

УДК 52-75, 52-14

В. Пономаренко, канд. фіз.-мат. наук,
А. Сімон,
В. Василенко,
І. Ізвєкова,

О. Баранський, канд. біолог. наук,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

РЕЗУЛЬТАТИ ФОТОМЕТРИЧНОГО ОПТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЧОТИРЬОХ АКТИВНИХ ЯДЕР ГАЛАКТИК У 2018–2019 РОКАХ

Представлено результати систематичного оптичного моніторингу вибраних об'єктів (активних ядер галактик – АЯГ) із контрольного списку СТА (Cherenkov Telescope Array). Спостереження АЯГ було розпочато в січні 2018 року на спостережній станції Київського національного університету імені Тараса Шевченка в с. Лісники за допомогою телескопа-рефлектора АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 2.8$ м). Телескоп АЗТ-8 оснащений ПЗЗ-камерою PL4710-1-BB-E2V та блоком UBVRI фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Для об'єктів 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 було побудовано криві зміни блиску з часом. Також досліджено змінність із часом показників кольору. У низці випадків спостережний матеріал дозволив дослідити для АЯГ змінність протягом доби (IDV), короткотривалу змінність (STV) та довготривалу змінність (LTV).

Ключові слова: активні ядра галактик, фотометрія, оптичний моніторинг.

Вступ

Природа космічних променів гранично високих енергій (КПГВЕ) з енергіями $E > 10^{20}$ еВ залишається невідомою. Їхні потенційні джерела – активні ядра галактик (АЯГ), космологічні гамма-спалахи, припливні руйнування зір в околі надмасивних чорних дір, новонароджені мілісекундні пульсари/магнетари та магнетарні спалахи – мали б розташовуватися в нашій галактиці чи на її близьких околицях на характерних відстанях до $50 \div 100$ Мпк. Залишки Наднових вважаються одними із основних джерел галактичних КП з енергіями до 10^{17} еВ. Експериментальним підтвердженням наявності ядерного компонента КП у залишках є їхнє гамма-випромінювання дуже високих енергій (понад 100 ГеВ), зумовлене непружними зіткненнями КП із мішенями-атомами міжзоряного середовища всередині та в околі залишків.

Ще одним імовірним джерелом КПГВЕ є блазари – підклас активних галактичних ядер (АЯГ), релятивістські струмені яких спрямовані в бік спостерігача ($< 20^\circ$ від променя зору). Розрізняють два типи блазарів: BL Lacertae (BL Lac) об'єкти, що характеризуються наявністю беземісійних оптичних спектрів, та об'єкти з окремими лініями випромінювання, так звані радіоквазари із плоским спектром (FSRQ). Блазари показують змінність практично на всіх довжинах хвиль від радіодіапазону до гамма-променів із часом коливань від кількох секунд до років і навіть десятиків років. Усі ці варіації можна розділити на три групи залежно від їхньої тривалості: змінність протягом доби (IDV), що також іноді називають внутрішньодобовою змінністю, або мікрозмінністю (коливання блиску протягом секунд); короткотривала змінність (STV) із тривалістю в діапазоні від днів до кількох місяців; довготривала змінність (LTV) – від кількох місяців до років [1]. Властивості блазарів, які спостерігаємо в гамма-діапазоні (вони продукують спалахи гамма-частинки), роблять їх хорошими кандидатами для різних досліджень із використанням інструментів високої енергії (ВЕ) і дуже високої енергії (ДВЕ). Найбільш амбітним проектом у вивченні ДВЕ є Масив черенковських телескопів (від англ. Cherenkov Telescope Array (CTA)) з робочим діапазоном енергій від 20 ГеВ до 300 ТеВ. Одним із ключових наукових напрямів СТА є моніторинг позагалактичних об'єктів, а об'єкти типу BL Lac належать до найчисленнішого класу в цьому науковому напрямі [2]. Мультихвильові спостереження є ефективним енергетичним інструментом для вивчення фізичних властивостей астрофізичних об'єктів. З метою забезпечення оптичного спостереження за проектом СТА з початку 2018 р. ми розпочали фотометричний моніторинг вибраних блазарів BL Lac.

Обладнання

АЗТ-8. Телескоп АЗТ-8 ($D = 0.7$ м) знаходиться на спостережній станції "Лісники" Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Модернізований для роботи в прямому фокусі. У цій конфігурації його фокусна відстань $F = 2.83$ м, світлосила $D/F = 1/4$. Телескоп обладнано сучасною ПЗЗ-камерою FLI PL4710MB 1027x1056 пікселів розміром 13×13 мкм із набором UBVRI-фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Масштаб $0.98''/\text{піксель}$, поле зору 16.2 кутових хвилин. Однією з головних наукових програм, що виконують за допомогою цього телескопа, є спостереження активних ядер галактик (АЯГ). Із квітня 2018 р. телескоп входить до списку приладів, що працюють за програмою підтримки в оптичному спектральному діапазоні СТА. На сьогодні за допомогою цього телескопа проведено чимало астрономічних фотометричних (UBVRI) спостережень АЯГ (упродовж понад 60 ночей).

