

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ ИК-ЗАПАЗДЫВАНИЙ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В NGC 4151 В ТЕЧЕНИЕ 2010–2015 гг.

© 2019 г. В. Л. Окнянский^{1*}, В. И. Шенаврин¹, Н. В. Метлова¹, К. М. Гаскелл²

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Отдел астрономии и астрофизики, Университет Калифорнии, Санта Круз, США

Поступила в редакцию 26.09.2018 г.; после доработки 07.12.2018 г.; принята к публикации 25.12.2018 г.

Исследована корреляция между инфракрасным (JHK_L) и оптическим (B) потоками переменного ядра сейфертовской галактики NGC 4151, используя наши данные (частично опубликованные), а также опубликованные данные Робертс и Рамсти (2012), Гуо и др. (2014) и Шнулле и др. (2013, 2015) за период наблюдений 2010–2015 гг. Найденные запаздывания переменности потока в HKL относительно оптических вариаций совпадают в пределах точности измерений и равны примерно 37 ± 3 дням. Мы не подтвердили значительное уменьшение запаздывания для HKL в 2013–2014 гг., которое было найдено Шнулле и др. (2015), но обнаружили, что компонент с коротким запаздыванием в J усилился. Мы обсуждаем наши результаты в рамках стандартной модели, где переменное инфракрасное излучение связано, главным образом, с тепловым переизлучением коротковолнового излучения пылевыми облаками, близкими к переменному центральному источнику. Существует также некоторый вклад в ИК-эмиссию от аккреционного диска, причем этот вклад увеличивается с уменьшением длины волны. Переменность в J и K происходит не совсем синхронно, что, возможно, связано с различным вкладом излучения аккреционного диска в этих фильтрах. Отсутствие изменений ИК-запаздывания с длиной волны (HKL) можно объяснить тем, что пылевые облака в течение 2010–2015 гг. были локализованы дальше, чем радиус области возможной сублимации. Относительная независимость ИК-запаздывания от длины волны также согласуется с моделью полого биконического истечения пылевых облаков (Окнянский и др., 2015).

Ключевые слова: NGC 4151, ИК и оптическая переменность, кросс-корреляционный анализ, пылевой тор.

DOI: 10.1134/S0320010819040065

ВВЕДЕНИЕ

Ядро NGC 4151 — одно из самых исследованных активных ядер галактик (АГЯ), благодаря своей яркости и значительной переменности во всех диапазонах, за исключением радиодиапазона. Объект интенсивно исследуется с момента открытия переменности в 1967 г. (Фитч и др., 1967). Для него получены наиболее продолжительные среди АГЯ исторические кривые блеска на основе фотографических архивных данных, начиная с 1906 г. (Окнянский, 1978, 1983; Окнянский и др., 2016; Пахольчик, 1971) и фотоэлектрических наблюдений (в основном наблюдений В.М. Лютого). Отметим, что имеется некоторое количество ИК и оптических фотоэлектрических наблюдений до 1967 г. (см. ссылки в Окнянский, 1993; Окнянский, Лютый, 2007; Окнянский и др., 2016). Переменность

этого объекта была обнаружена еще в 1958 г. по фотоэлектрическим наблюдениям, но эти результаты были опубликованы лишь 10 лет спустя (де Вокулер, де Вокулер, 1968), когда переменность объекта была уже установлена. Этот объект входит также в список объектов, наблюдавшихся Сейфертом (1943), а первые спектральные наблюдения были проведены еще 100 лет назад (Кэмпбелл, Мур, 1918). Черепашук и Лютый (1973) открыли переменность широких эмиссионных линий в NGC 4151, а также сделали первое измерение запаздываний в переменности АГЯ.

С момента открытия переменности квазаров в 1963 г. астрономы пытались ввести какой-то порядок в разнообразие типов АГЯ. Хачикян и Видман (1971) условно разбили все АГЯ на два типа: тип 1 — это объекты, где есть очень широкие эмиссионные линии (с доплеровской полушириной от нескольких до ~ 10 тыс. км/с) и относительно узкие

*Электронный адрес: oknyan@mail.ru

эмиссионные линии с полушириной до 2000 км/с; тип 2 — АГЯ, в спектре которых наблюдаются только относительно узкие эмиссионные линии. Ядро NGC 4151 было названо типичным объектом первого типа или Sy1, а ядро NGC 1068 — типичным объектом второго типа или Sy2. Прорыв был совершен в 80-е гг. прошлого века, когда благодаря работе Кил (1980) оказалось, что вид оптического спектра АГЯ коррелирует с ориентацией. Вскоре появилась так называемая унификационная модель АГЯ, которая в упрощенном виде постулирует, что АГЯ типов 1 и 2 — фактически одни и те же объекты, наблюдательные свойства которых различаются только из-за различной ориентации к наблюдателю. Эта модель после работы Антонуччи (1993) носит название “модели соломенного человека” или сокращенно SPM. Важнейшим элементом SPM является гипотеза о существовании оптически толстого пылевого тора, имеющего облачную структуру (Хониг, Кишимото, 2011). Наличие такого тора является ключевым моментом для объяснения поглощения излучения в широких линиях и наблюдаемого различия спектров сейфертовских ядер типов 1 и 2. Несмотря на значительный успех этой модели, у нее есть и проблемы. В частности, в 1984 г. было обнаружено, что типичное ядро первого типа NGC 4151 изменило свой тип от Sy1 к Sy2 (Лютый и др., 1984; Пенстон, Перес, 1984; Чуваев, Окнянский, 1989), а затем снова вернулось спустя время в состояние Sy1 (Окнянский и др., 1991). В настоящее время стало известно несколько десятков таких случаев смены типа АГЯ, что позволяет сделать вывод о том, что это не какое-то исключительно явление одноразового типа, а достаточно типичное событие для переменных АГЯ. Очевидно, что ориентация объекта не может меняться так быстро, и эти факты являются серьезной проблемой для унификационной модели. Форма и структура пылевых торов не исследованы достаточно хорошо в настоящее время. Хотя этот тор обычно изображается на схемах и рисунках в виде толстого кольца, проведенные ИК-наблюдения с высоким разрешением ряда АГЯ, показали, что пылевые облака, преимущественно излучающие в дальнем и среднем ИК-диапазонах, концентрируются не в плоскости галактики или аккреционного диска, как ожидалось, а в полярных областях (Браатз и др., 1993; Камерон и др., 1993; Бок и др., 2000; Хониг и др., 2012). Считается общепринятым, что ИК-излучение АГЯ главным образом связано с тепловым излучением пыли в газово-пылевых облаках, а нагрев пыли происходит за счет излучения самых внутренних частей аккреционного диска, которое энергетически доминирует в УФ. Основным методом изучения структуры области пылевых облаков является эхо-анализ на основе данных ИК и оптической (УФ) переменности, а именно на основе

измерения времени запаздывания переменности в ИК-области относительно вариаций в оптической и/или УФ-областях спектра.

