

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Жиляєв Борис Юхимович

УДК 524.33+524.338.6+519.2

ШВИДКА МАЛОМАСШТАБНА ЗМІННІСТЬ ЗІР

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України, м. Київ.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Гнатик Богдан Іванович,

Астрономічна обсерваторія Київського національного
університету імені Тараса Шевченка МОН України,
м. Київ

провідний науковий співробітник відділу астрофізики;

доктор фізико-математичних наук, професор

Креловські Яцек,

Центр астрономії Університету ім. Миколая Коперника,
м. Торунь, Польща,

професор;

доктор фізико-математичних наук, професор

Самусь Микола Миколайович,

Інститут астрономії РАН, м. Москва, Російська
Федерація,

провідний науковий співробітник відділу
нестационарних зір та зоряної спектроскопії.

Захист відбудеться " 5 " грудня 2014 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою:
ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, м. Київ.

Початок засідання о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ГАО НАН України за адресою:
ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, м. Київ.

Автореферат розісланий " 22 " жовтня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У дисертації розглянуто велике коло проблем, пов'язаних з вивченням властивостей швидкої маломасштабної змінності небесних тіл. Оскільки співвідношення сигнал/шум мале, значну увагу приділено розробці статистичних методів виявлення і оцінювання сигналів на тлі перешкод. Робота базується переважно на аналізі даних фотометрії, що отримані за допомогою Синхронної Мережі віддалених Телескопів (СМТ), розташованих на території України, Росії, Болгарії та Греції. Дослідження включає також інтерпретацію спостережень швидкої маломасштабної змінності ряду зір, що спалахують, хромосферноактивних, катаклізмичних змінних зір, а також короткотривалих спалахів у ядрах галактик та космічних гамма-сплесків.

Актуальність теми. Змінність, видима неозброєним оком, належить до початкової епохи зоряної фотометрії. Інтерпретація даних фотометрії, коли шуми близькі або перевершують рівень корисного сигналу, вимагає інших підходів. Статистичні методи, що базуються на статистиці квантів, дозволяють вивчати амплітудно-частотні властивості змінних сигналів, прихованих у шумах. Тому актуальною стала задача розробки та впровадження строгих статистичних методів для аналізу даних астрономічних вимірювань.

Найменш розробленими є підходи виявлення сигналів з апріорно невідомими властивостями. Тому в роботі особливу увагу приділено непараметричним методам виявлення і оцінювання сигналів, прихованих у шумах, зокрема розробці та чисельній реалізації методів виявлення стохастичної змінності, відновленню сигналів на заданому рівні довірчої ймовірності, а також визначенню стандартних похибок оцінок параметрів сигналів і їх функцій розподілу. З урахуванням специфіки астрономічних спостережень, зокрема пов'язаної з погодними умовами, актуальною є задача розробки методів виявлення сигналів і оцінювання похибок їх параметрів у нерегулярних часових рядах даних.

Виявлення рідкісних і короткочасних фотометричних подій робить актуальним застосування техніки збігів, що широко використовується в ядерній фізиці. Це призвело до розробки нового підходу – синхронних спостережень одного об'єкта на декількох віддалених телескопах. У свою чергу, це потребувало розробки нових ефективних методик, зокрема обробки даних багатоколірних спостережень для вирішення завдань швидкої колориметрії і спектрофотометрії зір.

При вивченні фізичних процесів за участю релятивістських об'єктів, чорних дір і нейтронних зір спостерігаються варіації з характерним часом у мілісекундному і мікросекундному діапазонах. При цьому ми зіштовхуємося з гострим дефіцитом квантів, і стає актуальною необхідність розроблення специфічних методів для виявлення і оцінювання ультрависокочастотної змінності.