АЗТ-14. Телескоп знаходиться на спостережній станції "Лісники" Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Діаметр дзеркала $D = 0.48$ м. Має дві робочі конфігурації. Перша конфігурація призначена для роботи в прямому фокусі, фокусна відстань $F_1 = 2.24$ м, $D/F = 1/4.6$. У касергенівському фокусі (друга конфігурація, $F_2 = 7.7$ м, $D/F = 1/16$) використовуємо як для роботи із ПЗЗ-камерою Starlight Xpress SXVR-H35 (4008x2672 пікселів, розміром 9×9 мкм) безпосередньо, так і для спектрографа АСП-9. Для реєстрації спектра також використовуємо камеру Starlight Xpress SXVR-H35. На гіді телескопа ($D = 0.13$ м) установлено камеру для утримання об'єктів на щілині спектрографа. У другій конфігурації було проведено пробні фотометричні спостереження АЯГ із СТА-списку. Із квітня 2018 р. телескоп АЗТ-14 входить до списку телескопів, що працюють за програмою підтримки в оптичному спектральному діапазоні СТА.

Методика спостережень та базової обробки матеріалу

Моніторинг АЯГ із СТА-списку було розпочато в січні 2018 р. за допомогою телескопа АЗТ-8 та повного набору (UBVRI) фільтрів системи Джонсона/Бесселя, характеристики яких наведено на рис. 1 і в табл. 1. Серед основних об'єктів спостереження: 1ES 1011+496 ($z = 0.212$), PKS 1222+216 ($z = 0.432$), 1ES 1426+428 ($z = 0.129$), PKS 1510-089 ($z = 0.361$). У статті представлено результати оптичного моніторингу цих об'єктів і дослідження їхньої короткотривалої змінності (STV), довготривалої змінності (LTV) і змінності впродовж доби (IDV).

Таблиця 1

Параметри використаних UBVRI-фільтрів системи Джонсона/Бесселя

Назва фільтра	Ефективна центральна λ , нм	FWHM (півширина) $\Delta\lambda$, нм
U	365.6	34.0
B	435.3	78.1
V	547.7	99.1
R	634.9	106.6
I	879.7	289.2

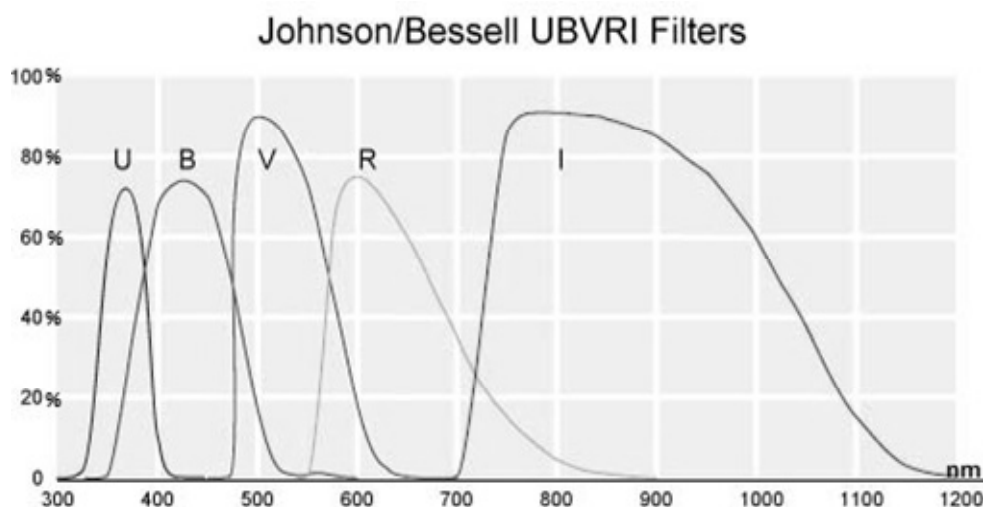


Рис. 1. Криві пропускання використаних UBVRI-фільтрів (по OY – пропускну здатність фільтрів у %, по OX – довжина хвилі у нм)

Методику виконання базових редукцій можна назвати стандартною для кожного використаного інструмента. Найбільше спостережень проведено за допомогою телескопа АЗТ-8. Камера (FLI PL4710MB) на АЗТ-8 має повітряне охолодження, що забезпечує температурний режим роботи від -20 до -40°C . Для врахування залишкового теплового заряду щоночі виконували знімання із закритими шторками камери (dark) з експозиціями широкосмугових фільтрів кількістю 9–15 кадрів. У межах такої самої кількості кадрів виконували знімання з нульовою експозицією (bias). Для врахування особливостей накопичення світлової енергії поверхнею ПЗЗ-камери знімали 5–9 кадрів вранішнього або вечірнього неба (flat-field) для кожного з фільтрів. Урахування bias, dark та flat-field, як і подальше оброблення матеріалу, виконано в програмному середовищі "MaxIm DL".

З метою пошуку короткотривалої змінності (STV) для об'єкта в кожному з фільтрів знімали 9–15 кадрів з експозиціями 30–120 с. Для збільшення відношення сигнал/шум (S/N) із кадрів розраховували середнє медіанне. На момент спостережень об'єкт розташовували максимально близько до геометричного центра камери. Також у центральній ділянці поля обирали 5–9 зір-стандартів, за якими оцінювали зміну блиску об'єкта спостережень.

Для пошуку змінності впродовж доби (IDV) здійснювався моніторинг об'єкта спостережень протягом кількох годин у обраних фільтрах з експозиціями 60–180 с.