NGC 4151 было первым АГЯ, для которого такое запаздывание было сначала предположено на основе визуального анализа кривых блеска (Пенстон и др., 1971), а затем измерено на основе кросс-корреляционного анализа рядов наблюдений (Окнянский, 1993; Окнянский и др., 1999). Первое измерение величины запаздывания переменности в фильтре K относительно оптической в NGC 4151 дало значение 18 дней (Окнянский, 1993). В фильтре L (в том же интервале времени и на основе тех же данных) запаздывание оказалось больше — 26 дней (Окнянский, Хорн, 2001). Оказалось, что величина запаздывания в NGC4151 меняется в зависимости от уровня светимости центрального источника, причем это происходит с некоторым запаздыванием около нескольких лет (Окнянский и др., 2008; Кишимото и др., 2013). Это запаздывание было интерпретировано как следствие пространственной удаленности пыли, нагреваемой переменным излучением центрального источника. Изменение величины запаздывания может происходить в результате процессов сублимации и восстановления пыли при изменениях уровня УФ-излучения ядра. В настоящее время такие исследования проведены для нескольких десятков АГЯ. Большой интерес представляет исследование зависимости величины запаздывания от длины волны в ИК-диапазоне. Для NGC 4151 в наших первых публикациях (Окнянский и др., 1999; Окнянский, 2002; Окнянский, Хорн, 2001) по определению ИК-запаздывания было отмечено, что запаздывание в фильтре L значительно (в разы) больше запаздывания в K . После яркой вспышки ядра в 1996 г. ИК-запаздывания значительно выросли, и при этом запаздывания в K и L практически не отличались в пределах точности измерений (Окнянский и др., 2006). В наших предыдущих работах (Окнянский и др., 2014a, b) мы обнаружили, что запаздывания во всех ИК-фильтрах $JHKL$ совпадают в пределах точности измерений. Проведенный нами анализ опубликованных фотометрических данных для ряда других АГЯ показал, что относительная независимость величины запаздывания от длины волны в ИК-диапазоне является скорее правилом, чем исключением (Окнянский и др., 2015). Мы предположили, что значительный рост величины ИК-запаздывания с длиной волны может наблюдаться в период значительного роста светимости центрального источника, когда происходят сублимация пыли и увеличение запаздывания. С учетом отставания на несколько лет изменений величины запаздываний, рост величины ИК-запаздываний с длиной волны может наблюдаться

через некоторое время после значительной вспышки в светимости. Более типичным случаем является ситуация, когда пылевые облака находятся дальше области возможной сублимация пыли при текущем уровне светимости. Очевидно, что для большинства объектов реализуется именно эта ситуация, когда значительные вспышки светимости были в прошлом, а не в исследуемом интервале времени.

Возможность определения космологических констант на основе запаздывания инфракрасной переменности была впервые упомянута Кобаяши и др., (1998) и была независимо предложена, а также реализована Окнянским (1999, 2002). В недавних публикациях Ешии и др. (2014), Хониг (2014), Хониг и др. (2014) и Кошида и др. (2017) этот метод рассмотрен детально и применен на практике (см. также обсуждение в Окнянский и др., 2014b). Относительная независимость ИК-запаздываний от длины волны для большинства АГЯ важна при практическом применении этого метода, так как уменьшает проблему, связанную со смещением длин волн излучения АГЯ в зависимости от красного смещения (для небольших $z \leq \sim 0.2$). Недавнее применение этого метода для определения расстояния до NGC 4151 показало, что объект находится значительно дальше, чем это считалось ранее (Хониг и др., 2014).

Данная работа является продолжением нашей серии работ по исследованию ИК-запаздываний ближней ИК-переменности относительно оптической переменности ядра NGC 4151 на основе наших новых мониторинговых наблюдений в ИК-фильтрах *JHKL* в сочетании с фотоэлектрическими и ПЗС-измерениями в оптическом диапазоне в течение 2010–2015 гг. (см. подробный обзор исследований, описание методов наблюдений и анализа данных в нашей предыдущей публикации Окнянский и др., 2014а). Дополнительно использованы опубликованные ИК и оптические данные Шнулле и др. (2015), которые помогли сделать кривые блеска более полными и соответственно провести более надежное определение ИК-запаздываний. В отличие от предыдущих публикаций, для анализа временных рядов, кроме нашего кода MSSF (см. подробности в прошлых публикациях), использован также популярный в последнее время метод JAVELIN, основанный на численном моделировании кривых блеска в виде марковских процессов (Зу и др., 2013).

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Методика ИК-наблюдений в фильтрах *JHKL* была подробно описана нами в предыдущих публикациях (см., например, Таранова, Шенаврин, 2013). В данном исследовании мы используем

наши наблюдения только для интервала 2010–2015 гг., которые опубликованы до 2011 г. включительно в табличном виде (Таранова, Шенаврин, 2013), а до 2015 г. — в открытом доступе в архиве <http://www.sai.msu.ru/basa/inf.html>. В предыдущих работах мы проводили анализ для 2008–2013 гг. (Окнянский и др., 2014а, b). Аналогично в данной работе мы добавили новые наблюдения за 2013–2015 гг., а также объединили их с опубликованными ИК и оптическими данными Шнулле и др. (2013, 2015). Эти дополнительные данные существенно улучшили кривые блеска в исследуемом интервале. Данные за 2008–2009 гг. не были включены в данное исследование ввиду их немногочисленности и меньшей точности. Кроме того, в отличие от прошлых публикаций, мы не включили в исследование данные оптической фотометрии, полученные (в основном в 2009 г.) на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории, из-за невозможности надежно согласовать эти данные с нашими измерениями (в 2009 г. оптическая фотометрия объекта нами не проводилась). Большая часть инфракрасных наблюдений имеет точность не хуже 1–2%. Точность наших ИК-измерений стала выше в исследуемом интервале по сравнению с прошлыми публикациями, что объясняется рядом модернизаций аппаратуры. В редких случаях ошибки измерений были больше, но для дальнейшего анализа мы используем только измерения с ошибками не хуже 7%. Всего для периода 2010–2015 гг. мы использовали 66, 54, 54, 66 средних за ночь наших измерений соответственно в фильтрах *J*, *H*, *K* и *L*. Наши данные в фильтрах *JHK* были дополнены измерениями Шнулле и др. (2013, 2015) — 29 дат за 2010–2014 гг. Мы редуцировали эти данные в нашу систему. Методика оптических фотоэлектрических наблюдений осталась такой же, что применялась В.М. Лютым до 2008 г. включительно (Окнянский и др., 1999), но дополнительно были использованы ПЗС-измерения на 60-см телескопе Южной станции ГАИШ (см. описание в Окнянский и др., 2012). Поскольку в ПЗС-измерениях отсутствуют наблюдения в фильтре *U*, то мы использовали данные в фильтре *B* для построения сводной оптической кривой блеска. ПЗС-наблюдения были редуцированы в систему фотоэлектрических измерений с апертурой 27". Наши данные, как и в предыдущих работах (Окнянский и др., 2014а, b, 2015), были дополнены опубликованными ПЗС-измерениями в фильтре *B*: 12 дат (Робертс, Рамсти, 2012) и 17 дат (Гуо и др., 2014), которые были редуцированы в нашу систему. Дополнительно мы использовали оптические измерения Шнулле и др. (2013, 2015) в красном фильтре *z* (29 дат), которые также были редуцированы в нашу систему *B*.

