

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.1-5

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ BL Lac ОБЪЕКТА MRK 421 В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

А.СУХАРЕВ<sup>1,2</sup>, М.РЯБОВ<sup>1,2</sup>, В.БЕЗРУКОВС<sup>1</sup>, О.УЛЬЯНОВ<sup>1,2</sup>,  
С.УДОВИЧЕНКО<sup>1,3</sup>, Л.КЕИР<sup>3</sup>, П.ДУБОВСКИЙ<sup>4</sup>, И.КУДЗЕЙ<sup>4</sup>,  
А.КОНОВАЛЕНКО<sup>1,2</sup>, В.ЗАХАРЕНКО<sup>1,2</sup>, Д.БАКУН<sup>6</sup>, И.ЭГЛИТИС<sup>5</sup>

Поступила 3 ноября 2021

Принята к печати 16 февраля 2022

MRK 421, гигантская эллиптическая галактика в созвездии Большой Медведицы, ядро которой обладает всеми свойствами объекта типа BL Lac. Она демонстрирует высокую активность и переменность от радио до гамма-диапазонов на временной шкале от нескольких часов до более чем 10 лет. MRK 421 обладает крупным спутником - спиральной, вероятно также активной галактикой MRK 421-5. В данной работе представлены результаты анализа наблюдений (в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ ), в рамках совместного латвийско-украинского проекта по изучению переменности ярких АЯГ. Кроме этого, проведен анализ кривых блеска MRK 421, из базы данных AAVSO (Американская ассоциация наблюдателей переменных звезд), для подтверждения результатов периодограммного анализа. В итоге на исследуемом интервале времени у MRK 421 заподозрена циклическая переменность с характерным временем в интервале 9.3-13.4 дня, определенным двумя разными методами (аппроксимация данных синусоидами и метод CLEANest), что подтверждается анализом более длительных наблюдений MRK 421 в полосе  $V$  (по данным AAVSO). Дополнительно была проанализирована длительная переменность MRK 421. Получен результат, что в  $V$ ,  $R$ ,  $I$  кривых блеска AAVSO максимумы LS-периодограмм соответствуют периодам 1.6-1.7 года. Это близко к более ранним результатам анализа исторических кривых блеска MRK 421, которые были получены другими авторами. Также, по данным AAVSO, предположено наличие у MRK 421 более длительного цикла изменения блеска с характерным временем 20-30 лет.

**Ключевые слова:** *радиогалактика: MRK 421; внутрисуточная и межсуточная переменность; оптическая фотометрия; активные ядра галактик*

**1. Введение.** Радиоисточник MRK 421, это чрезвычайно активное ядро гигантской эллиптической галактики, расположенной в созвездии Большая Медведица. MRK 421 показывает мощную вспышечную активность и переменность во всем диапазоне электромагнитных волн. Родительская галактика радиоисточника MRK 421 находится на расстоянии приблизительно 434 млн св. лет от Солнца (133 Мпк) [1] и является одним из ближайших блазаров. У MRK 421 есть довольно крупная галактика-компаньон Маркарян 421-5 (наклоненная спиральная галактика), которая находится на расстоянии около 14 угл. с от основной галактики. Изначально галактика MRK 421 была открыта в виде источника высокоэнергетического гамма-излучения в 1992г. иссле-

дователем Панч и его коллегами [2] в обсерватории Уиппла. В 1996г., Дж.Гайдос в этой обсерватории зарегистрировал быстрый выброс очень высокоэнергетического гамма-излучения от MRK 421 (время усиления сигнала составило 15 мин) [3]. Широкодиапазонная оптическая и гамма-вспышки MRK 421 также произошли в 2001г. и наблюдались в рамках проекта Whole Earth Blazar Telescope [4]. Поскольку MRK 421 является сравнительно ярким объектом (в среднем видимая звездная величина составляет  $13^m.3$ ), он доступен для наблюдений при помощи хороших любительских телескопов и является чрезвычайно популярным объектом для оптического мониторинга астрономиями-любителями. Наблюдения, выполненные с 2009 по 2012гг., на оптическом телескопе в обсерватории Вэйхаи, принадлежащей Шаньдунскому университету, в фильтрах  $V$  и  $R$ , показали наличие циклической переменности с периодом 1.36 лет, который был получен из анализа данных периодограммным методом Юркевича и структурной функцией.

Предполагается наличие системы из двух черных дыр в ядре MRK 421, взаимодействие которых может обеспечить наблюдаемые свойства переменности MRK 421 [5]. По данным орбитальной обсерватории Сузаку, MRK 421 обладает подтвержденной внутрисуточной переменностью в рентгеновском диапазоне [6]. Например, по наблюдениям на Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) было обнаружено удвоение потока за время около 14 мин, а это в диапазоне 3-79 КэВ близко ко времени прохождения светом до горизонта событий черной дыры [7]. В радиодиапазоне внутрисуточная переменность также была подтверждена с использованием 25-м радиотелескопа Синьцзянской астрономической обсерватории в Китае и показано, что амплитуда быстрых вариаций потока на частоте 4.8 ГГц составляет около 0.8 Ян [8]. MRK 421 также примечателен тем, что у него обнаружена корреляция между вариациями потока ГэВ, радио и в оптическом диапазоне с задержкой от 30 до 100 дней относительно гамма-диапазона, что является довольно редким и очень интересным свойством для блазаров [9].

Внутрисуточная переменность также наблюдалась и в инфракрасном диапазоне ( $J$ -полоса), значимые вариации блеска достигали приблизительно  $0^m.8$  на протяжении интервала наблюдений с 25 февраля - 5 марта 2003г. [10].

Таким образом, блазар MRK 421 проявляет чрезвычайную активность. Свойства его переменности нуждаются во всестороннем и интенсивном изучении для понимания особенностей работы "центральной машины", обеспечивающей наблюдаемую переменность этого замечательного объекта. Все это позволит в свою очередь улучшить теоретические модели, объясняющие наблюдаемые особенности переменности блазаров.

Эта работа выполнена как часть совместного латвийско-украинского проекта по исследованиям быстрой переменности ярких галактик в скоплениях с

массивными спутниками в радио и оптическом диапазонах [11-13].

2. *Наблюдения и обработка.* Наблюдения объекта MRK 421 для этой работы были выполнены в Украине и Словакии, с использованием оптических телескопов АЗТ-3 (Украина, обсерватория Маяки) и VNT (Словакия, обсерватория Вигорлат). Диаметр зеркала телескопа АЗТ-3 - 48 см, диаметр зеркала телескопа VNT - 1 м. Для наблюдений использовались  $V$ ,  $R$ ,  $I$  светофильтры. Наблюдения в обсерватории Маяки проводились с 4 мая по 10 июня 2021г., в обсерватории Вигорлат - с 9 мая по 8 июня 2021г. Окрестности MRK 421 с пометками целевого объекта наблюдения и звезд сравнения показаны на рис.1.

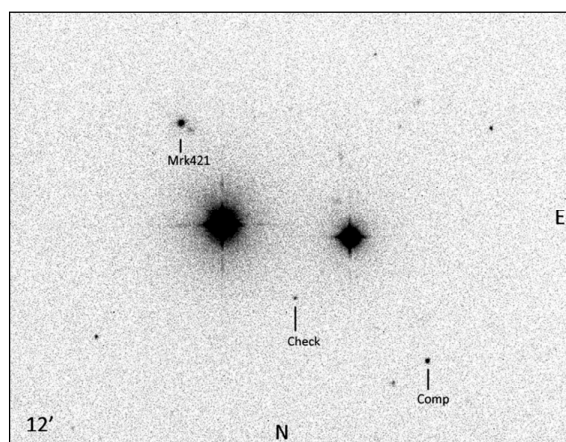


Рис.1. Изображение с ПЗС камеры телескопа АЗТ-3 (Маяки, Украина) окрестностей радиоисточника MRK 421. Отмечены сам объект, а также звезды сравнения.