Обрана методика оцінювання похибки при побудові кривої зміни блиску між ночами (одна ніч – одна точка в одному фільтрі) та в межах однієї ночі (напр. 100 кадрів) відрізняється. Між ночами похибкою прийнято σ – середнє квадратичне відхилення, поділене на \sqrt{n} – кількість отриманих кадрів (тобто середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного). Довірчим інтервалом є (σ/\sqrt{n}) , помножене на коефіцієнт Стюдента (коефіцієнт було взято для точності 95 % – 2,26). Теоретичні викладки були перевірені шляхом неодноразового фотометрування однієї зорі-стандарту за допомогою інших зір. У межах однієї ночі (напр. для 100 кадрів) знаходили суму або медіану кадрів (напр. по 10). Похибка кожної із 10 отриманих точок дорівнювала $\sigma/(\sqrt{10})$ (де σ – те саме середнє квадратичне відхилення). Оскільки ми шукаємо змінність АЯГ, то довірчий інтервал знаходили по зорі-стандарту співрозмірного блиску. Довірчий інтервал – $\sigma/(\sqrt{10}) \cdot 2,26$ (коэф. Стюдента для точності 95 %). Для різних ночей наша загальна (апаратна та методична) похибка для спостережуваних АЯГ після виконання всіх редукцій коливається в межах $\Delta z \approx 0.06\text{--}0.1$ зоряної величини.

Побудова системи локальних фотометричних стандартів

Як було зазначено вище, для знімків кожного з об'єктів було виконано всі базові редуції. Щоб перейти від рівня накопиченого сигналу до зоряних величин, ми обрали зорі в центральній ділянці кадру і скористалися досвідом закордонних колег [3]. На жаль, не для всіх обраних зір-стандартів удалося встановити чітко визначені видимі зоряні величини в кожному з фільтрів (UBVRI) системи Джонсона/Бесселя. З огляду на це нам довелося створити систему локальних фотометричних стандартів. Для цього було отримано потоки енергії та інструментальні зоряні величини для кожної зір-стандарту. Потім завдяки зорям із відомими видимими величинами, із врахуванням коефіцієнта екстинкції, визначено видимі зоряні величини для інших використаних зір-стандартів. Приклад отриманої залежності між інструментальною та видимою зоряними величинами для фільтра В наведено на рис. 2.

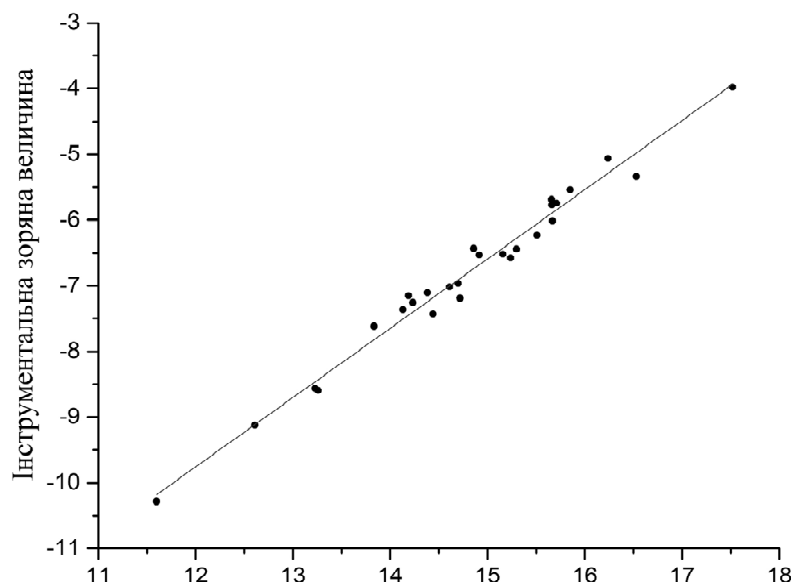


Рис. 2. Приклад графіка залежності видимої та інструментальної зоряних величин для нашої фотометричної системи

Особливості об'єктів дослідження

Найбільше отримано, оброблено та проаналізовано фотометричних (UBVRI) спостережень таких об'єктів: 1ES 1011+496, 1ES 1426+428, PKS 1222+216, PKS 1510-089. Основну інформацію за цими АЯГ наведено у табл. 2. Усі представлені об'єкти відкриті не так давно (табл. 2). Сьогодні їх активно досліджують спектрально та фотометрично. Для АЯГ 1ES 1011+496, PKS 1222+216, PKS 1510-089 наявні також результати досліджень в оптичному спектральному діапазоні [4, 5].

Таблиця 2

Об'єкти спостереження і дослідження

Об'єкт	1ES 1011+496	1ES 1426+428	PKS 1510-089	PKS 1222+216
R.A. (год, хв, с)	10 15 04.1	14 28 32.6	15 12 52.2	12 24 54.5
Дес. (градус, хв, с)	+49 26 01	+42 40 21	-09 06 21.6	+21 22 46
Червоне зміщення	$z=0.212$	$z=0.129$	$z=0.361$	$z=0.435$
Граничні енергії	150 GeV	2500 GeV	150 GeV	100 GeV
Спектральний індекс	3.66	3.5	5.4	3.75
Дата відкриття	2007-09	2002-02	2010-03	
Блиск (V_{mag})	$\approx 16.15^m$	$\approx 16.45^m$	$\approx 16.54^m$	$\approx 17.50^m$

Побудова та аналіз кривих блиску

1ES 1011+496. Для об'єкта побудовано криві блиску з метою пошуку змінності впродовж доби (IDV) та короткочасної змінності (STV) для UVRI-фільтрів. Змінність (STV) було зафіксовано, результати наведено на рис. 3. Також удалося зафіксувати змінність кольорових індексів (рис. 4) для STV, які особливо чітко видно у фільтрах B-V. Отримані результати за змінністю незалежно підтверджено за допомогою математичних тестів (F-тест та χ^2 -тест).