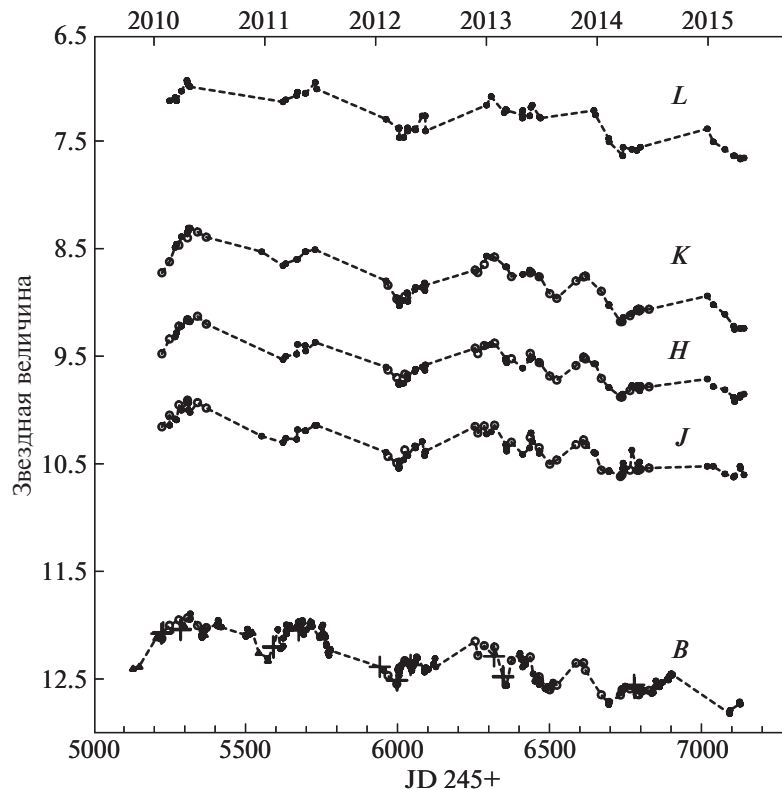


Рис. 1. Сводные кривые блеска в ИК-фильтрах *JHKL* и оптическом *B* в 2010–2015 гг. В ИК-кривых блеска: заполненные кружки — наши данные, открытые кружки — данные Шнулле и др. (2013, 2015). В кривой блеска *B*: точки — наши крымские фотозлектрические и CCD-измерения, треугольники — редуцированные данные Робертс, Рамсти (2012), крестики — редуцированные даны Гуо и др. (2014), открытые кружки — редуцированные данные Шнулле и др. (2015).

Таким образом, все оптические и ИК-данные сведены в одну систему. Формальная точность фотозлектрических измерений в основном не хуже 1–2%, но возможны систематические расхождения между измерениями, полученными на разных инструментах. По нашим оценкам эти ошибки не превышают 10%. Всего в сводной оптической кривой блеска 197 дат измерений величины *B*. Сводные кривые блеска NGC 4151 для 2010–2015 гг. в фильтрах *JHKL* и *B* представлены на рис. 1. Как это видно на рис. 1, вариации блеска в фильтрах *JHKL* происходили практически синхронно, без каких-либо заметных на глаз отличий или сдвигов. В фильтре *L* меньше точек, так как у Шнулле и др. (2015) нет наблюдений в этом фильтре. В изменениях присутствуют быстрые вариации (с характерным временем десятки дней) и долговременный тренд (с характерным временем несколько лет или более) с максимумом примерно в начале интервала. В оптической кривой блеска также наблюдаются быстрые и медленные изменения с теми же характерными временами, причем медленный тренд более заметен, чем в ИК-кривых

блеска. Кроме того, в оптической переменности заметны быстрые изменения небольшой амплитуды с характерным временем порядка нескольких дней. В течение всего интервала времени наблюдаемая амплитуда переменности в *B* была около $0^m.93$, тогда как известная по историческим кривым блеска (Окнянский и др., 2016) амплитуда переменности составляет почти 2^m . В то же время в начале интервала наблюдался блеск ярче 12^m , что позволяет говорить о высокой активности объекта в это время. В интервале 2010–2015 гг. яркость объекта в среднем ослабевала, но при этом наблюдалась переменность на временах порядка нескольких месяцев. Оценку вклада галактики в диафрагме $27''$ в данной работе мы не проводили, так как этот вклад не имеет значения для проведения кросс-корреляционного анализа. К тому же оценки этого вклада делались ранее, в частности в работе Лютого и Дорошенко (1999). Если взять из этой работы значение блеска галактики $B = 12.91$, то в исследуемом нами интервале вклад ядра галактики при минимальных значениях $B = 12^m.81$ составлял около 10% регистрируемого потока в *B* и $\sim 1/9$ от

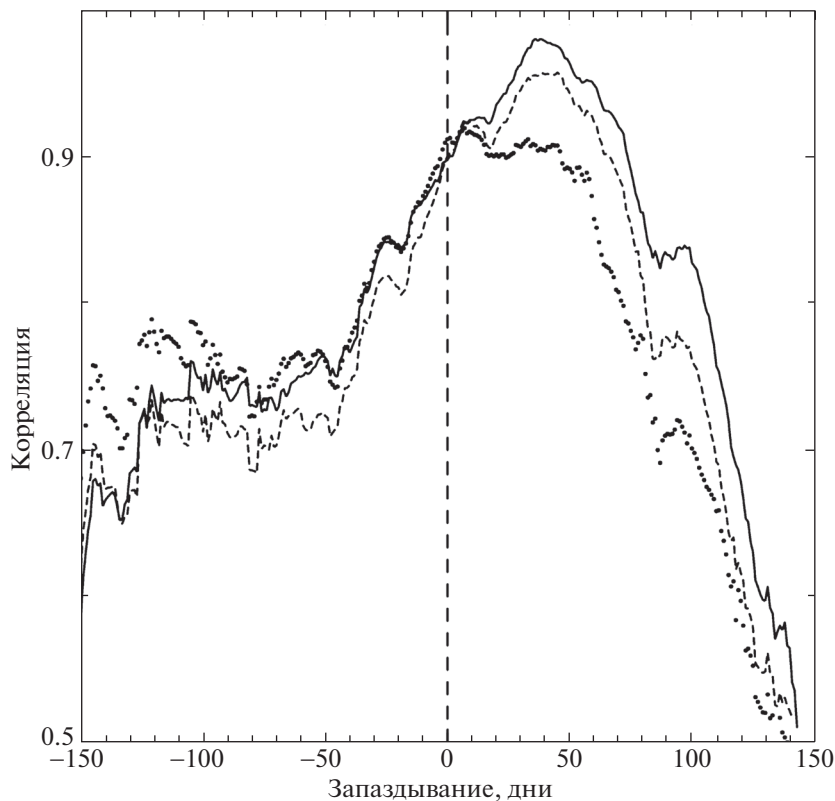


Рис. 2. Кросс-корреляционные функции для K (сплошная линия), H (пунктирная линия), J (точки) и B в интервале 2010–2015 гг. Вертикальная пунктирная линия отмечает нулевое запаздывание.