Стандартная редукция кадров с ПЗС матрицы проводилась с использованием MUNIPACK (<http://sourceforge.net/projects/c-munipack>) программного обеспечения. Процедуры апертурной фотометрии состоят из поправок на темновой уровень и плоское поле, определения инструментальных звездных величин и точности измерений. Фотометрия преобразована в стандартную систему  $V$ ,  $R$ ,  $I$  Джонсона-Казинса с помощью метода дифференциальной фотометрии [14]. Наблюдения на телескопе АЗТ-3 приведены к стандартной фотометрической системе по следующим формулам:

$$V_{st} = \Delta V_{inst} + \varepsilon_V \Delta(B-V) + V_{comp}, \quad R_{st} = \Delta R_{inst} + \varepsilon_R \Delta(V-R) + R_{comp},$$

где  $V_{st}$ ,  $R_{st}$  - звездные величины в стандартной системе,  $\Delta V_{inst}$ ,  $\Delta R_{inst}$  - разность звездных величин переменной звезды и звезды сравнения,  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_R$  - цветовые коэффициенты трансформации,  $\Delta(B-V)$ ,  $\Delta(V-R)$  - разность показателей

цвета переменной звезды и звезды сравнения,  $V_{comp}$ ,  $R_{comp}$  - звездные величины звезды сравнения в стандартной системе [15]. Коэффициенты трансформации определялись по наблюдениям звезд-стандартов [16]. В астрономической обсерватории Вигорлат мы использовали национальный телескоп VNT 1000/9000 мм, оснащенный ПЗС камерой FLI 1001E и фотометрическими фильтрами Джонсона-Казинса  $B$ ,  $V$ ,  $R_c$ ,  $I_c$ . Полученные изображения корректировались стандартным образом - с поправкой на темное поле и плоское поле. Апертурная фотометрия проведена с использованием программного пакета CoLiTecVS [17]. Для дифференциальной фотометрии из каталога LONEOS [18] были взяты следующие стандартные значения яркости:  $B=12.99$ ;  $V=12.40$ ;  $R_c=12.05$ ;  $I_c=11.69$ . Очень важно всегда использовать диафрагму одного и того же размера при сравнении блеска такого диффузного объекта, как MRK 421, с точечными источниками. Полуширина изображения звезд меняется в зависимости от условий изображения, в то время как ядро галактики остается почти того же размера. Мы выбрали радиус апертуры 5 пикселей, что соответствует 5.5 угл.с на небе. Для сравнительного анализа долговременной многолетней переменности источника MRK 421 была использована визуальная кривая блеска с каталога AAVSO (Американская ассоциация наблюдателей переменных звезд) (<https://www.aavso.org/>), полученная в интервале времени с 28 января 1977г. - 14 февраля 2020г. Дополнительно также были проанализированы кривые блеска источника MRK 421 из каталога AAVSO, в оптических полосах  $V$  (14 мая 1996г. - 17 мая 2021г.),  $R$  (25 февраля 2002г. - 24 апреля 2020г.),  $I$  (19 декабря 2004г. - 12 июля 2013г.).

Поиск квазипериодичностей проводился с использованием следующего подхода. На первом этапе вычислялись периодограммы Ломба-Скаргла (LS) для оценки частот и количества синусоидальных компонентов кривых блеска. На втором этапе выполнялась линейная аппроксимация кривых блеска (методом наименьших квадратов) для определения значений амплитуд и фаз. Эти результаты использовались как начальные оценки параметров для третьего этапа оптимизации - итерационной подгонки аппроксимирующей кривой к реальным данным путем подбора оптимальных величин начальных параметров частоты, амплитуды и фазы синусоидальных компонентов аппроксимирующей тригонометрической модели методом наименьших квадратов. Это позволяет уточнить начальные значения периодов, делая их оценку более значимой. Подробнее данная процедура представлена в работе [19]. Сглаживание кривых блеска и снижение шума данных оптических наблюдений были выполнены с использованием полиномиального скользящего среднего [20]. Отдельные выпадающие точки помех, которые были в кривых блеска, удалялись вручную.

### 3. Быстрая низкоамплитудная переменность MRK 421. Кривые

блеска MRK 421, полученные в обсерваториях Маяки и Вигорлат, показаны на рис.2.

Данные, полученные в обсерватории Вигорлат, содержат значительно меньше измерений и больше использовались для анализа вариаций блеска внутри ночных наблюдений. Как видно, данные, полученные в обсерватории Маяки, содержат медленные трендовые изменения блеска. Описательная статистика этих кривых блеска показана в табл.1. Эти тренды были аппроксимированы полиномом третьей степени (для каждого светофильтра), затем полином был вычтен из данных, что позволило точнее анализировать более быстрые вариации блеска. В то же время известно, что в некоторых случаях,

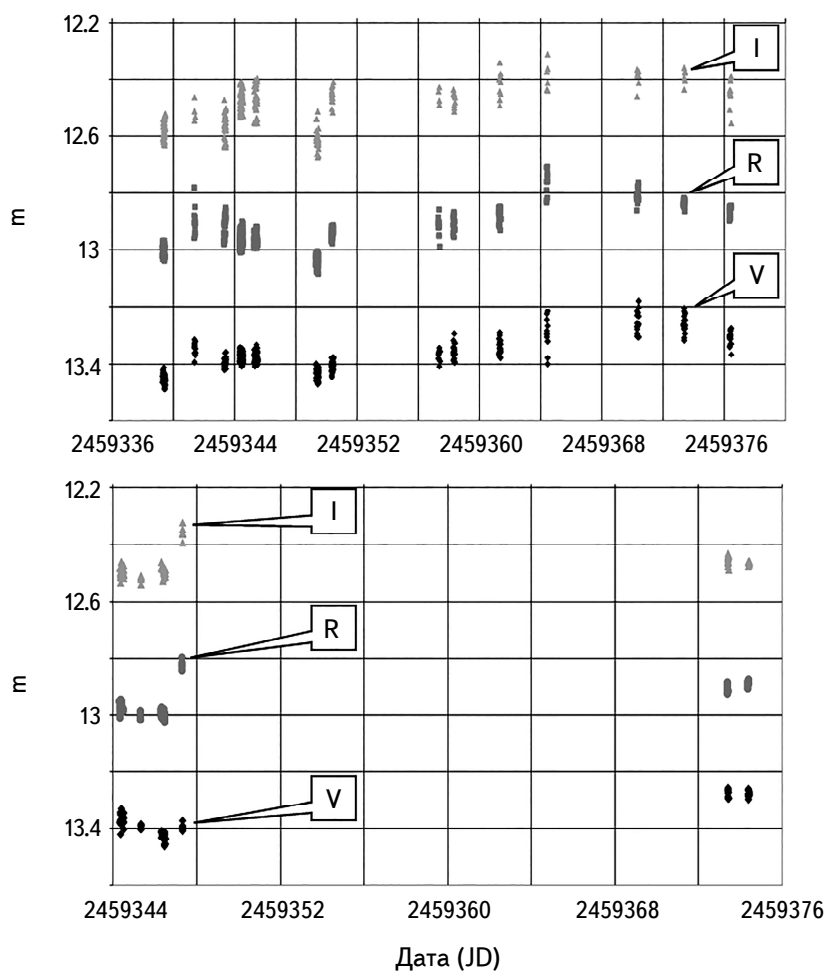


Рис.2. Кривые блеска источника MRK 421, в оптических полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ . Верхний рисунок - данные обсерватории Маяки; нижний - данные обсерватории Вигорлат. Флажками обозначены данные, полученные в светофильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ .

Таблица 1

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Параметры опис. стат.	Маяки			Вигорлат		
	$V$	$R$	$I$	$V$	$R$	$I$
Среднее	13.37	12.94	12.50	13.36	12.95	12.48
Станд. откл.	0.056	0.068	0.077	0.062	0.055	0.040
Макс.	13.18	12.70	12.31	13.25	12.80	12.32
Мин.	13.49	13.08	12.67	13.46	13.03	12.54
Ампл.	0.31	0.38	0.36	0.20	0.22	0.22
Ср. разн.	0.062	0.076	0.089	0.070	0.060	0.039
Qa	0.057	0.083	0.12	0.12	0.091	0.037
Q 25%	13.35	12.90	12.44	13.29	12.91	12.46
Q 75%	13.41	12.98	12.56	13.41	13.00	12.50
Кол. точек	451	438	243	97	102	92

вычитание полиномиального тренда из кривой блеска может привести к появлению ложной квазипериодической волны в остатках. Поэтому, для проверки результатов о полученных характерных временах вариаций блеска источника MRK 421 был использован метод построения CLEANest периодограмм для исходных кривых блеска (без предварительной обработки).

