученные результаты в виде гистограмм представлены на рис. 2 (справа), где N — частота встречаемости наборов значений параметров при MCMC-сэмплировании. При моделировании использовалось 10 000 наборов значений параметров. Моделирование кривых блеска приведено на рис. 4. Полученные значения задержек составляют $\tau = 54.8^{+8.4}_{-9.4}$ дней для J0853+77 и $\tau = 30.7^{+2.1}_{-2.3}$ дней для VII Zw 244.

Спектральные данные

Спектральные данные VII Zw 244 и J0853+77 обработаны с использованием пакета, реали-

зованного в среде IDL¹ и предоставленного С.Н. Додоновым. Обработка данных подразумевает: учет bias, удаление следов космических частиц, коррекцию плоского поля, калибровку длин волн, вычитание линий ночного неба, коррекцию за пропускание атмосферы и спектрографа по спектрофотометрическим стандартам и извлечение в одномерный спектр.

Для наиболее корректной привязки абсолютных значений потоков спектры сворачивались с кривыми пропускания фильтров, используемых в фотометрических наблюдениях. Получаемые синтетические потоки в фильтрах калибровались на реальные фотометрические наблюдения, имеющие более высокую точность, чем спектральные, в смысле абсолютных значений. Таким образом, было достигнуто полное согласие абсолютных значений

¹ Interactive Data Language, https://www. harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL





Рис. 5. Декомпозиция профилей наблюдаемых эмиссионных линий. Верхняя панель: область линии $H\beta$ в спектре галактики VII Zw 244 и разложение области на гауссовы компоненты (слева) и область линии $H\alpha$ в спектре галактики J0853+77 и разложение на гауссовы компоненты (справа). Узкие компоненты линий [OIII], FeII и $H\beta$ для VII Zw 244 и линий [NII] и $H\alpha$ показаны пунктиром. Нижняя панель: профиль линии $H\beta$ в спектре галактики VII Zw 244 (слева) и линий H α в спектре галактики J0853+77 (справа) с вычтенными узкими компонентами. Красными и синими линиями показаны широкие гауссовы профили, смещенные в сторону положительных и отрицательных скоростей соответственно.

потоков, измеренных и в фотометрических, и в спектроскопических наблюдениях.

VII Zw 244

FeII

[0]]]]

Hβ

1.5

1.0

0.5

Flux, 10⁻¹⁵ erg/s/cm²/Å

Для анализа профиля линии $H\alpha$ в спектре J0853+77 использованы интегрированные спектрополяриметрические данные, дающие более высокое отношение сигнал—шум. Редукция данных включает стандартную процедуру для длиннощелевой спектроскопии: учет bias, плоского поля, геометрической коррекции вдоль и поперек щели, вычитания ночного неба, спектральной чувствительности прибора и спектральной калибровки длин волн. Метод наблюдений и редукция данных детально описаны в Афанасьев и Амирханян (2012).

После редукции полученных данных все 4 направления поляризации были сложены для получения интегрального распределения энергии по длинам волн. Однако исправление дисперсионной кривой и привязка спектра к абсолютным единицам оказались неудовлетворительными, из-за чего полный спектр не приводится. Данный спектр используется для анализа профиля линии $H\alpha$ (рис. 5). Абсолютные значения потоков восстановлены так же, как и в случае спектральных данных.

ОЦЕНКА МАСС СМЧД

Для оценки масс необходимо оценить скорости газа в BLR-области. Для этого первым шагом в анализе профиля эмиссионных линий было вычитание всех узких компонент и получение чистой широкой компоненты Н α для J0853+77 и Н β для VII Zw 244. Анализ профиля проведен методом мультигауссовой декомпозиции.

Разложенный профиль Н α для J0853+77 показан на рис. 5 (правая панель вверху). Как видно из рисунка, профиль наблюдаемой эмиссионной линии состоит из двух узких линий дублета [NII], узкой компоненты Н α и широкой компоненты Н α , описываемой двумя гауссовыми функциями. Ито-говый профиль широкой компоненты за вычетом узких линий представлен на рис. 5 (правая панель внизу). Рассчитаем второй момент скорости $\langle \vartheta^2 \rangle$ по широкому профилю линии Н α :

$$\langle \vartheta^2 \rangle = \frac{\sum \left(\vartheta - \langle \vartheta \rangle\right)^2 \times f\left(\vartheta\right)}{\sum f\left(\vartheta\right)},$$
 (2)

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 11 2020

где $f(\vartheta)$ — поток в линии в шкале скоростей ϑ , а первый момент скорости $\langle \vartheta \rangle$ определяется как

$$\langle \vartheta \rangle = \frac{\sum \vartheta \times f(\vartheta)}{\sum f(\vartheta)}.$$
 (3)