вклада галактики. При максимальном блеске около $B = 11^m.88$ вклад ядра галактики был в ~ 1.5 раза ярче, чем вклад галактики. Таким образом, поток излучения от центрального источника в B менялся более чем в 13 раз за время наблюдений в интервале 2010–2015 гг. Известно, что нагрев пыли осуществляется, главным образом, УФ-излучением, но мы предполагали, что вариации УФ и оптического излучения происходят синхронно (Эделсон и др., 2017), причем запаздывание оптической переменности относительно УФ незначительно (~ 0.5 дня).

Мы планируем опубликовать в табличном виде все используемые ИК и оптические наблюдения в самое ближайшее время.

МЕТОДИКА КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Кросс-корреляционный анализ астрономических временных рядов представляет определенную сложность ввиду их неравномерности. Для анализа рядов мы применяли наш код МССФ, который является, по сути, модернизацией метода Гаскелл и Спарк (1986). Методика нашего анализа не изменилась, и описана в деталях в предыдущих

публикациях (см., например, Окнянский и др., 2014a,b, 2017). В методе МССФ мы стремимся вводить минимальное количество произвольных параметров, а также существенно сокращаем вклад, вносимый ошибками интерполирования. Подробное обсуждение других методов кросс-корреляционного анализа неравномерных рядов, и их сравнение с методом МССФ были сделаны в наших предыдущих работах (Окнянский и др., 2014a,b, 2017).

В данной работе мы дополнительно проводили также анализ рядов популярным в последние годы методом JAVELIN (Зу и др., 2011, 2013). Дополнительные детали и ссылки могут быть взяты в работе Окнянского и др. (2017). Метод JAVELIN — не совсем обычный метод кросс-корреляционного анализа. В этом методе проводится моделирование кривых блеска 10 000 раз на основе предположений о свойствах переменности АГЯ (см., например, Гаскелл, Питерсон, 1987), а затем находятся запаздывания для каждой пары этих смоделированных кривых блеска. По найденным таким образом запаздываниям строится гистограмма, которая используется для нахождения оптимального запаздывания и его погрешности (см., например, Шап-

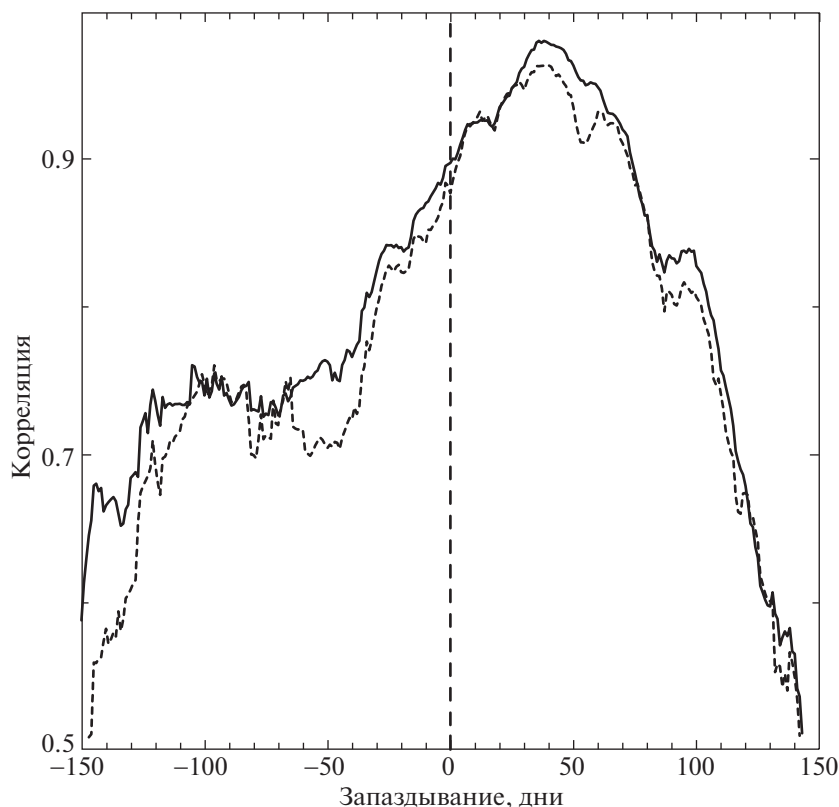


Рис. 3. Кросскорреляционные функции для L (пунктирная линия), K (сплошная линия) и B в интервале 2010–2015 гг. Вертикальная пунктирная линия отмечает нулевое запаздывание.

пии и др., 2014; Зу и др., 2011, 2013). Разумеется, этот метод имеет те же проблемы, что и любые методы с интерполированием и экстраполированием рядов. Тем не менее этот метод часто используется в последнее время и обычно дает сходные с другими методами результаты. Мы решили использовать этот метод в качестве дополнительного контроля наших результатов, даваемых методом МССФ, причем без каких-либо изменений в авторском коде. В дальнейшем мы планируем провести модернизацию JAVELIN, аналогичную той, что была сделана в методе МССФ для уменьшения вклада ошибок интерполирования при моделировании кривых блеска с большими пробелами.

КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА

Кросс-корреляционные функции МССФ для сводной кривой блеска в B и переменности в ИК-фильтрах $JHKL$ в 2010–2015 гг. представлены на рис. 2, 3. Видно, что основной максимум для всех этих кросс-корреляционных функций находится в области ~ 37 дней. Величина запаздывания переменности в K относительно оптической осталась

почти такой же, как было найдено нами для интервала 2008–2013 гг. Так же как и в предыдущей публикации, запаздывания в пределах точности измерения около трех дней (см. следующий раздел) практически не зависят от длины волны. В то же время заметно отличается вид кросс-корреляционных функций в области около нулевого запаздывания. Там можно отметить вторичный максимум, причем значимость его падает вдоль последовательности $JHKL$. Для J этот максимум приходится примерно на 4–6 дней. Этот максимум, возможно, связан с переменностью аккреционного диска в ИК. На рис. 4 приведены результаты анализа методом JAVELIN. Из сравнения рис. 2, 3 и 4 видно, что оба метода дают примерно одинаковые результаты. Плотность наблюдений, к сожалению, недостаточна для проведения анализа в более коротких интервалах времени, за исключением интервала 2013–2014 гг., где оптические и ИК-данные более однородны. Кросс-корреляционные функции МССФ для сводных кривых блеска в B и JHK для этого интервала приведены на рис. 5. Максимумы в кросс-корреляционных функциях для K и H остались примерно там же, что и на рис. 2, но значения корреляции в максимумах