Итак, первым шагом в анализе переменности было вычитание тренда 3-й степени с последующей нормализацией, а затем в ряды остатков вписывались синусоиды методом наименьших квадратов, значения начальных параметров которых брались из периодограмм Ломба-Скаргла. Таким образом, оценивалось характерное время вариаций блеска источника MRK 421 в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$  (для данных обсерватории Маяки).

В табл.1 показаны статистические данные наблюдений в обсерваториях Маяки и Вигорлат, отдельно для оптических полос  $V$ ,  $R$ ,  $I$ . В таблице использованы следующие обозначения: Среднее - среднее значение звездной величины за ночь наблюдения, Станд. откл. - стандартное отклонение, Макс. и Мин. - наибольшее и наименьшее значение звездной величины за ночь наблюдения, соответственно, Ампл. - амплитуда изменения блеска источника в течение ночи, Ср. разн. - средняя разность Джини, которая показывает разброс значений временного ряда относительно друг друга и не зависит от какого-то центрального значения, например, от среднего значения или медианы, Qa - межквартильный размах, характеризует степень разброса данных и является разностью между верхним и нижним квартилями временного ряда, Кол. точек - количество точек измерений.

В результате оказалось, что кривые блеска источника MRK 421, возможно, обладают циклической переменностью, с характерным временем около 10-13

дней. Примеры графиков аппроксимации синусоидами выровненных данных (без тренда) показаны на рис.3 для оптических полос  $V$  и  $R$ . Видно, что в этом примере вариации блеска могут быть довольно хорошо описаны синусоидами с периодами 9.3 дня (фильтр  $V$ ) (верхний рисунок) и 10.1 дня (фильтр  $R$ ) (нижний рисунок).

На рисунках обозначены:  $R^2$  - коэффициент детерминации,  $SE$  - стандартная ошибка аппроксимации,  $F$  -  $F$ -статистика Фишера. Для полосы  $V$ :  $R^2=0.448$ ,  $SE=0.744$ ,  $F=181.800$ ; для полосы  $R$ :  $R^2=0.387$ ,  $SE=0.784$ ,  $F=137.751$ . 95% интервалы предсказания (показаны на рисунках флажками) полезны, когда

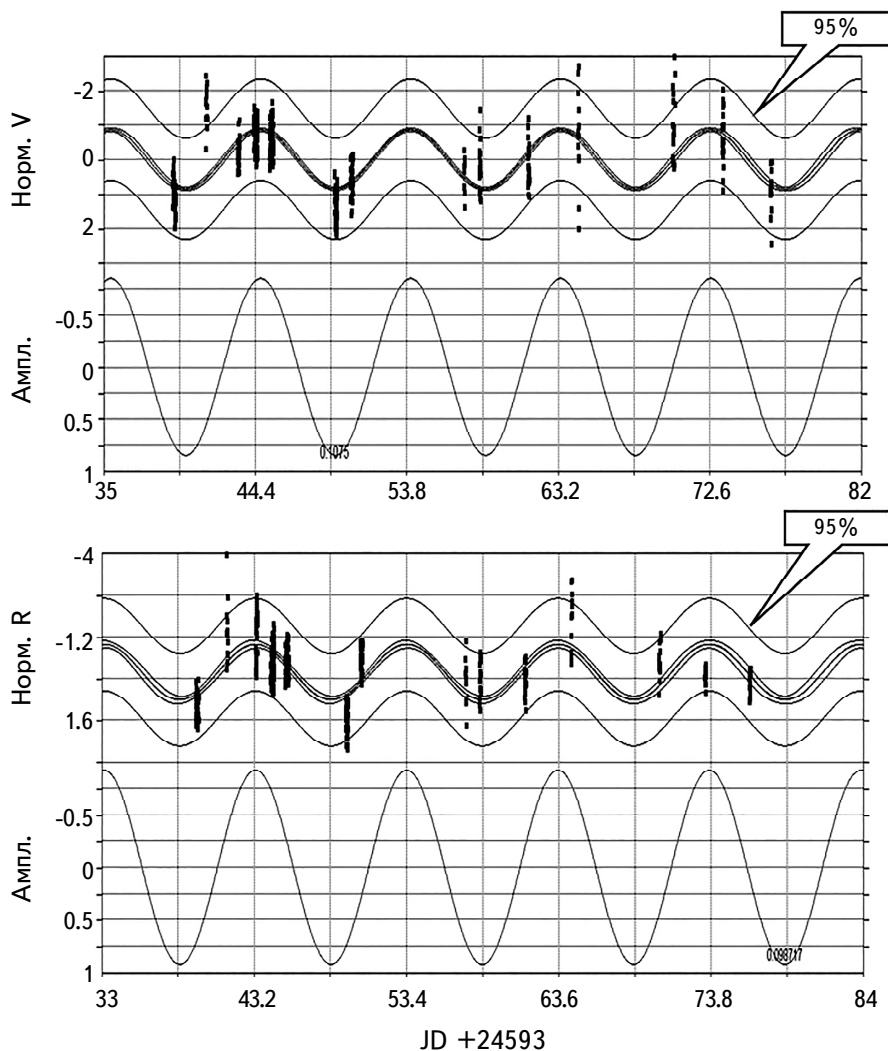


Рис.3. Примеры аппроксимации данных быстрой переменности источника MRK 421 одиночными синусоидами, вписанными методом наименьших квадратов.

точки аппроксимации представляют собой один эксперимент, где каждое значение  $Y$  представляет собой отдельное наблюдение, а не среднее значение. В этом случае вес для каждого значения  $Y$  не основан на стандартном отклонении от нескольких наблюдений, а скорее обратно связан с экспериментальной неопределенностью отдельного измерения, если таковая известна. Если неопределенность измерения  $Y$  неизвестна или считается одинаковой для всех  $X$ , тогда все точки могут использовать одинаковые веса, эквивалентные единице. 95% интервал предсказания - это диапазон  $Y$  для

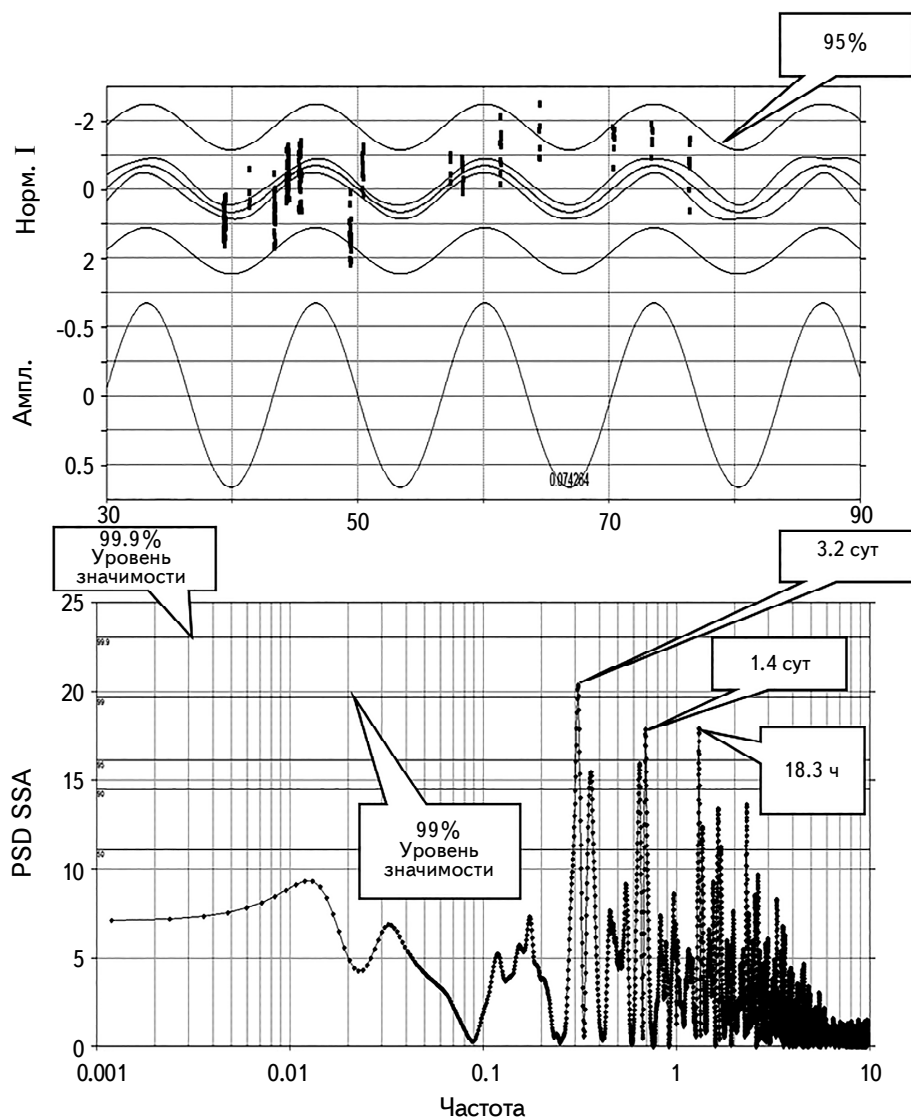


Рис.4. Пример анализа кривой блеска в полосе  $I$ .