1ES 1426+428. На жаль, не вдалося чітко зафіксувати зміни блиску для об'єкта, оскільки вони співрозмірні з похибкою вимірювань та обчислень. На сьогодні спостереження тривають, основні результати оптичного моніторингу у VRI-фільтрах та кольорові індекси відображено на рис. 5

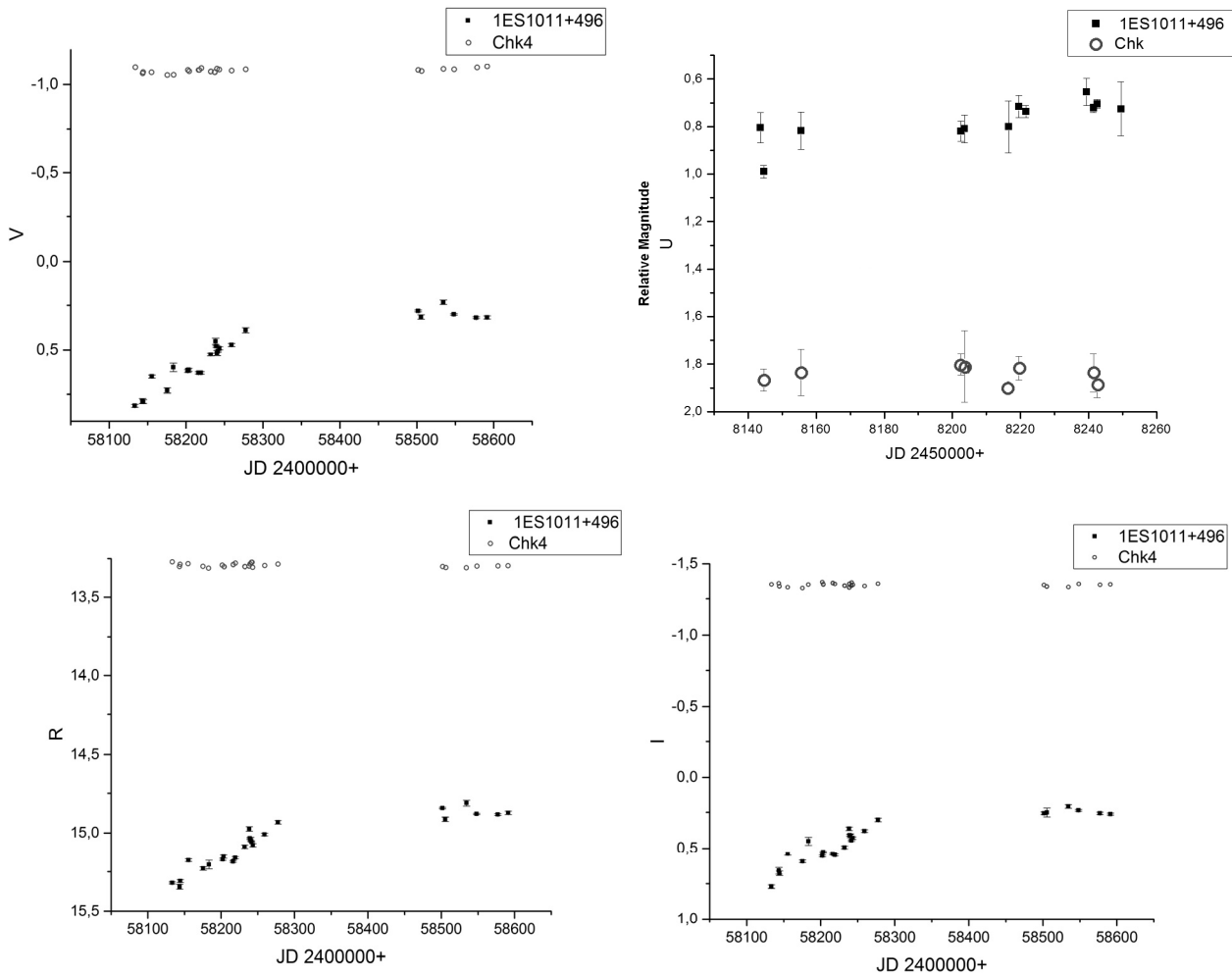


Рис. 3. Заповненими квадратами відображено криві блиску (короткочасної змінності) для АЯГ 1ES 1011+496 у фільтрах U, V, R, I; порожніми колами показано зміни блиску зорі-стандарту