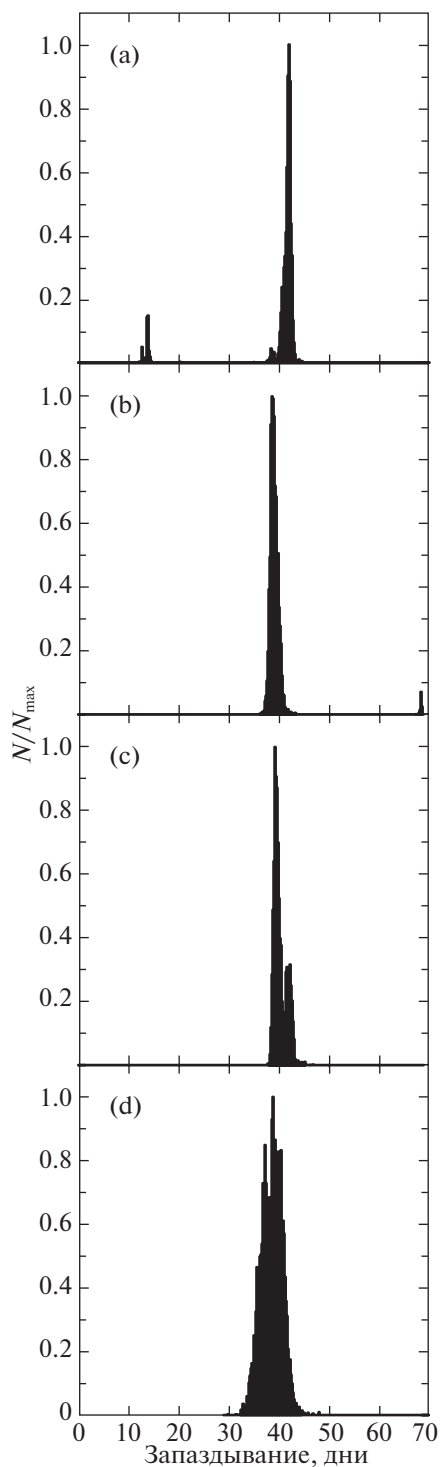


Рис. 4. Гистограммы запаздываний, полученные методом JAVELIN для $JHKL$ (соответственно на рисунках a, b, c, d) от V в интервале 2010–2015 гг. Гистограммы нормированы делением на максимальные значения.

стали больше. В кросс-корреляции между J и V есть изменения: максимум на кросс-корреляции сместился в область коротких запаздываний. Для фильтра L вычисления в этом интервале проводи-

лись, но не показаны, хотя никаких существенных изменений нет по сравнению с рис. 3. Независимый анализ данных в этом интервале методом JAVELIN дал аналогичные результаты (рис. 6). Наш анализ не подтвердил результат Шнулле и др. (2015) об уменьшении запаздывания в этом интервале для фильтров K и H , но для фильтра J запаздывание стало заметно меньше.

На рис. 7 показаны кривые блеска в B и K , где точки K были сдвинуты с учетом запаздывания 38 дней (где был формально наибольший коэффициент корреляции) и редуцированы в соответствии с коэффициентами линейной регрессии в шкалу B измерений. Визуальный анализ показывает хорошее согласие переменности в этих двух фильтрах с учетом сдвига, а также не выявляет связи найденного запаздывания с каким-нибудь одним случайным событием в кривых блеска. Переменности в B и K достаточно хорошо согласуются во всем интервале и в нескольких характерных моментах изменений блеска.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для оценки погрешностей определения величин запаздывания методом МССФ мы применили ту же методику Монте-Карло симуляций, что и ранее (см. детали в Окнянский и др., 1999, 2014a,b). Наши оценки погрешности величины запаздывания дают значение около трех дней. Таким образом, запаздывания в фильтрах HKL относительно B составляют 37 ± 3 дней.

Гистограммы, получаемые в методе JAVELIN, могут быть использованы для оценки оптимальных запаздываний (τ_{JAVELIN}) и их среднеквадратичных погрешностей (см., например, подробности в Шаппи и др., 2014; Зу и др., 2013).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа является продолжением серии наших исследований корреляции инфракрасной и оптической переменности в NGC4151, а также переменности величин ИК-запаздываний и их зависимости от длины волны (Окнянский, 1993; Окнянский и др., 1999, 2006, 2008, 2014a,b). В этих работах было найдено, что величина запаздывания в фильтре K различна в разных состояниях активного ядра, а также, что отношение величин запаздываний в фильтрах L и K значительно меняется в пределах 1–3. Полученные в этих работах результаты были частично независимо подтверждены в других исследованиях (Кошида и др., 2009; Кишимото и др., 2013; Шнулле и др., 2013; Хониг, Кишимото, 2011).

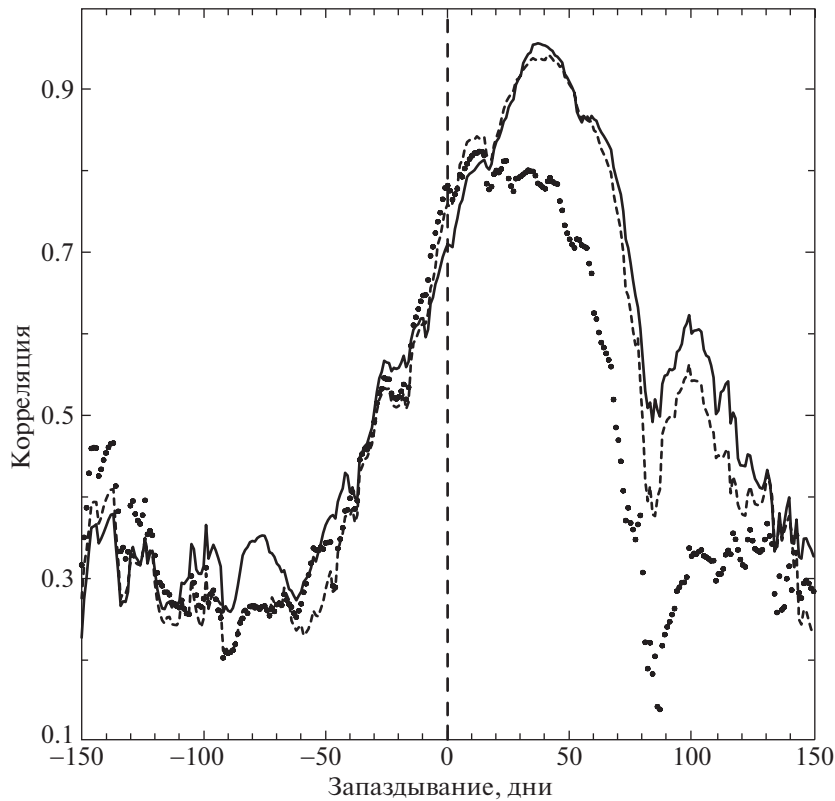


Рис. 5. Кросскорреляционные функции для K (сплошная линия), H (пунктирная линия), J (точки) и B в интервале 2012–2014 гг. Вертикальная пунктирная линия отмечает нулевое запаздывание.

В настоящее время имеются ИК и оптические кривые блеска объекта за десятки лет. Использование всех этих данных вместе для исследования ИК-запаздываний не привело бы к лучшей статистике по ряду причин. Во-первых, данные неоднородны, во-вторых, за это время происходили значительные вариации светимости ядра, в-третьих, сами величины запаздываний и форма функций отклика значительно менялись. Нашей задачей было, наоборот, получить оценки запаздываний в как можно более коротких интервалах времени.