данного  $X$ , где существует 95% вероятность того, что значение  $Y$  следующего эксперимента произойдет на основе соответствия аппроксимации данных текущего эксперимента.

Несколько другая картина получается при анализе кривой блеска в оптической полосе  $I$ . После вычитания полиномиального тренда 3-й степени, наилучшая аппроксимация ряда остатков достигается при использовании синусоиды с периодом 3.2 дня. В то же время, при вписывании синусоиды в исходный ряд данных (с трендом), наилучший результат получается при периоде синусоиды 13.4 дня, что близко к результатам для оптических полос  $V$  и  $R$ . Пример показан на рис.4.

На верхнем рисунке показан пример вписанной синусоиды с периодом 13.4 дня в кривую блеска (с трендом) в оптической полосе  $I$  (параметры аппроксимации:  $R^2=0.177$ ,  $SE=0.911$ ,  $F=25.789$ ). Значимость аппроксимации довольно низкая. В то же время, периодограмма Ломба-Скаргла, построенная по остаткам от вычитания полиномиального тренда 3-й степени (нижний рисунок), показывает, возможно, наличие циклических вариаций блеска с периодом 3.2 дня (а также гармоники основного периода - 1.4 дня и 18.3 часа). Только основной пик периодограммы превышает уровень значимости в 99%, при этом не достигая главного уровня значимости 99.9%. Таким образом, наличие циклического изменения блеска с характерным временем около 3-х дней, в кривой блеска в полосе  $I$ , маловероятно, но требует дополнительной проверки наблюдениями, потому что в полосе  $I$  было меньше точек измерений, чем в полосах  $V$  и  $R$ , и такой период может быть вызван разрывностью данных.

Все параметры аппроксимации наблюдательных данных источника MRK 421, по данным обсерватории Маяки, показаны в табл.2. Видно, что наилучшее качество аппроксимации получено для данных в фильтре  $V$ , поскольку здесь было наибольшее число измерений.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ БЛЕСКА

Параметры аппрокс.	$V$	$R$	$I$
$R^2$	0.44	0.38	0.42 0.17 (с трендом)
SE	0.74	0.78	0.76 0.91 (с трендом)
F stat	181.80	137.75	87.32 25.78 (с трендом)
P sin	9.30	10.10	3.20 13.40 (с трендом)

В табл.2 показаны параметры аппроксимации кривых блеска (после вычитания полиномиального тренда 3-й степени) источника MRK 421 в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , с использованием одиночных синусоид. В таблице следующие обозначения:  $R^2$  - коэффициент детерминации,  $SE$  - стандартная ошибка аппроксимации,  $F_{stat}$  -  $F$ -статистика Фишера (чем эта величина больше, тем точнее аппроксимация данных),  $P_{sin}$  - период (в днях) аппроксимирующих синусоид. В случае кривой блеска в фильтре  $I$ , дополнительно показаны параметры аппроксимации без вычитания медленного тренда (пометка "с трендом").

Для дополнительной проверки полученного результата, были построены периодограммы CLEANest, с использованием метода, предложенного в работе [21]. Этот метод использует дискретный спектр, который после вычитания модельной функции формируется отдельными амплитудами каждой частотной составляющей, которая используется для построения функции модели аппроксимации наблюдений и преобразования Фурье остатков. Метод обладает очень хорошей чувствительностью и точностью, позволяя определять характерные времена даже слабых низкоамплитудных вариаций блеска переменных ядер галактик. В результате получен следующий результат: фильтр  $V$  - основной квазипериод  $9.25 \pm 0.04$  дня с амплитудой  $0^m.06 \pm 0^m.01$ , фильтр  $R$  -  $10.19 \pm 0.12$  дня с амплитудой  $0^m.07 \pm 0^m.01$ , фильтр  $I$  -  $12.88 \pm 0.09$  дня с амплитудой  $0^m.08 \pm 0^m.01$ . Это приблизительно соответствует ранее полученным результатам определения величин квазипериодов путем аппроксимации данных синусоидами. Кроме этого, метод CLEANest обнаруживает гармоники с периодами 3-5 дней. Однако это с очень большой вероятностью ложный результат, связанный с неравномерной разрывностью данных. Обнаруживаемые гармоники с периодами 20-30 дней являются оценкой характерного времени медленных трендовых вариаций блеска источника MRK 421. Отсюда можно с уверенностью предположить, что источник MRK 421 в оптическом диапазоне обладает быстрым циклическим изменением блеска с характерным временем в интервале 9-13 дней, в зависимости от оптической полосы.

Что касается переменности MRK 421 внутри отдельных ночей наблюдений (INOV), то по данным наблюдений в обсерватории Вигорлат, минимальное характерное время вариаций блеска составило около 1.8 часа в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , и эти вариации являются полностью нерегулярными.

Поскольку в анализируемых кривых блеска объекта MRK 421 были разрывы данных, необходима дополнительная проверка того, что обнаруженные квазипериоды являются истинными и не вызваны влиянием повторяющихся разрывов. Длительные оптические наблюдения могут содержать повторяющиеся (с разным периодом) разрывы в данных, например из-за плохих погодных условий. Необходимая проверка, для исключения из рассмотрения ложных

периодов, состоит в построении периодограммы оконной функции наблюдений, потому что периодограмма представляет собой свертку истинной периодограммы с оконной функцией. На периодограмме оконной функции могут быть максимумы, которые показывают ложные периоды, проявляющиеся из-за разрывности данных. Графики периодограмм оконных функций для кривых блеска MRK 421 в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , по данным наблюдений в обсерватории Маяки, показаны на рис.5. В области периодов от 8 до 13 дней (который почти соответствует диапазону 9-13 дней, обнаруженных в этой работе периодов) отсутствуют максимумы, что подтверждает истинность обнаруженных периодов и их независимость от разрывов в данных.

Видно, что в диапазоне 8-13 дней нет максимумов ложных периодов.