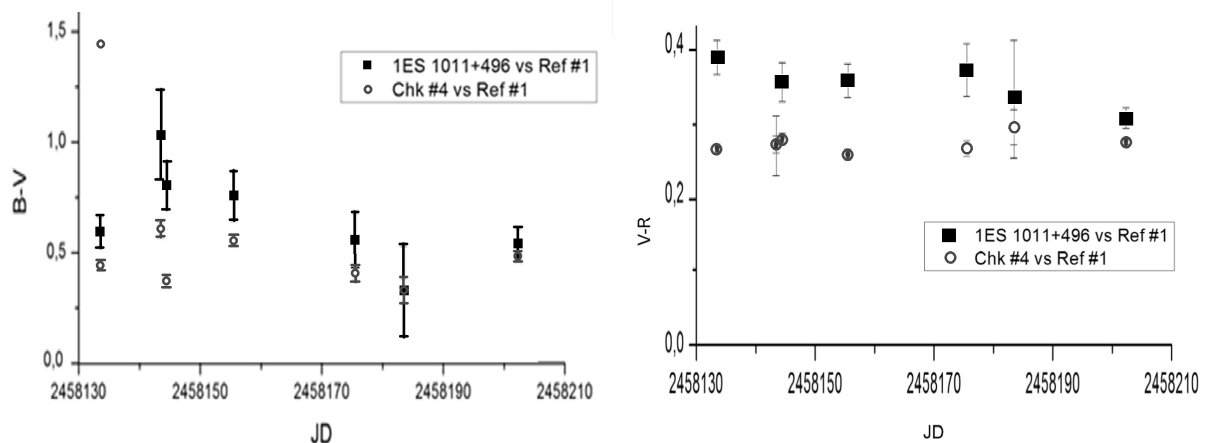


Рис. 4. Заповненими квадратами показано змінність кольорових індексів B-V та V-R для АЯГ 1ES 1011+496; порожніми колами відображено B-V та V-R для зорі-стандарту

PKS 1510-089. Для об'єкта зафіксовано короткотривалу змінність (STV). Для кожного з використаних широкосмугових фільтрів (UBVRI) результати представлено на рис. 6. Також на рис. 6 наведено зафіксовану змінність кольорових індексів. Для наочності та деталізації на рис. 7 окремо показано зміну блиску для PKS 1510-089 у використаних фільтрах (UVRI). Отримані результати для змінності незалежно підтверджено за допомогою математичних тестів (F-тест і χ^2 -тест).

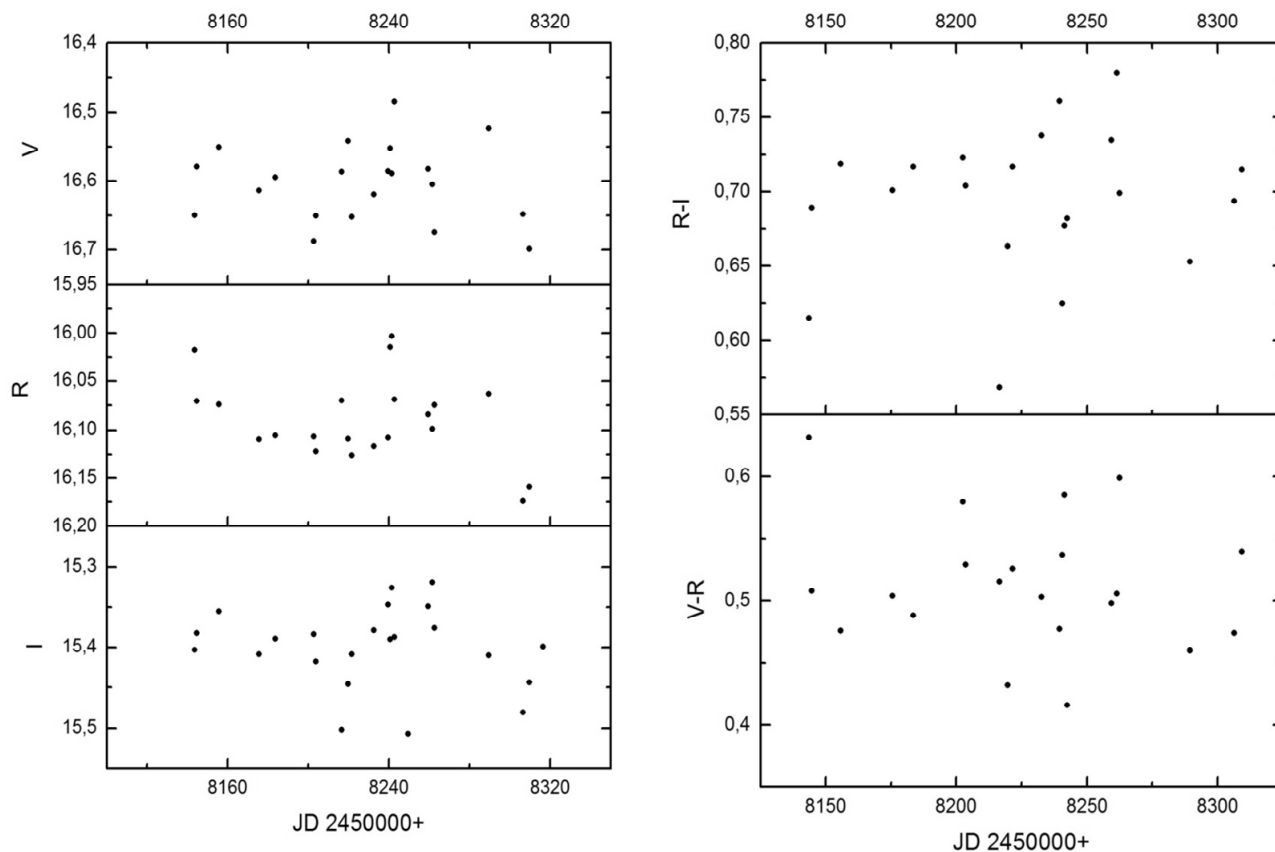


Рис. 5. Ліворуч – криві блиску для АЯГ 1ES 1426+428 у фільтрах V, R, I; праворуч – кольорові індекси R-I та V-R для 1ES 1426+428