Тогда, скорость вращения газа в BLR в наблюдаемой линии $H\alpha$ для J0853+77 принимаем равной

$$\vartheta^2_{\mathrm{H}lpha} = \langle \vartheta^2 \rangle = 2.3 \times 10^6 \; \mathrm{Km}^2/\mathrm{c}^2.$$

Аналогичный анализ при помощи мультигауссовой декомпозиции был проделан и для наблюдаемой линии Н β в объекте VII Zw 244. Разложение профиля представлено на рис. 5 (левая панель вверху). Из профиля линии Н β вычтены узкие линии [OIII], FeII, а также вклад узкой компоненты Н β . Итоговый широкий профиль, описываемый двумя гауссианами, представлен на рис. 5 (левая панель внизу). Второй момент скорости был рассчитан по формуле (2). Оценка скорости газа в линии Н β для VII Zw 244 равна

$$\vartheta^2_{\mathrm{H}\beta} = \langle \vartheta^2 \rangle = 1.9 \times 10^6 \; \mathrm{Km}^2 / \mathrm{c}^2.$$

Теперь, определив скорость газа в области, излучающей наблюдаемую эмиссионную линию, и расстояние до излучающей области, определенное методом эхокартирования, оценим массу СМЧД для двух галактик по формуле (1). Безразмерный коэффициент *f* будем считать равным единице. Для галактики J0853+77 $M_{\rm SMBH} \sim 2.5 \times 10^7 \ M_{\odot}$. Для галактики VII Zw 244 измерение показало $M_{\rm SMBH} \sim 1.1 \times 10^7 \ M_{\odot}$.

До настоящей работы оценки масс СМЧД для данных объектов проводились лишь косвенными методами. Массу СМЧД в объекте J0853+77 оценили в статье Сю и Цхао (2007) по спектру из (Вэй и др., 1999), используя калибровочную зависимость "размер BLR-светимость" из статьи Каспи и др. (2000). Полученная оценка составила $M_{\rm SMBH} \sim 1.7 \times 10^8 \ M_{\odot}$, что отличается от приведенной в данной работе в ~7 раз. Такое отличие можно объяснить двумя факторами. Первый из них — недостаточное качество спектра, использованного в статье Сю и Цхао (2007), что не позволило провести детальный анализ профилей линий и определить скорость газа с минимальной ошибкой. Также существенной может быть неопределенность, вносимая определением светимости по спектральным данным, от чего в нашей работе мы ушли благодаря привязке спектральных данных к фотометрическим.

В статье (Тилтон и Шал, 2013) оценка массы СМЧД в галактике VII Zw 244 также получена косвенно с использованием калибровки "размер BLR-светимость" из работы (Бентц и др., 2009) и по спектральным данным из статьи (Боросон и Грин, 1992). Данная в статье оценка составила $M_{\rm SMBH} = (6.7 \pm 1.5) \times 10^7 \ M_{\odot}$. Эта оценка хоть и разнится с полученной в нашей работе в ~6 раз, однако близка в пределах интервала ошибок. Вероятно, спектры, данные в статье (Боросон и Грин, 1992), также не позволили провести детальный анализ профиля Н β .

Полученные характеристики исследованных в статье объектов — J0853+77 и VII Zw 244 — сведены в табл. 2. В таблице представлены значения задержки отклика в эмиссионных линиях τ , равные размеру области BLR в световых днях, скорость газа $\vartheta_{\text{line}}^2$, определенная по анализу профилей линий, а также оценки масс в единицах $\lg(M/M_{\odot})$, полученные в данной статье M_{SMBH} и в более ранних работах иных авторов $M_{\text{SMBH}}^{\text{calib}}$.

Эмпирическая зависимость "размер BLRсветимость" является одной из целей проведения программ по эхокартированию галактик. Светимость активного ядра при этом определяется либо в эмиссионной линии. либо на некоторой эффективной длине волны в континууме, свободном от эмиссионных линий. В табл. 2 приводится светимость двух исследованных галактик на длине волны 5100 А. Поток f_{λ} был интегрирован в диапазоне 5000-5200 ÅÅ в системе отсчета галактики и поделен на ширину окна интегрирования для получения монохроматической светимости. Предварительно из спектра в этой области было вычтено остаточное влияние профилей Н*β*, FeII и приблизительно постоянного [OIII]. Тогда светимость определяется как