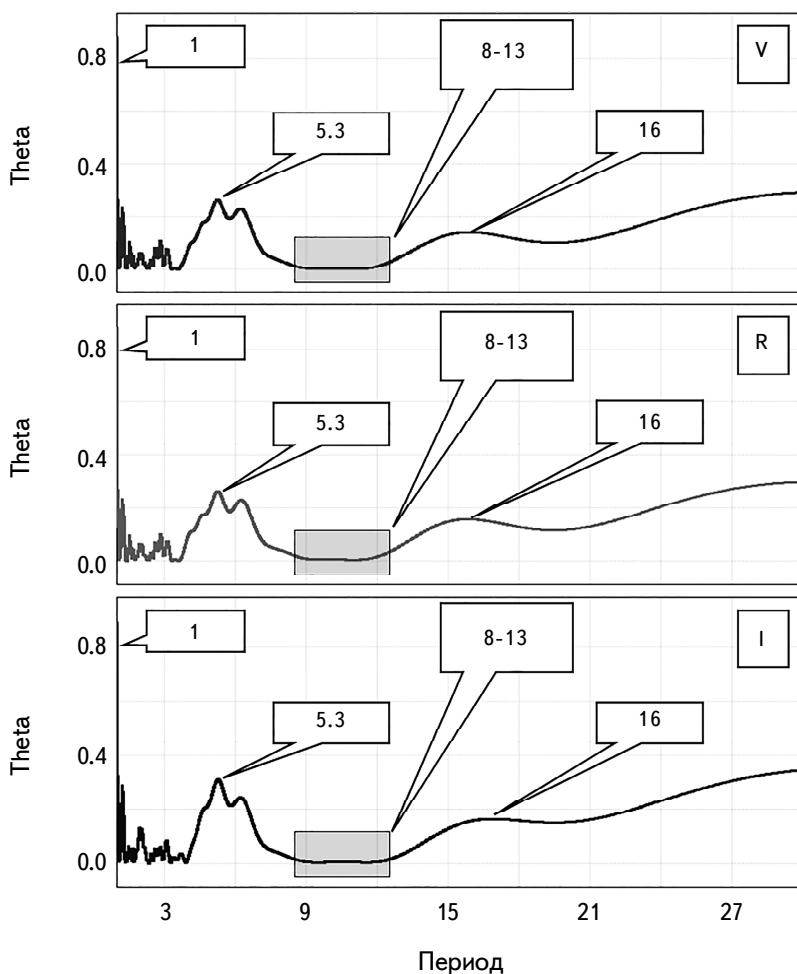


Рис.5. Периодограммы спектрального окна для кривых блеска объекта MRK 421 в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , полученных в обсерватории Маяки.

Здесь также проявляются четкие максимумы с "периодами" в 1 день и 5.3 дня и слабый, нечеткий максимум с "периодом" около 16 дней, которые являются ложными.

4. *Долговременная оптическая переменность MRK 421.* Рассмотрим теперь длительную переменность радиоисточника MRK 421 в оптическом диапазоне. Для этого были использованы данные многолетнего оптического мониторинга MRK 421, из базы данных AAVSO, в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ . Исследуемые кривые блеска показаны на рис.6. На рисунке хорошо просматривается волнообразная переменность MRK 421.

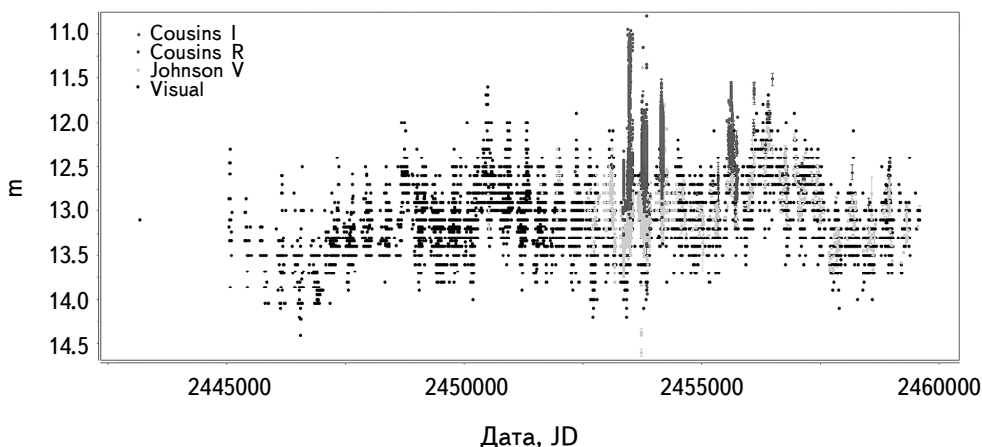


Рис.6. Кривые блеска MRK 421 в фильтрах  $V$  (14 мая 1996г. - 17 мая 2021г.),  $R$  (25 февраля 2002г. - 24 апреля 2020г.),  $I$  (19 декабря 2004г. - 12 июля 2013г.), полученные из базы данных AAVSO, наложенные на кривую визуальных измерений блеска MRK 421 (29 января 1977г. - 20 октября 2021г.) как индикатора долговременной, многолетней переменности этого объекта.

Для анализа данных на предмет наличия или отсутствия циклической переменности, использовался метод Ломба-Скаргла для построения периодограмм. Пример построенных периодограмм показан на рис.7. Значения основного квазипериода получились довольно близкими для анализируемых оптических полос и составили 640.5 дня (1.7 года) (фильтр  $V$ ), 616.7 дня (1.6 года) (фильтр  $R$ ), 742.4 дня (2.0 года) (фильтр  $I$ ). Отклонение значения квазипериода для фильтра  $I$  в большую сторону возможно связано с большей разрывностью данных и низким заполнением точками интервала наблюдений.

Амплитуда найденных (по данным AAVSO) квазипериодических вариаций блеска источника MRK 421 составила приблизительно  $0^m.5$  в фильтрах  $V$  и  $R$ , и около  $0^m.6$  в фильтре  $I$ . Стоит отметить, что амплитуда квазипериодических вариаций блеска непостоянна и может значительно изменяться со временем. Для дополнительной проверки ранее полученных результатов при анализе кривых

блеска MRK 421 (обсерватория Маяки), была построена периодограмма по методу дисперсионного анализа ANOVA (с использованием алгоритма, предложенного в работе [22], он является одним из самых эффективных методов анализа сильно зашумленных данных с разрывами разной длины) в диапазоне периодов от 2 до 30 дней (диапазон характерных времен вариаций блеска MRK 421, описанный выше) в оптической полосе  $V$ , из каталога AAVSO (в этой полосе наилучшее заполнение интервала наблюдений точками данных). Здесь видно довольно хорошее соответствие результатов, полученных квазипериод 12.9 дня в интервале значений квазипериодов 9.3 дня - 13.4 дня, определенного

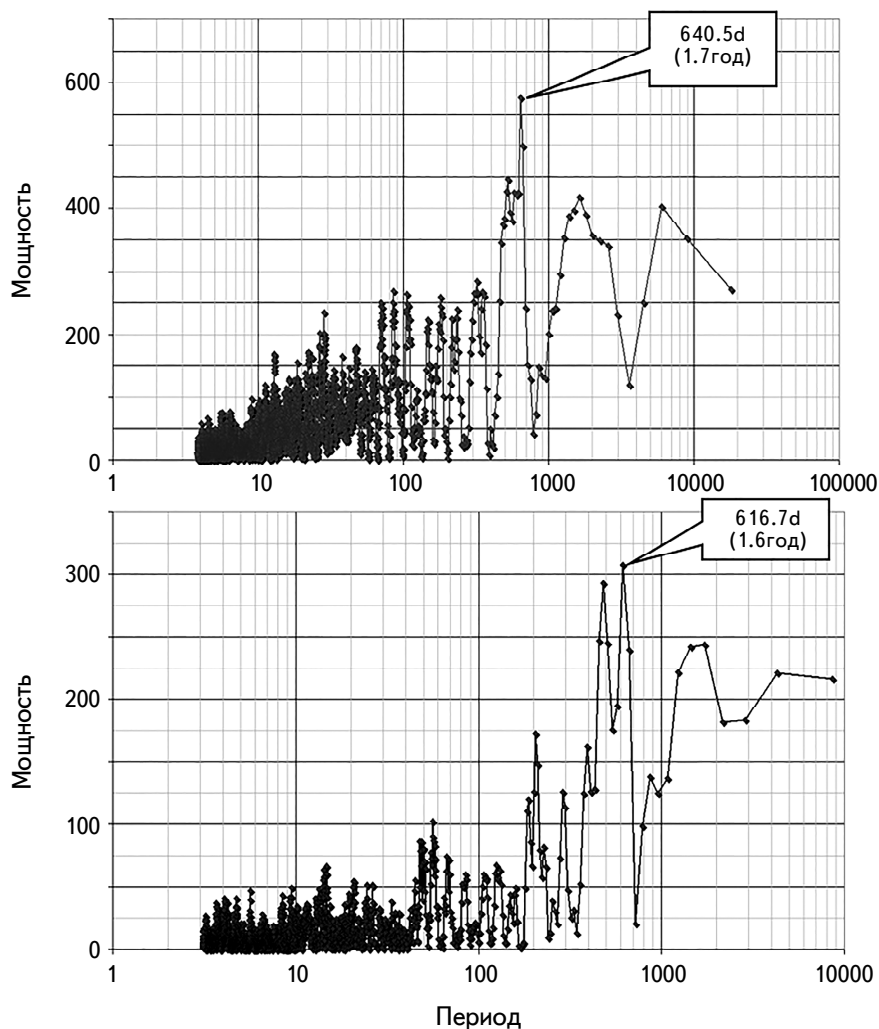


Рис.7. Пример периодограмм для источника MRK 421, для кривой блеска в фильтре  $V$  (верхний график) и кривой блеска в фильтре  $R$  (нижний график). Преобладающие максимумы периодограммы отмечены флажками.