Важкою проблемою є аналіз властивостей нестационарних сигналів зі складною частотно-часовою структурою. У даному випадку класичний фур'є-аналіз виявляється не придатним. Тому актуальним стає завдання якісного та кількісного аналізу транз'єнтів як на основі чисельного моделювання, так і лінійного вейвлет-перетворення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконується в межах програм фундаментальних досліджень, які проводились і продовжують проводитися в ГАО НАН України за наступними темами:

- Розробка методів спостережень і аналізу мікрозмінності зір (номер державної реєстрації 81033577, 1982–1985 рр.).
- Дослідження мілісекундних варіацій блиску зір за даними спостережень у мережі оптичних телескопів країн чорноморського регіону (номер державної реєстрації 0101U004425, 2001–2005 рр.).
- Фотометричні дослідження явищ, індукованих спалахом у червоних карликових зорях (номер державної реєстрації 0197U129701, 2004–2006 рр.).
- Дослідження швидкої змінності зір з Синхронною Мережею Телескопів (номер державної реєстрації 0101U000794, 2007–2009 рр.).
- Швидкісна спектродиметрія нестационарних зір з Синхронною Мережею Телескопів (номер державної реєстрації 0102U345103, 2010–2014 рр.).

Мета, задачі та методи дослідження. Метою роботи є дослідження властивостей швидких варіацій блиску, кольорів і деяких спектральних особливостей змінних зір малої амплітуди. Часовий масштаб досліджуваних процесів лежить в основному в субсекундному діапазоні, а в ряді випадків простягається в мілісекундний діапазон. Оскільки відношення сигнал/шум мале, значну увагу приділено розробці і програмній реалізації статистичних методів виявлення і оцінювання сигналів на тлі перешкод, що базуються головним чином на статистиці фотонів. Робота ґрунтується на аналізі даних фотометрії, отриманих з Синхронною Мережею віддалених Телескопів, розташованих на території України, Росії, Болгарії та Греції. Дослідження містить також інтерпретацію спостережень швидкої маломасштабної змінності ряду спалахуючих, хромосферноактивних, катаклізмичних змінних зір, а також короткострокових спалахів у ядрах галактик та космічних гамма-сплесків.

У рамках цієї роботи вирішувалися такі задачі:

- Розробка та реалізація методів виявлення мікрозмінності та аналізу швидкоплинних явищ у змінних зорях з використанням техніки цифрової фільтрації та інтегрального рівняння Манделя, яке спирається на статистику фотонів.
- Розробка та чисельна реалізація методів виявлення стохастичної змінності та екстремально слабких спалахів зір на основі інтегральних перетворень кривих блиску.
- Розробка та чисельна реалізація методів виявлення і відновлення сигналів на заданому рівні довірчої ймовірності методами фур'є-аналізу та лінійного безперервного вейвлет-перетворення.
- Чисельна реалізація методу виявлення і оцінювання параметрів гармонік на основі функції правдоподібності, а також стандартних похибок оцінок амплітуди, частоти і фази та їх функцій розподілу.
- Розробка методів виявлення гармонічних сигналів і похибок оцінювання їх параметрів у нерегулярних часових рядах даних на основі критерію Хотеллінга і методу Барнінга.

- Створення Синхронної Мережі віддалених Телескопів і апаратно-програмних засобів синхронізації телескопів для швидкої фотометрії зір.
- Аналіз факторів, що обмежують точність наземної фотометрії.
- Детальний кількісний аналіз депресії фотосферного випромінювання під час спалахів EV Lac за даними швидкої UBVRI-фотометрії з Синхронною Мережею Телескопів.
- Дослідження різних проявів ефекту високочастотних коливань оптичного випромінювання спалахів зір типу UV Cet, які базуються на даних швидкої UBVRI-колориметрії з Синхронною Мережею Телескопів.
- Діагностика спалахів зір типу UV Cet за пульсаціями оптичного випромінювання методами корональної сейсмології.
- Якісна і кількісна інтерпретація результатів колориметрії спалахів EV Lac за даними спектрофотометрії з безщілинним спектрографом.
- Кількісний аналіз спостережень активності в бальмерівському континуумі і лініях Ca II H, K зорі EV Lac, що спалахує в спокійному стані.
- Інтерпретація результатів вимірювань високочастотної змінності хромосферноактивної зорі V390 Aur.
- Інтерпретація високочастотного флікерінгу і коливань блиску катаклізмичної змінної KR Aur.
- Якісна і кількісна інтерпретація короткочасних співпадаючих спалахів у ядрах галактик за даними синхронних спостережень на віддалених телескопах.
- Детальний кількісний аналіз швидких варіацій блиску космічних гамма-спалахів (BATSE-тригери 207, 432, 512, 2463).