$$\lambda L_{5100} = 4\pi D^2 f_{\lambda},$$

где *D* — расстояние до АЯГ. Постоянная Хаббла бралась равной $H_0 = 67.4$ (км/с)/Мпк. Вклад сралась равной $H_0 = 07.4$ (км/с)/ Мпк. Вклад галактики-подложки не вычитался. Светимость галактик составила $\lambda L_{5100} = 0.87 \times 10^{44}$ эрг/с для J0853+77 и $\lambda L_{5100} = 1.67 \times 10^{44}$ эрг/с для VII Zw 244. По полученным оценкам светимости на 5100 А были даны оценки болометрических светимостей галактик. Значение болометрической поправки ВС было взято из статьи (Ричардс и др., 2006): BC = 9.26. Оценки светимостей для галактик составили $L_{\rm bol} \approx 8.1 \times 10^{44}$ эрг/с для J0853+77 и $L_{\rm bol} \approx 15.5 \times 10^{44}$ эрг/с для VII Zw 244, что составило для галактик $0.27L_{\rm Edd}$ и $1.17L_{\rm Edd}$ (L_{Edd} — Эддингтоновская светимость) соответственно. Стоит отметить, что такое значение доли болометрической светимости от Эддингтоновской, во-первых, априори завышено из-за невычтенного вклада родительской галактики, а во-вторых, зависит от выбранного значения ВС. К примеру, используя значение BC = 7.79 из статьи (Кравчик и др., 2013), оценки светимостей получаются

Таблица 2. Оценки параметров центральных областей АЯГ. В таблице слева направо даны: название объекта, задержка отклика в эмиссионной линии τ в днях, квадрат скорости газа $\vartheta_{\text{line}}^2$, измеренный по профилю эмиссионной линии, светимость объекта на длине волны 5100 Å λL_{5100} , полученная оценка массы СМЧД M_{SMBH} и оценка массы СМЧД M_{SMBH} и оценка массы СМЧД $M_{\text{SMBH}}^{\text{calib}}$, данная в статьях *Сю и Цхао (2007) и **Тилтон и Шал (2013)

Объект	au, дни	$artheta_{ ext{line}}^2, 10^6 \ { m km}^2/{ m c}^2$	$\lambda L_{5100}, 10^{44}$ эрг/с	$M_{ m SMBH}, \lg(M/M_{\odot})$	$M_{ m SMBH}^{ m calib}, \lg(M/M_{\odot})$
J0853+77	$54.8^{+8.4}_{-9.4}$	2.3	0.87	$7.398\substack{+0.153\\-0.171}$	8.228*
VII Zw 244	$30.7^{+2.1}_{-2.3}$	1.9	1.67	$7.049^{+0.068}_{-0.075}$	$7.825^{+0.087**}_{-0.109}$

равными $0.22L_{Edd}$ для J0853+77 и $0.98L_{Edd}$ для VII Zw 244, что особенно критично в случае второй галактики. Однако в целом значения болометрической светимости для исследованных объектов получаются большими и близкими к критическим, что вызывает интерес к более тщательному исследованию АЯГ J0853+77 и VII Zw 244.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг галактик J0853+77 и VII Zw 244 в течение более двух лет на телескопах САО РАН с применением анализа JAVELIN позволил оценить размеры BLR-областей в ядрах этих активных галактик: $R_{\rm BLR} = c\tau$, равные $54.8^{+8.4}_{-9.4}$ и $30.7^{+2.1}_{-2.3}$ св. дней или $0.046^{+0.007}_{-0.008}$ и $0.026^{+0.002}_{-0.002}$ парсеков соответственно. По спектроскопическим данным, полученным на 6-м телескопе БТА САО РАН, были оценены скорости газа в BLR-областях. На основе новых наблюдательных данных были сделаны оценки масс сверхмассивных черных дыр в центрах галактик 2MASX J08535955+7700543 и VII Zw 244, равные $\lg(M/M_{\odot}) = 7.398^{+0.153}_{-0.171}$ и $\lg(M/M_{\odot}) = 7.049^{+0.068}_{-0.075}$ соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-12-00030 "Исследование геометрии и кинематики ионизированного газа в ядрах активных галактик методами поляриметрии". Авторы также благодарят В.Л. Афанасьева, А.Н. Буренкова и С.Н. Додонова за полезные дискуссии и замечания. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Афанасьев, Амирханян (V.L. Afanasiev and V.R. Amirkhanyan), Astrophys. Bull. 67, 438 (2012).