по данным обсерватории Маяки (значение  $F$ -статистики также около 105, получено в обоих методах анализа кривых блеска). Пример периодограммы показан на рис.8.

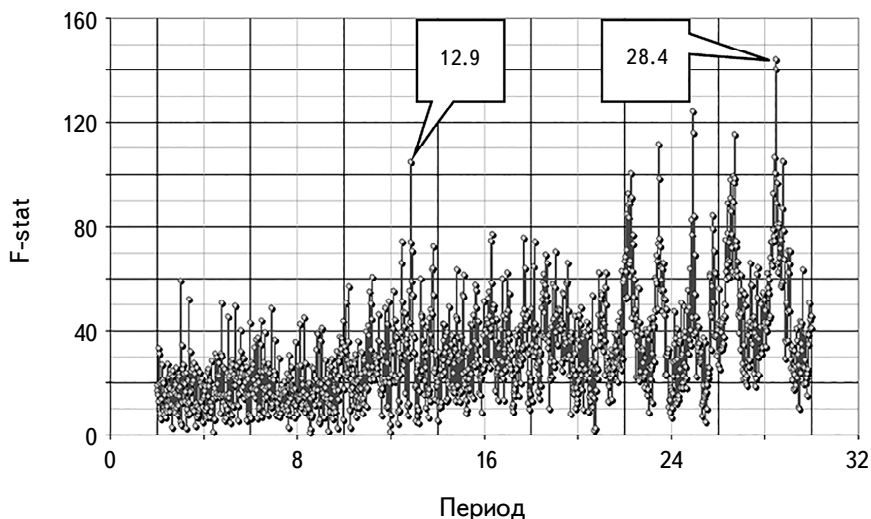


Рис.8. Периодограмма по методу ANOVA для кривой блеска источника MRK 421 в фильтре  $V$  из каталога AAVSO, построенная в полосе значений периодов от 2 до 30 дней. Видно наличие двух основных квазипериодов со значениями 12.9 и 28.4 дня.

Также подтверждается предположение о возможной цикличности с характерным временем около 20–30 дней, которая в кривых блеска обсерватории Маяки выглядела как трендовое изменение блеска MRK 421. По данным AAVSO в фильтре  $V$  получено значение квазипериода в 28.4 дня, также видны на периодограмме четыре гармоники с периодами, приблизительно от 22 до 26 дней. Это также соответствует ранее полученному результату.

Периодограммный анализ наиболее длительной (продолжительность 44 года), визуальной кривой блеска из каталога AAVSO показывает наличие некоторых максимумов на периодограмме, построенной методом Ломба-Скаргла (рис.9). Основной максимум 18.2 года, второй максимум соответствует периоду 1.4 года. Также видны два близко расположенных максимума с периодами 7.5 и 5.1 года, но вполне возможно, что это не реальная цикличность в данных, а гармоники основного периода 18.2 года. Наиболее короткий найденный квазипериод вариаций блеска источника MRK 421 в визуальной кривой блеска составляет 1.4 года, что довольно близко к ранее полученным значениям квазипериода 1.6–1.7 года в  $V$ ,  $R$ ,  $I$  кривых блеска. Однако качество визуальной кривой блеска, конечно, намного ниже, чем  $V$ ,  $R$ ,  $I$  кривых блеска источника MRK 421. Здесь надо отметить, что наиболее длительное характерное время вариаций (18.2г.) по визуальным данным AAVSO довольно близко к значению

16 лет, полученного в работе [24] при анализе исторической кривой блеска в полосе  $R$ , что подтверждает возможное наличие циклического долговременного изменения блеска источника MRK 421 в оптическом диапазоне.

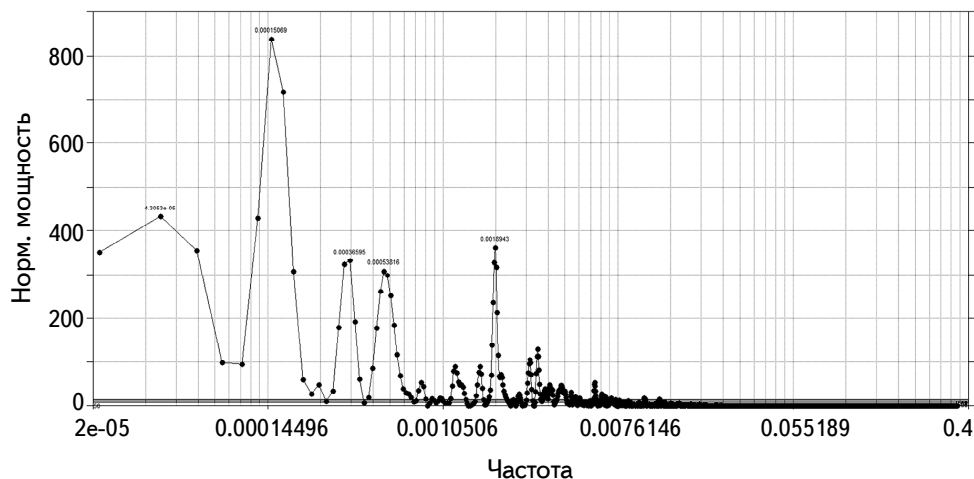


Рис.9. Периодограмма для визуальной кривой блеска MRK 421, полученной из каталога AAVSO. Периодограмма построена со спектральным окном Бартлетта для уменьшения мощности ложных гармоник. По оси X периодограммы - частота в циклах в год, по оси Y - нормированная спектральная мощность.

Таким образом, можно уверенно сделать вывод, что радиоисточник MRK 421 в оптическом диапазоне обладает быстрой циклической переменностью с квазипериодом около 9-13 дней (в зависимости от светофильтра), а также более длительной переменностью с характерным временем в диапазоне 20-30 дней. Кроме этого, по данным AAVSO, четко обнаружена квазипериодическая переменность в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , с характерным временем 1.6-1.7 года. Нами планируется проведение дальнейших наблюдений этого объекта с целью уточнения величины квазипериодов и их амплитуды.

**5. Обсуждение полученных результатов.** Мощный внегалактический радиоисточник MRK 421 (объект типа BL Lac) интенсивно исследуется в настоящее время, поскольку представляет собой ядро яркой гигантской галактики и является прекрасным объектом для изучения свойств и взаимосвязи многодиапазонной переменности. В тоже время, все еще мало информации о быстрой переменности этого источника с характерными временами от нескольких дней до десятков дней, в том числе и в оптическом диапазоне. Также мало изучены свойства внутрисуточной переменности этого объекта. В долговременных радио, рентгеновских и гамма данных ранее была обнаружена квазипериодическая активность с довольно близкими квазипериодами

в этих разных диапазонах: 287.6 дня (радио), 309.5 дня (рентгеновский диапазон), 283.4 дня (гамма-диапазон), что говорит о наличии глобального процесса, формирующего квазипериодические вариации с близкими характерными временами.

Предполагается, что обеспечить подобную долговременную и устойчивую переменность может наличие в ядре галактики MRK 421 двойной системы из сверхмассивных черных дыр [23]. Наличие в ядре галактики черной дыры-спутника, который совершает орбитальное вращение вокруг основной черной дыры, вызывает сложную многокомпонентную переменность, наблюдаемую от гамма до оптического и радиодиапазонов. Это может выражаться в появлении прецессии аккреционного диска (и релятивистского джета, дающего вклад в синхротронное оптическое излучение), нестабильности аккреционного диска и появлении в нем волновых пульсаций, что регистрируется как регулярная переменность в разных диапазонах на кратковременных и многолетних временных масштабах. Примеры и некоторые модели рассматривались во многих работах для разных внегалактических объектов, например [24-26].