Подробный исторический обзор и обсуждение полученных ранее результатов приведены в нашей предыдущей публикации (Окнянский и др., 2014а). В данной работе мы на более полном наблюдательном материале, применяя два независимых метода анализа, подтвердили относительную независимость ИК-запаздываний от длины волны в течение 2010–2015 гг. Мы не подтвердили отмеченного Шнулле и др. (2015) заметного уменьшения величины запаздываний в 2013–2014 гг. для фильтров H и K , но обнаружили заметные изменения для фильтра J , что может быть связано с относительно большим вкладом переменности аккреционного диска в этом фильтре при сильном ослаблении

светимости ядра. Относительная независимость HKL запаздываний от длины волны может быть связана с тем фактом, что радиус, на котором могла бы происходить сублимация пыли, меньше, чем расстояние до ближайших к центру ядра облаков с пылью. В самом деле, если радиус сублимации $\sim L_{UV}^{-1/2}$, то, по сравнению с максимумом в 1996 г., УФ-светимость в течение 2010–2015 гг. была не менее чем в 10 раз меньше (амплитуда переменности в УФ, возможно, даже больше, чем в оптике). Соответственно, если запаздывание в K было около 70–100 дней (Окнянский и др., 2008; Кишимото и др., 2013) после вспышки в 1996 г., то в 2010–2015 гг. радиус сублимации был меньше 20–30 световых дней. Это означает, что пылевые облака локализованы дальше радиуса, где могла бы происходить сублимация. Этим могут объясняться наблюдаемая относительная независимость запаздываний от длины волны и отсутствие значительной переменности величин запаздываний при изменениях светимости в 2003–2015 гг. (Окнянский и др., 2008, 2014 а, б; Шнулле, 2013; Хониг, Кишимото, 2011). Таким образом, восстановление пыли после вспышки в 1996 г. привело к уменьшению величины запаздывания более чем в

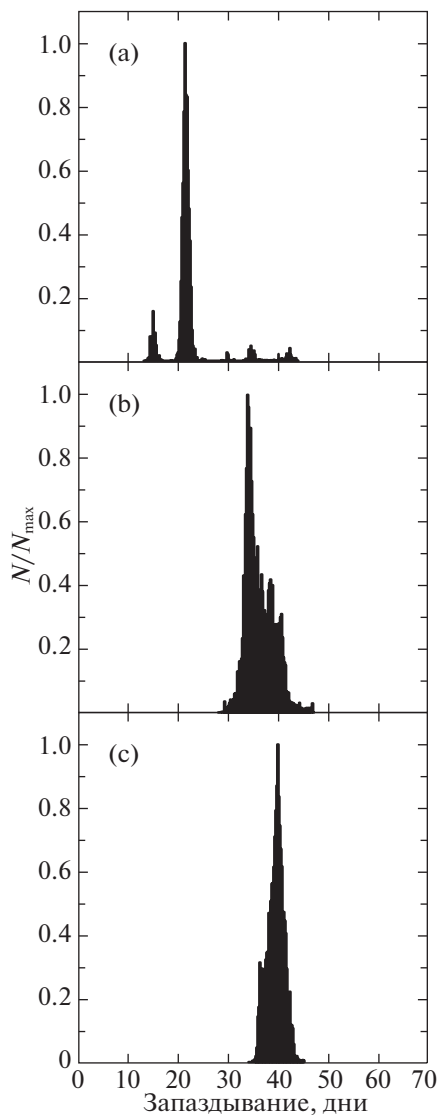


Рис. 6. Гистограммы запаздываний, полученные методом JAVELIN для *JHK* (соответственно на рисунках a, b, c) от *B* в интервале 2012–2014 гг. Гистограммы нормированы делением на максимальные значения.

2 раза, но на расстояниях ближе чем 30 световых дней пыль не восстановилась. По-видимому, при сильных вспышках ядра пыль была полностью сублимирована до радиуса 30–40 световых дней. В более далеких областях пыль смогла частично сохраниться в более плотных внутренних частях облаков (Барвейнис, 1992). Там, где пыль частично сохранилась, она быстрее восстанавливается при падении светимости. На более близких к центру расстояниях восстановление пыли требует больше времени, так как она была там полностью сублимирована во время очень яркой и длительной вспышки в 1996 г.

Относительная независимость ИК-запаздыва-

ний от длины волны может быть объяснена также в предложенной нами ранее модели биконического истечения пылевых облаков (Окнянский и др., 2015; Гаскелл, Харрингтон, 2018). В этом случае пылевые облака, излучающие в ИК-диапазоне, могут иметь разную температуру пыли, находясь на разных расстояниях от центрального источника, но при этом запаздывания переменности ИК-излучения от этих облаков будут примерно одинаковыми. Эта интерпретация может также сочетаться с первым объяснением, то есть пылевые облака движутся от центра в биконических областях, но при этом расположены дальше, чем текущий радиус зоны сублимации. В этой модели находит естественное объяснение изменение спектрального типа ядра при образовании новой пыли в облаках на луче зрения при ослаблении УФ-излучения. Проведенные в последние годы ИК интерферометрические наблюдения АГЯ (Хониг и др., 2012; Хониг, Кишимото, 2017; Лопез-Гонзага, 2016; Лефтлей и др., 2018) обнаружили, что излучающие ИК-облака преимущественно вытянуты вдоль полярных областей, а не расположены в плоскости аккреционного диска, где предположительно расположен газопо-пылевой тор.

Еще одной возможностью объяснить относительную независимость запаздываний от длины волны является возможность того, что пылинки могут иметь разную температуру в зависимости от их размера, и при этом иметь одинаковую локализацию. Аналогично в модели Ненковой (2008a,b) температура в газопылевых облаках может быть неоднородной, поэтому каждое облако излучает в широком ИК-диапазоне, что может значительно ослаблять зависимость ИК-запаздываний от длины волны (см. также обсуждение этой проблемы в Вазкуез и др., 2015; Хониг, Кишимото, 2011; Позо Нуньес, 2014).

В последние несколько лет (после публикации Окнянский и др., 2014a) был проведен ряд исследований, в которых были получены новые результаты об относительной независимости ИК-запаздываний от длины волны в АГЯ и обсуждены различные модели для интерпретации этих результатов (Окнянский и др., 2015; Вазкуез, 2015; Вазкуез и др., 2015; Алмейда и др., 2017). Наиболее детальный теоретический анализ с привлечением различных эффектов, связанных с геометрией и структурой эмиссионной области, анизотропии УФ-излучения, ориентации облаков, проведен Алмейда и др. (2017). При учете анизотропии поля излучения АГЯ, радиус сублимации пыли является функцией полярного угла, и область, в которой отсутствует пыль, является не шаром, а скорее напоминает в разрезе восьмерку (см. рис. 10 в Алмейда и др., 2017). В этом случае пылевые облака могут