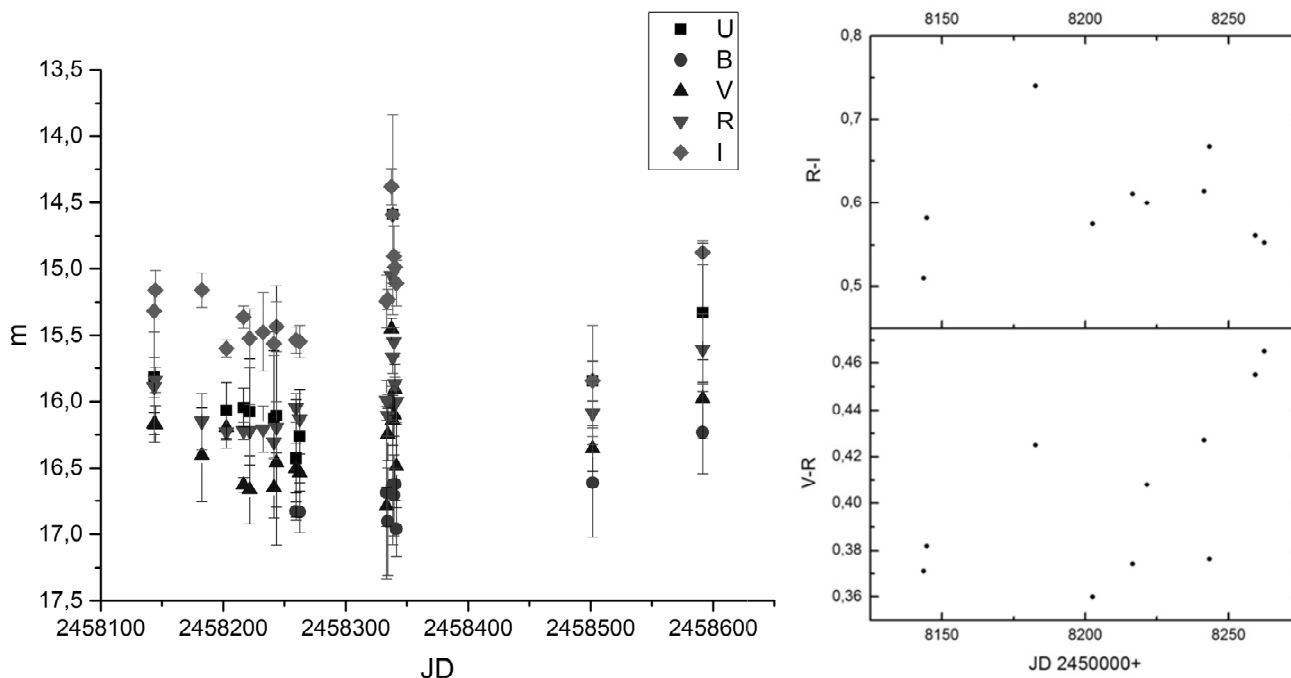


Рис. 6. Ліворуч – криві блиску для АЯГ PKS 1510-089 у фільтрах U, B, V, R, I; праворуч – кольорові індекси R-I та V-R

PKS 1222+216. На даний момент для цього АЯГ також не вдалося підтвердити зміни блиску. Деякі результати оптичного моніторингу та кольорові індекси відображені на рис. 8.