MRK 421 один из немногих внегалактических источников, у которого довольно часто проявляется переменность в течение одной ночи (INOV). Например, в работе [27] отмечается значение минимального характерного времени изменения блеска источника в оптической полосе  $R$ , около 2 часов. Следует отметить, что это довольно близко к определенному в этой работе, минимальному характерному времени вариаций блеска в 1.8 часа в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$  по данным наблюдений в обсерватории Вигорлат. Кроме того, в этой работе отмечается наличие долговременного 16-летнего цикла, определенного по исторической кривой блеска в полосе  $R$  (что довольно близко к 18-летнему циклу, полученному при анализе визуальной кривой блеска MRK 421, по данным каталога AAVSO). По результатам рентгеновских наблюдений, предполагается, что источником переменности в этом диапазоне могут быть нестабильные процессы в аккреционном диске, которые передаются в джет источника, где и формируется рентгеновское излучение [28]. Также следует отметить, что долговременный квазипериод около 1.3 года, найденный в некоторых работах и разными методами периодограммного-анализа, например в [5], довольно близок к полученному в нашей работе результату 1.6-1.7 года, для долговременной переменности MRK 421 в фильтрах  $V$ ,  $R$ ,  $I$  (кривые блеска AAVSO). Наличие довольно устойчивой, вероятно циклической переменности у MRK 421, в разных диапазонах (гамма, рентген, оптика) может быть наблюдаемым признаком присутствия двойной черной дыры в ядре галактики. В таком случае предполагается, что наблюдаемые квазипериоды довольно слабо изменяются со временем. Проверим это предположение на примере кривой блеска MRK 421 в полосе  $V$  из каталога AAVSO. Для этого



используем метод взвешенного вейвлет Z-преобразования WWZ (Weighted Wavelet Z-Transform). Этот метод позволяет получить зависимость изменения частоты (периода) от времени для неравномерных временных рядов с пропусками. Метод WWZ выполняет преобразование с использованием вейвлет-функции, которая включает в себя периодическую синусоидальную тестовую функцию и оконную функцию Гаусса. Ширина окна вейвлета определяется значением постоянной затухания и интервала времени. Затем происходит подгонка вейвлета к данным наблюдений. При этом взвешиваются наблюдения, применяя к ним функцию скользящего окна. Наблюдения вблизи центра окна имеют наибольший вес в подгонке. Окно скользит по наблюдениям вдоль оси времени, создавая представление спектрального состава сигнала в моменты времени, соответствующие центру этого окна. Постоянная затухания - определяет ширину окна вейвлета, т.е., определяет количество циклов данной частоты  $f$ , ожидаемых в окне вейвлета. Разделение по времени - определяет ширину окна вейвлета вместе с постоянной затухания. Подробнее описание метода WWZ изложено в работе [29].

В нашем расчете применялись следующие параметры: поиск периодов в интервале 400-2000 дней ( $\approx 1.1$ -5.5 года), шаг периодов - 0.5 дня, постоянная затухания - 0.0012, разделение по времени - 50. Была получена таблица максимумов вейвлет-преобразования и построены графики зависимости периода и полуамплитуды вариаций блеска от времени, как показано на рис.10.

Из этого примера видно, что основной квазипериод в полосе  $V$  на протяжении 19 лет изменился на 0.2 года, с 1.6 по 1.8 года, но при этом существовал в данных практически непрерывно (в течение приблизительно 11 циклов), и лишь с 2015г. стал преобладающим более длительный квазипериод 4.4 года.

Такое длительное проявление квазипериода в оптическом диапазоне является довольно редким для объектов типа BL Lac. Чаще всего характерные времена вариаций блеска изменяются довольно быстро с течением времени, т.е. время проявления отдельных квазипериодов сравнительно небольшое, в течение нескольких циклов. Такая особенность MRK 421 может быть наблюдательным признаком наличия двойной сверхмассивной черной дыры в галактическом ядре, обеспечивающей поддержание циклической переменности в течение длительного времени. Однако эта гипотеза требует всесторонней проверки с использованием многодиапазонных наблюдательных данных (в том числе поиск корреляций между оптическими и радионаблюдениями, что характерно для MRK 421 [30]).

Но есть еще особенность, которая может играть важную роль в переменности ядра гигантской эллиптической галактики MRK 421. Это крупная спиральная галактика-спутник, которая имеет все признаки активной сейфертовской галактики и оказывает приливное влияние на галактику MRK 421. А

это значит, что наблюдаемая активность MRK 421 может быть связана с взаимодействием с галактикой-спутником, например постоянная подпитка газом области ядра MRK 421 и прецессия аккреционного диска и джета, могут быть привлечены для объяснения устойчивой долговременной переменности MRK 421 [31].

В то же время, анализ публикаций показывал отсутствие подробных сведений о быстрой оптической переменности ядра галактики MRK 421. Полученный в нашей работе результат о наличии низкоамплитудного квазипериодического изменения блеска в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$  с характерным временем 9.3-13.4 дня (что подтверждается анализом данных AAVSO), а также более медленного циклического колебания блеска с характерным временем около 20-30 дней, лучше видимого

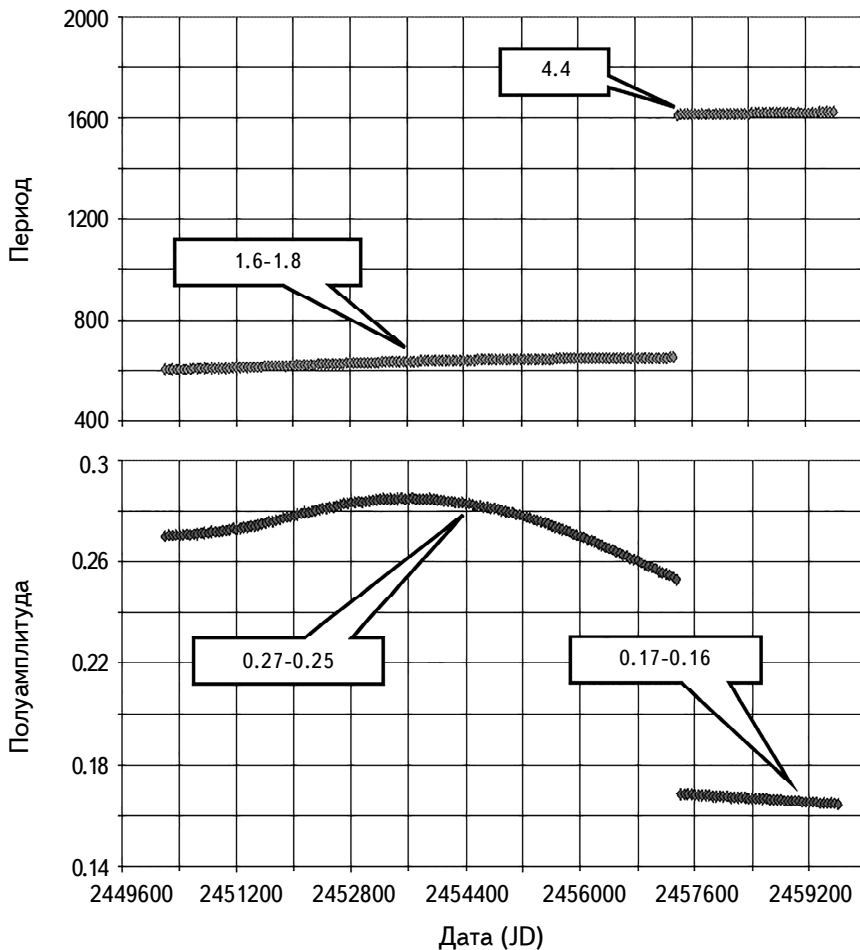


Рис.10. Зависимости "период-время" (верхний график) и "полуамплитуда-время" (нижний график), для MRK 421, полученные в результате WWZ преобразования для кривой блеска в полосе  $V$ .

на данных AAVSO, является новым важным уточняющим результатом.

6. *Заключение.* В работе представлены наблюдения оптической активности ядра галактики MRK 421, в обсерваториях Маяки и Вигорлат с 4 мая 2021г. по 10 июня 2021г., в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , позволяющие выявить характеристики его кратковременной переменности.