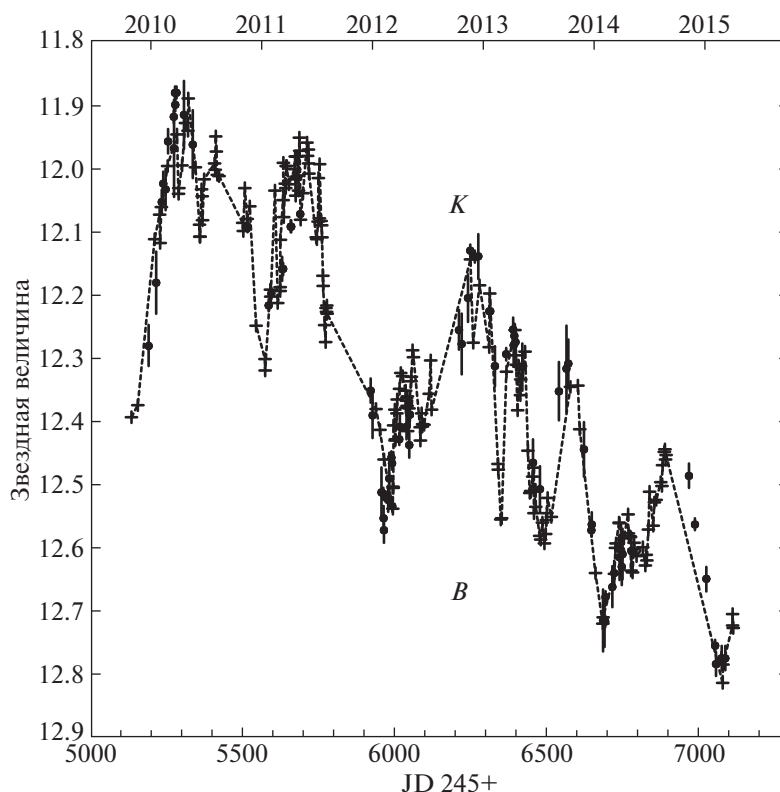


Рис. 7. Кривые блеска в V и K , где точки K (точки) сдвинуты с учетом запаздывания 38 дней и редуцированы в шкалу V величин (крестики, пунктирная линия), используя линейную регрессию.

находиться ближе к источнику возле экваториальной плоскости, в отличие от ситуации изотропного излучения центрального точечного источника. Моделирование функций отклика в различных ИК-длинах волн показало, что запаздывания в них в большинстве случаев не меняются значительно с длиной волны. Отметим, что все эти различные интерпретации относительной независимости ИК-запаздываний от длины волны могут быть согласованы в одной модели, так как модель биконических истечений пылевых облаков предполагает наличие тора, а также эффектов анизотропии излучения, эффектов ориентации облаков, существования дисперсии температуры пылевых частиц в отдельно взятом облаке. Создание самосогласованной модели ИК-излучения вблизи активного ядра выходит за рамки данной статьи. Отметим необходимость дальнейших интенсивных исследований ИК-переменности АГЯ, которые имеют важнейшее значение для понимания физики этих объектов, а также имеют космологические применения.

Мы благодарны С. Хонигу за полезные обсуждения и Д.-Ф. Гуо за предоставление данных оптической фотометрии.

Работа посвящена памяти Ольги Георгиевны Тарановой (1938–2017), нашего соавтора во мно-

гих публикациях об ИК-переменности NGC 4151 в течение десятков лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмейда и др. (T. Almeyda, A. Robinson, M. Richmond, B. Vazquez, and R. Nikutta), *Astrophys. J.* **843**, 3 (2017).
2. Антонуччи (R.R.J. Antonucci), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 473 (1993).
3. Барвейнис (R. Barvainis), *Astrophys. J.* **400**, 502 (1992).
4. Бок и др. (J.J. Bock, G. Neugebauer, K. Matthews, B.T. Soifer, E.E. Becklin, M. Ressler, K. Marsh, M.W. Werner, E. Egami, and R. Blandford), *Astron. J.* **120**, 2904 (2000).
5. Браатз и др. (J.A. Braatz, A.S. Wilson, D.Y. Gezari, F. Varosi, and C.A. Beichman), *Astrophys. J.* **409**, L5 (1993).
6. Вазкюз (B. Vazquez), *Constraining the size of the dusty torus in Active Galactic Nuclei: An Optical/Infrared Reverberation Lag Study* (Ph.D. Thesis, Rochester Institute of Technology, 2015), p. 199.
7. Вазкюз и др. (B. Vazquez, P. Galianni, M. Richmond, A. Robinson, D.J. Axon, K. Horne, T. Almeyda, M. Fausnaugh, et al.), *Astrophys. J.* **801**, 127 (2015).