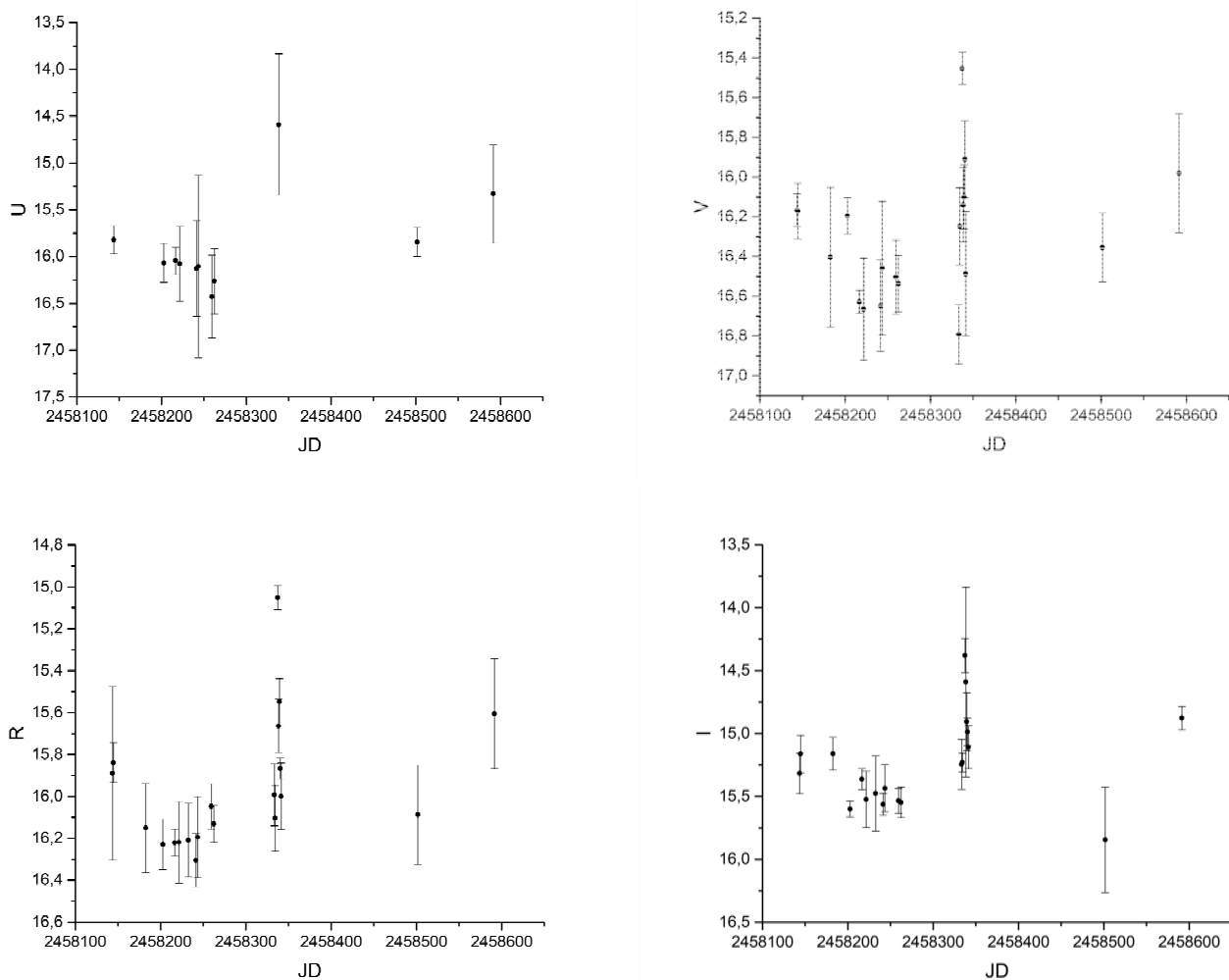


Рис. 7. Зміни блиску для АЯГ PKS 1510-089 у фільтрах U, B, V, R, I

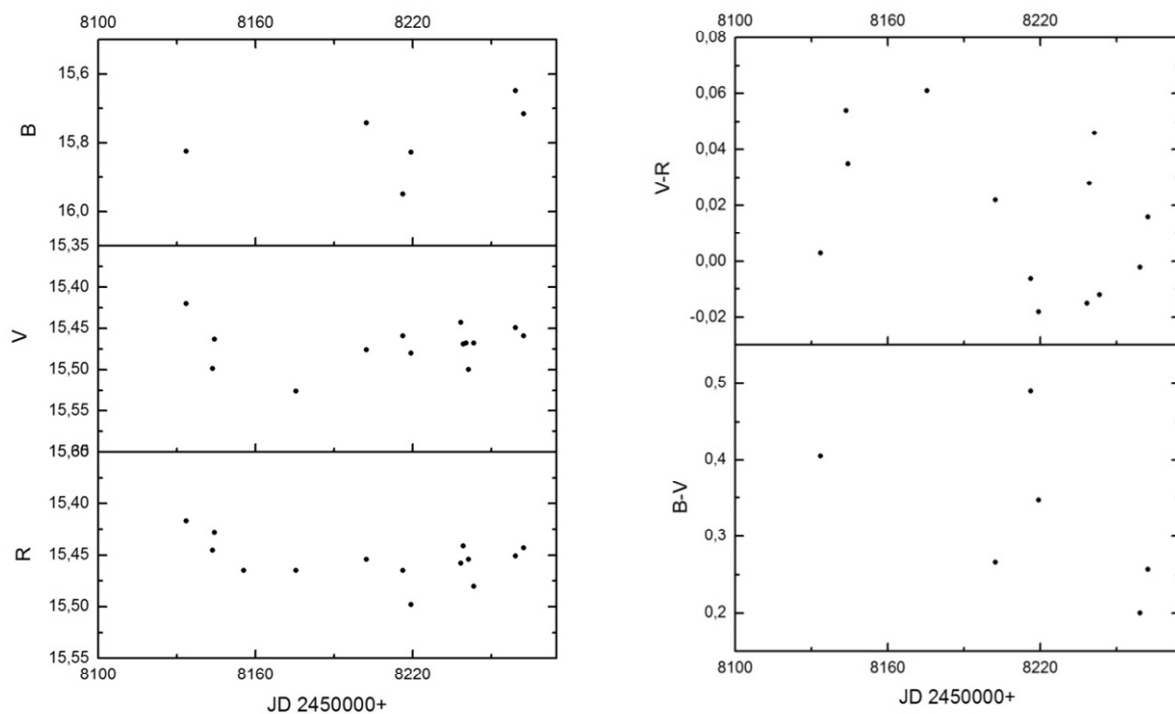


Рис. 8. Ліворуч – видима зоряна величина для АЯГ PKS 1222+216 у фільтрах B, V, R; праворуч – кольорові індекси R-V та B-V для PKS 1222+216

Висновки

Виконано моніторингові фотометричні спостереження активних ядер галактик із СТА-списку в оптичному діапазоні за допомогою телескопів АЗТ-8, АЗТ-14 і UBVRi-фільтрів системи Джонсона/Бесселя. Для об'єктів 1ES 1426+428, 1ES1011+496, PKS 1510-089, PKS 1222-216 побудовано та проаналізовано криві блиску.