- 2. Афанасьев и др. (V.L. Afanasiev, V.R. Amirkhanyan, A.V. Moiseev, R.I. Uklein, and A.E. Perepelitsyn), Astrophys. Bull. **72**, 458 (2017).
- 3. Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), Astron. Lett. **31**, 194 (2005).
- 4. Афанасьев, Моисеев (V. Afanasiev and A. Moiseev), Baltic Astron. **20**, 363 (2011).
- 5. Афанасьев и др. (V. Afanasiev, E. Shablovinskaya, R. Uklein and E. Malygin), Astrophys. Bull. **76**, in print (2021).
- 6. Бентц и др. (M.C. Bentz, B.M. Peterson, H. Netzer, R.W. Pogge, and M. Vestergaard), Astrophys. J. **697**, 160 (2009).
- Бентц и др. (M.C. Bentz, K.D. Denney, C.J. Grier, et al.), Astrophys. J. 767, 149 (2013).
- 8. Блэндфорд, МакКи (R.D. Blandford and C.F. McKee), Astrophys. J. **255**, 419 (1982).
- 9. Боросон, Грин (Т.А. Boroson and R.F. Green), Astrophys. J. Suppl. Ser. **80**, 109 (1992).
- 10. Вэй и др. (J.Y. Wei, D.W. Xu, X.Y. Dong, and J.Y. Hu), AAPS **139**, 575 (1999).
- Емельянов, Фатхуллин (Е.V. Emelianov and T.A. Fatkhullin), 2019, https://doi.org/10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-223-228
- 12. Засов и др. (A.V. Zasov, A.S. Saburova, A.V. Khoperskov, and S.A. Khoperskov), Phys. Uspekhi **60**, 3 (2017).
- Заячек и др. (M. Zajaček, B. Czerny, M.L. Martinez-Aldama, M. Ralowski, A. Olejak, S. Panda, K. Hryniewicz, et al.), Astrophys. J. 896, 146 (2020).
- 14. Гебхардт и др. (K. Gebhardt, R. Bender, G. Bower, et al.), Astrophys. J. Lett. **539**, L13 (2000).
- 15. Каспи и др. (S. Kaspi, P.S. Smith, H. Netzer, D. Maoz, B.T. Jannuzi, and U. Giveon), Astrophys. J. **533**, 631 (2000).
- 16. Комаров и др. (V.V. Komarov, A.S. Moskvitin, V.D. Bychkov, et al.), Astrophys. Bull. **75**, 547 (2020).
- 17. Кравчик и др. (С.М. Krawczyk, G.T. Richards, S.S. Mehta, M.S. Vogeley, S.C. Gallagher, K.M. Leighly, N.P. Ross, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **206**, 4 (2013).
- Малыгин и др. (E. Malygin, R. Uklein, E. Shablovinskaya, A. Grokhovskaya, and A. Perepelitsyn), CoSka 50, 328 (2020).

- 19. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, A.E. Perepelitsyn, and D.V. Oparin), Exp. Astron. **50**, 199 (2020).
- 20. Петерсон (B.M. Peterson), PASP 105, 247 (2013).
- 21. Петерсон и др. (B.M. Peterson, L. Ferrarese, K.M. Gilbert, S. Kaspi, M.A. Malkan, D. Maoz, D. Merritt, H. Netzer, et al.), Astrophys. J. **613**, 682 (2004).
- 22. Ричардс и др. (G.T. Richards, M. Lacy, L.J. Storrie-Lombardi, P.B. Hall, S.C. Gallagher, D.C. Hines, X. Fan, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **166**, 470 (2006).
- 23. Сю, Цхао (Y. Xu and X.-W. Cao), СЈАА 7, 63 (2017).
- 24. Тилтон, Шал (E.M. Tilton and J.M. Shull), Astrophys. J. **774**, 67 (2013).
- 25. Уклеин и др. (R.I. Uklein, E.A. Malygin, E.S. Shablovinskaya, A.E. Perepelitsyn, and A.A. Grokhovskaya), Astrophys. Bull. **74**, 388 (2019).
- 26. Феррарэз, Мэррит (L. Ferrarese and D. Merritt), Astrophys. J. Lett. **539**, L9 (2000).

- 27. Хаас и др. (M. Haas, R. Chini, M. Ramolla, N.F. Pozo, C. Westhues, R. Watermann, V. Hoffmeister, and M. Murphy), AAP **535**, A73 (2011).
- 28. Хомаюни и др. (Y. Homayouni, J. Trump, K. Grier, Y. Shen, K. Brandt, G. Fonseca Alvarez, P. Green, J. Hernandez Santisteban, K. Ho, C. Kochanek, B. Li, D. Schneider, D. Starkey, K. Pan, and A. Oravetz), Astrophys. J. **901**, 55 (2020).
- 29. Цзу и др. (Y. Zu, C.S. Kochanek, S. Kozlowski, and B.M. Peterson), Astrophys. J. **819**, 122 (2016).
- 30. Черепащук, Лютый (A. Cherepashchuk and V. Lyutyi), Astrophys. Lett. **13**, 165 (1973).
- 31. Шэнь и др. (Y. Shen, C.J. Grier, K. Horne, W. N. Brandt, J.R. Trump, P.B. Hall, K. Kinemuchi, et al.), Astrophys. J. Lett. **883**, L14 (2019).
- 32. Юй и др. (Z. Yu, C.S. Kochanek, B.M. Peterson, et al.), MNRAS **491**, 6045 (2020).