Анализ полученных данных разными методами (аппроксимация данных одиночными синусоидами и метод CLEANest) показал, что в кривых блеска присутствуют циклические вариации блеска с периодом от 9.3 до 13.4 дня, в зависимости от оптической полосы. Кроме этого, у исследуемых кривых блеска было трендовое медленное изменение блеска, хорошо описываемое полиномом 3-й степени, с предполагаемым характерным временем 20-30 дней. Однако длины анализируемых кривых блеска были слишком малы, чтобы предположить цикличность этих вариаций.

Наличие этих квазипериодов дополнительно подтверждается анализом данных переменности MRK 421 в полосе  $V$ , из каталога AAVSO (с 14 мая 1996. по 17 мая 2021г.). Периодограммный анализ методом ANOVA в полосе 2-30 дней показал наличие квазипериодов 12.9 дня и 28.4 дня, что довольно близко к результатам анализа кривых блеска обсерватории Маяки. Также подтверждается наличие цикла с квазипериодом в интервале 20-30 дней, что было предположено ранее.

Анализ долговременной переменности по многолетним кривым блеска источника MRK 421 показал наличие квазипериодических вариаций с характерными временами 1.6-1.7 лет, в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , что неплохо согласуется с результатами других авторов и подтверждает наличие устойчивого цикла, регистрируемого во всем оптическом диапазоне.

Работы авторов были поддержаны проектом Латвийского Совета по науке "Совместное латвийско-украинское изучение пекулярной радиогалактики "Персей А" в радио- и оптическом диапазонах". №: lzp-2020 /2-0121". Проект реализуется в Вентспилском университете прикладных наук.

<sup>1</sup> Вентспилский международный радиоастрономический центр (VIRAC)  
Вентспилского университета прикладных наук, Латвия,  
e-mail: magister.phys@gmail.com

<sup>2</sup> Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины  
(РИ НАНУ), Украина

<sup>3</sup> Астрономическая обсерватория Одесского Национального университета  
им. И.И.Мечникова, Украина

<sup>4</sup> Астрономическая обсерватория Вигорлат, Словакия

<sup>5</sup> Астрономическая обсерватория Балдоне Латвийского университета, Латвия

<sup>6</sup> Национальный Центр управления и испытаний космических средств,  
Украина

STUDY OF THE FAST VARIABILITY OF THE BL Lac  
OBJECT MRK 421 IN OPTICAL BANDS

A.SUKHAREV<sup>1,2</sup>, M.RYABOV<sup>1,2</sup>, V.BEZRUKOV<sup>1</sup>, O.ULYANOV<sup>1,2</sup>,  
S.UDOVICHENKO<sup>1,3</sup>, L.KEIR<sup>3</sup>, P.DUBOVSKY<sup>4</sup>, I.KUDZEJ<sup>4</sup>,  
A.KONOVALENKO<sup>1,2</sup>, V.ZAKHARENKO<sup>1,2</sup>, D.BAKUN<sup>6</sup>, I.EGLITIS<sup>5</sup>

MRK 421, is a giant elliptical galaxy in the constellation Ursa Major, whose core has all properties of the BL Lac object. It exhibits high activity and variability from radio to gamma bands on a time scale ranging from a few hours to more than 10 years. MRK 421 has a large companion - a spiral, probably also an active galaxy (MRK 421-5). This paper presents the results of analysis observations (in bands  $V$ ,  $R$ ,  $I$ ) carried out from 4 May 2021 to 10 Jun 2021 at the observatories Mayaki (Ukraine) and Vihorlat (Slovakia), within the framework of the joint Latvian-Ukrainian project to study the variability of bright AGN. In addition, light curves of MRK 421 from the free AAVSO database (American Association of Variable Star Observers) were additionally analyzed to confirm the results of periodogram analysis. As a result, within the studied time interval, MRK 421 was suspected of cyclical variability with a characteristic time in range of 9.3-13.4 days, determined by two different methods (approximation of the data by sinusoids and the CLEANest method), which is confirmed by analysis of longer observations of MRK 421 in V band (according to the data from AAVSO). Additionally, the long-term variability of MRK 421 was analyzed. Result was obtained that in the  $V$ ,  $R$ ,  $I$  light curves of AAVSO, the maxima of LS-periodograms correspond to periods of 1.6-1.7 years. This is close to earlier analysis of the historical light curves of MRK 421, that were obtained by other authors. Also, according to the AAVSO data, it was assumed that MRK 421 has a longer brightness variations cycle with a characteristic time of 20-30 years.

Keywords: *radio galaxy: MRK 421: intra-day and inter-day variability: optical photometry: active galactic nuclei*

## ЛИТЕРАТУРА

1. B.Sbarufatti, A.Treves, R.Falomo, *Astrophys. J.*, **635**, 173, 2005.
2. M.Punch, C.W.Akerlof, M.F.Cawley *et al.*, *Nature*, **358**, 477, 1992.
3. J.A.Gaidos, C.W.Akerlof, S.Biller *et al.*, *Nature*, **383**, 319, 1996.
4. A.Sillanpää, L.O.Takalo, Webt Collaboration, *Proceedings of the 27th Inter-*

- national Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 07-15 August, 2001.
5. *Chen Xu, Hu Shao Ming, Guo Di Fu et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **349**, 909, 2014.
  6. *Zhongli Zhang, Alok C. Gupta, Haritma Gaur et al.*, *Astrophys. J.*, **884**, 125, 2019.
  7. *V.S.Paliya, M.Böttcher, C.Diltz et al.*, *Astrophys. J.*, **811**, 143, 2015.
  8. *X.Liu, M.Q.Lin, J.Liu et al.*, *The Astronomer's Telegram*, 5021, 2013.
  9. *A.Arbet-Engels, D.Baack, M.Balbo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **647**, A88, 2021.
  10. *A.C.Gupta, D.P.K.Banerjee, N.M.Ashok et al.*, *Astron. Astrophys.*, **422**, 505, 2004.
  11. *A.L.Sukharev, M.I.Ryabov, V.V.Bezrukovs*, *Radio Physics and Radio Astronomy*, **24**, 254, 2019.
  12. *A.Sukharev, M.Ryabov, V.Bezrukovs et al.*, *Astrophysics*, **63**, 32, 2020.
  13. *A.Sukharev, M.Ryabov, V.Bezrukovs et al.*, *Galaxies*, **8**, 69, 2020.
  14. *P.J.Benson*, *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*, **72**, 42, 1998.
  15. *D.Boyd.*, *JAAVSO*, **40**, 990, 2012.
  16. *S.N.Udovichenko*, *Odessa Astron. Publ.*, **25**, 32, 2012.
  17. *I.Kudzej, V.E.Savanevych, O.B.Briukhovetskyi et al.*, *Astron. Nachr.*, **340**, 68, 2019.
  18. *B.A.Skiff*, *VizieR Online Data Catalog*, II/277, 2007.
  19. *K.M.Transtrum, J.P.Sethna*, 2012, arXiv:1201.5885v1.
  20. *E.Ostertagova, O.Ostertag*, *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, **12**, 3201, 2016.
  21. *G.Foster*, *Astron. J.*, **109**, 1889, 1995.
  22. *A.Schwarzenberg-Czerny*, *Astrophys. J. Lett.*, **460**, L107, 1996.
  23. *H.Z.Li, Y.G.Jiang, D.F.Guo et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **128**, 074101, 2016.
  24. *A.Mangalam, P.J.Wiita*, *Astrophys. J.*, **406**, 420, 1993.
  25. *S.Kato, J.Fukue*, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **32**, 377, 1980.
  26. *A.B.Kovačević, L.Č.Popović, S.Simić et al.*, *Astrophys. J.*, **871**, 32, 2019.
  27. *N.Fraija, E.Benítez, D.Hiriart et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **232**, 7, 2017.
  28. *R.Chatterjee, A.Roychowdhury, S.Chandra et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **859**, L21, 2018.
  29. *G.Foster*, *Astron. J.*, **112**, 1709, 1996.
  30. *V.A.Acciari, S.Ansoldi, L.A.Antonelli et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **504** 1427, 2021.
  31. *P.W.Gorham, L. van Zee, S.C.Unwin et al.*, *Astron. J.*, **119**, 1677, 2000.