Для об'єктів 1ES 1011+496, PKS 1510-089 зафіксовано короткотривалу змінність (STV) з амплітудою від 0.5 до 1 зоряної величини в усіх фільтрах системи Джонсона/Бесселя (UBVRi) за загальної похибки (інструментальної та методичної) $\Delta \Sigma \approx 0.06-0.1$ зоряної величини.

Перелік посилань

1. Gupta, Alok C. et al. Characterizing optical variability of OJ 287 in 2016 – 2017. eprint arXiv:1803.03964. 03/2018.
2. Cherenkov Telescope Array Consortium. Science with the Cherenkov Telescope Array. eprint arXiv:1709.07997. 09/2017.
3. Tuorla Observatory. [Electronic resource]. – URL : <http://users.utu.fi/kani/1m/index.html>.
4. Castignani G. et al. Multiwavelength variability study and search for periodicity of PKS 1510–089. Astronomy and Astrophysics. – 2017. – V. 601, A30.
5. Ahnen M. L. et al. Multi-Wavelength Observations of the Blazar 1ES 1011+496 in Spring 2008. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – V. 459. 2286.

Надійшла до редколегії 07.11.19

В. Пономаренко, канд. фіз.-мат. наук,
А. Симон,
В. Василенко,
И. Извекова,
О. Баранский, канд. биол. наук,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧЕТЫРЕХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК В 2018–2019 ГОДАХ

Представлены результаты систематического оптического мониторинга избранных объектов (активных ядер галактик – АЯГ) из контрольного списка СТА (Cherenkov Telescope Array). Наблюдения АЯГ были начаты в январе 2018 года на наблюдательной станции Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в с. Лесники с помощью телескопа-рефлектора АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 2.8$ м). Телескоп АЗТ-8 оснащен ПЗЗ-камерой PL4710-1-BB-E2V и блоком UBVRi фильтров системы Джонсона/Бесселя. Для объектов 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 были построены кривые изменений блеска со временем. Также исследована переменность со временем показателей цвета. В ряде случаев наблюдательный материал позволил исследовать для АЯГ переменность в течение суток (IDV), быструю переменность (STV) и медленную переменность (LTV).

Ключевые слова: активные ядра галактик, фотометрия, оптический мониторинг.

V. Ponomarenko, Ph.D.,
A. Simon,
V. Vasylenko,
I. Izveкова,
O. Baransky, Ph.D.,
Taras Shevchenko National University of Kyiv

THE RESULTS OF THE PHOTOMETRIC OPTICAL MONITORING OF FOUR ACTIVE GALAXIES IN 2018–2019

Active galactic nuclei (AGN) are a source of very high energies. Blazars are a subclass of active galactic nuclei that can be observed in the optical spectral range. The aim of the study is some BL Lacertae type blazars, which are characterized by a non-emission optical spectrum and exhibit brightness variations at all wavelengths. The results of systematical monitoring of selected objects from the CTA (Cherenkov Telescope Array) optical follow up list, started in January 2018 are presented. The observations are carried out with the AZT-8 ($D = 70$ cm, $F = 2.8$ m) telescope of the observation station Lisnyky of Taras Shevchenko National University of Kyiv. In 2018 the telescope AZT-8 was included in the list of supporting instruments in the CTA consortium. The AZT-8 equipped with the PL4710-1-BB-E2V CCD (1027×1048 pixels, 13×13 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, scale is $0.95''/\text{pixel}$, field of view is 16.2 angular minutes) and broadband Johnson/Bessel UBVRi filters. For processing the software Maxim DL was used. During processing accounting of substrate (bias), dark current, flat-field were taken into account. The fluxes of energy from objects of research with the help of standard stars has been turned into visible stellar magnitudes. Light curves for four objects: 1ES 1011+496, PKS 1222+216, 1ES 1426+428, PKS 1510-089 were plotted. Variability of color indexes with time was investigated. In addition, we determined the variability amplitude and tested all these objects for Intraday Variations (IDV), Short (STV) and Long term variability (LTV) where it was possible. A short-term brightness change (STV) with an amplitude of 0.5 to 1 in all filters (UBVRi) of the Johnson/Bessel system for AGN 1ES 1011+496, PKS 1510-089 was determined. For objects 1ES 1426+428 and PKS 1222+216, the brightness variations do not exceed the total error (instrumental and methodical). The total error is $\Delta \Sigma \approx 0.06-0.1$ magnitude.

Keywords: active galactic nuclei, photometry, optical monitoring.

В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА У 2018 р.

На початок 2018 р. у Астрономічній обсерваторії працює 51 штатний працівник, зокрема 28 науковців (6 докторів наук і 17 кандидатів наук) і 10 сумісників. До складу обсерваторії входять відділ астрофізики (зав. відділу д-р фіз.-мат. наук, проф. Жданов В. І.), сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи (зав. сектору канд. фіз.-мат. наук Клецюков В. В.), та 2 спостережні станції (с. Лісники та с. Пилиповичі). Упродовж року виконувались три бюджетні теми.

Ключові слова: сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи, відділ астрофізики, бюджетна тема.