8. Гаскелл, Спарк (С.М. Gaskell and L.S. Sparke), *Astropys. J.* **305**, 175 (1986).
9. Гаскелл, Питерсон (С.М. Gaskell and V.M. Peterson), *Astrophys. J. Suppl. Ser* **65**, 1 (1987).
10. Гаскелл, Харрингтон (С.М. Gaskell and P.Z. Harrington), *MNRAS* **478**, 1660 (2018).
11. Гуо и др. (D.-F. Guo, Sh.-M. Hu, J. Tao, H.-X. Yin, Xu Chen, and H.-J. Pan), *Res. Astron. Astrophys.* **14**, 923 (2014).
12. де Вокулер, де Вокулер (G. de Vaucouleurs and A.G. de Vaucouleurs), *Publ. Univer. Texas, Ser. II* **7**, 1 (1968).
13. Ешии и др. (Y. Yoshii, Y. Kobayashi, T. Minezaki, Sh. Koshida, and B.A. Peterson), *Astrophys. J. Lett.* **784**, L11 (2014).
14. Зу и др. (Y. Zu, C.S. Kochanek, and B.M. Peterson), *Astrophys. J.* **735**, 80 (2011).
15. Зу и др. (Y. Zu, C.S. Kochanek, S. Kozlowski, and A. Udalski), *Astrophys. J.* **765**, 106 (2013).
16. Камерон и др. (M. Cameron, J.W.V. Storey, and V. Rotaciuc), *Astrophys. J.* **419**, 136 (1993).
17. Кил (W.C. Keel), *Astron. J.* **85**, 198 (1980).
18. Кобаяши и др. (Y. Kobayashi, Y. Yoshii, B.A. Peterson, S. Miyazaki, T. Aoki, T. Minezaki, K. Kawara, K. Enya, et al.), *Proc. SPIE* **3352**, 120 (1998).
19. Кошида и др. (S. Koshida, Y. Yoshii, Y. Kobayashi, T. Minezaki, Yu. Sakata, Sh. Sugawara, K. Enya, M. Sugauma, et al.), *Astropys. J.* **700**, L109 (2009).
20. Кошида и др. (S. Koshida, Y. Yoshii, Y. Kobayashi, T. Minezaki, K. Enya, M. Sugauma, H. Tomita, T. Aoki, and B.A. Peterson), *Astrophys. J. Lett.* **842**, L13 (2017).
21. Кишимото и др. (M. Kishimoto, S.F. Hönig, R. Antonucci, R. Millan-Gabet, R. Barvainis, F. Millour, T. Kotani, K.R.W. Tristram, and G. Weigelt), *Astrophys. J.* **775**, L36 (2013).
22. Кэмпбелл, Мур (W.W. Cambell and J.H. Moore), *Publ. Lick Observ.* **13**, 77 (2018).
23. Лефтлей и др. (J.H. Leftley, T.R. Tristram, S.F. Hönig, M. Kishimoto, D. Asmus, and P. Gandhi), *Astrophys. J.* **862**, L17 (2018).
24. Лопез-Гонзага и др. (N. López-Gonzaga, L. Burtscher, K.R.W. Tristram, K. Meisenheimer, and M. Schartmann), *Astron. Astrophys.* **591**, L47 (2016).
25. Лютый В.М., Дорошенко В.Т., Письма в Астрон. журн. **25**, 403 (1999) [V.M. Lyuty and V.T. Doroshenko, *Astron. Lett.* **25**, 341 (1999)].
26. Лютый В.М., Окнянский В.Л., Чуваев К.К., Письма в Астрон. журн. **10**, 803 (1984) [V.M. Lyuty et al., *Sov. Astron. Lett.* **10**, 335 (1984)].
27. Ненкова и др. (M. Nenkova, M.M. Sirocky, Z. Ivezić, and M. Elitzur), *Astrophys. J.* **685**, 147 (2008a).
28. Ненкова и др. (M. Nenkova, M.M. Sirocky, R. Nikutta, Z. Ivezić, and M. Elitzur), *Astrophys. J.* **685**, 160 (2008b).
29. Окнянский В.Л., *Переменные звезды* **21**, 71 (1978)
30. Окнянский (V.L. Oknyanskij), *Astron. Tsirkulyar.* **1300**, 1 (1983).
31. Окнянский В.Л., Письма в Астрон. журн. **19**, 1021 (1993) [V.L. Oknyanskij, *Sov. Astron. Lett.* **19**, 416 (1993)].
32. Окнянский (V.L. Oknyanskij), *Odessa Astron. Publ.* **12**, 990 (1999).
33. Окнянский (V.L. Oknyanskij), *ASP Conf. Proc.* **282**, 330 (2002).
34. Окнянский, Лютый (V.L. Oknyanskij and V.M. Lyuty), *Odessa Astron. Publ.* **20**, 160 (2007).
35. Окнянский В.Л., Лютый В.М., Чуваев К.К., Письма в Астрон. журн. **17**, 238 (1991) [V.L. Oknyanskij et al., *Sov. Astron. Lett.* **17**, 100 (1991)].
36. Окнянский В.Л., Лютый В.М., Таранова О.Г., Шенаврн В.И., Письма в Астрон. журн. **25**, 563 (1999) [V.L. Oknyanskij et al., *Astron. Lett.* **25**, 483 (1999)].
37. Окнянский, Хорн (V.L. Oknyanskij and K. Horne), *ASP Conf. Proc.* **224**, 149 (2001).
38. Окнянский и др. (V.L. Oknyanskij, V.M. Lyuty, O.G. Taranova, and V.I. Shenavrin), *ASP Conf. Ser.* **360**, 75 (2006).
39. Окнянский и др. (V.L. Oknyanskij, V.M. Lyuty, O.G. Taranova, et al.), *Odessa Astron. Publ.* **21**, 79 (2008).
40. Окнянский и др. (V. Oknyanskij, N. Metlova, B. Artamonov, et al.), *Odessa Astron. Publ.* **24**, 65 (2012).
41. Окнянский и др. (V.L. Oknyansky, N.V. Metlova, O.G. Taranova, et al.), *Astron. Lett.* **40**, 527 (2014a).
42. Окнянский и др. (V.L. Oknyansky, N.V. Metlova, O.G. Taranova, et al.), *Odessa Astron. Publ.* **27**, 47 (2014b).
43. Окнянский и др. (V.L. Oknyansky, C. M. Gaskell, and E.V. Shimanovskaya), *Odessa Astron. Publ.* **28**, 175 (2015).
44. Окнянский и др. (V.L. Oknyanskij, N. V. Metlova, N.A. Huseynov, et al.), *Odessa Astron. Publ.* **29**, 95 (2016).
45. Окнянский и др. (V.L. Oknyansky, С.М. Gaskell, N.A. Huseynov, V.M. Lipunov, N.I. Shatsky, S.S. Tsygankov, E.S. Gorbovskey, Kh.M. Mikailov, et al.), *MNRAS* **467**, 1496 (2017).
46. Пахольчик (A.G. Pacholczyk), *Astrophys. J.* **163**, 149 (1971)
47. Пенстон, Перес (M.V. Penston and E. Perez), *MNRAS* **211**, 33 (1984).
48. Пенстон и др. (M.V. Penston M.J. Penston, G. Neugebauer, K.P. Tritton, E.E. Becklin, and N. Visvanathan), *MNRAS* **153**, 29 (1971).
49. Позо Нуньес и др. (F. Pozo Nuñez, M. Haas, R. Chini, et al.), *Astron. Astrophys.* **561L**, 8P (2014).
50. Робертс, Рамсти (С.А. Roberts and K.R. Rumstey), *J. Southeastern Associat. Res. Astron.* **6**, 47 (2012).
51. Сейферт (K. Seyfert), *Astrophys. J.* **97**, 28 (1943).
52. Таранова О.Г., Шенаврн В.И., Астрон. журн. **90**, 91 (2013) [O.G. Taranova and V.I. Shenavrin, *Astron. Rep.* **90**, 71 (2013)]
53. Фитч и др. (W.S. Fitch, A.G. Pacholczyk, and R.J. Weymann), *Astrophys. J.* **150**, L67 (1967)
54. Хачикян, Видман (E.Y. Khachikyan and D.W. Weedman), *Astrophysics* **7**, 231 (1971).

55. Хониг (S.F. Hönig), *Astrophys. J. Lett.* **784**, L4 (2014).
56. Хониг, Кишимото (S.F. Hönig and M. Kishimoto), *Astron. Astrophys.* **524**, A121 (2011).
57. Хониг и др. (S.F. Hönig, M. Kishimoto, R. Antonucci, A. Marconi, M.A. Prieto, K. Tristram, and G. Weigelt), *Astrophys. J* **755**, 149 (2012).
58. Хониг Кишимото (S.F. Hönig and M. Kishimoto), *Astrophys. J.* **838**, L20 (2017).
59. Хониг и др. (S.F. Hönig, D. Watson, M. Kishimoto, and J. Hjorth), *Nature* **515**, 528 (2014).
60. Черепашук, Лютый (A.M. Cherepashchuk and V.M. Lyuty), *Astrophys. Lett.* **13**, 165 (1973).
61. Чуваев К.К., Окнянский В.Л., *Астрон. журн.* **66**, 1 (1989).
62. Шаппии и др. (B.J. Shappee, J.L. Prieto, D. Grupe, C.S. Kochanek, K.Z. Stanek, G. De Rosa, S. Mathur, Y. Zu, et al.), *Astrophys. J.* **788**, 48 (2014).
63. Шнулле и др. (K. Schnulle, J.-U. Pott, H.-W. Rix, R. Decarli, B.M. Peterson, and W. Vacca), *Astron. Astrophys.* **557**, L13 (2013).
64. Шнулле и др. (K. Schnulle, J.-U. Pott, H.-W. Rix, B.M. Peterson, G. De Rosa, and B. Shappee), *Astron. Astrophys.* **578**, 57 (2015).
65. Эделсон и др. (R. Edelson, J. Gelbord, E. Cackett, S. Connolly, C. Done, M. Fausnaugh, E. Gardner, N. Gehrels, et al.), *Astrophys. J.* **840**, 41 (2017).