Об'єкт дослідження – зорі типу UV Cet, що спалахують, хромосферноактивні зорі типу BY Dra, катаклізмичні змінні типу KR Aur, а також явища короткотривалих спалахів у ядрах галактик і космічних гамма-сплесків.

Предмет дослідження – властивості оптичного випромінювання фотосфер, хромосфер, корон змінних зір, діагностика оптичних особливостей досліджуваних змінних зір, ядер галактик і космічних джерел, що спалахують.

Методи дослідження – детектування та оцінювання швидкої маломасштабної змінності обраних змінних зір на базі застосування строгих статистичних методів детектування сигналів на тлі перешкод, а також модельних розрахунків, які базуються на властивостях космічної плазми, і порівняння розрахунків зі спостереженнями.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримано наступні нові результати:

1. Вперше розроблено статистичний підхід до фотометрії зір на основі інтегрального рівняння Манделя. Показано, що всі статистичні моменти невідомої інтегральної інтенсивності можуть бути виражені через нормовані факторіальні моменти, які, в свою чергу, можуть бути визначені за даними відліків фотометра.
2. Вперше розроблено і застосовано в астрономічній практиці повністю формалізовані процедури виявлення і оцінювання параметрів гармонік (амплітуди, частоти і фази) на основі функції правдоподібності в припущенні, що похибки вимірювань є гауссовим обмеженим білим шумом.

3. Створено Синхронну Мережу віддалених Телескопів, що є інноваційним підходом в астрофізиці і не має аналогів у світі. СМТ об'єднує телескопи чотирьох обсерваторій в Україні, Росії, Болгарії та Греції, обладнаних GPS-приймачами для синхронізації локальних систем часу фотометрів відносно UTC з точністю до однієї мікросекунди.

4. Виявлено високочастотні коливання яскравості (ВЧК) під час спалахів зір типу UV Cet. Вперше і одноразово цей унікальний ефект був спостережений Родоно в 1972 р. під час спалаху зорі III 2411 у Гіадах. Через 25 років завдяки використанню СМТ нами була підтверджена реальність швидких коливань оптичної яскравості під час спалахів і виключено атмосферне або інструментальне походження ВЧК.

5. На основі методів корональної сейсмології, виходячи з сонячно-зоряної аналогії і в припущенні зв'язку пульсацій оптичного випромінювання спалахів з радіальними швидкими магнітозвуковими коливаннями, визначено основні параметри петель спалахів, оцінено параметри спалахової плазми і магнітного поля в області енерговиділення ряду спалахів на активних червоних карликах EV Lac і YZ CMi.

6. Вперше на підставі теорії статистики фотонів виявлено змінність хромосферноактивного гіганта V390 Aur у діапазоні 0.1–10 Гц. Запропоновано зв'язати спостережувані закономірності варіацій блиску з ансамблем мікроспалахів. Згідно запропонованій моделі, типовий мікроспалах має максимальну амплітуду 0.005 зоряної величини, частоту спалахів $\nu_0 = 0.15 \text{ c}^{-1}$ і тривалість близько 4 секунд.

7. Вперше проведено швидкісну фотометрію галактик в оптичному діапазоні в фотометричній системі UBVRi синхронно на декількох віддалених телескопах. Спостереження показали збіг події з тривалістю кілька сотих часток секунди і амплітудою до 0.4 зоряної величини у фільтрі В у ядрі галактики NGC 7331. Застосування техніки збігів для сейфертівської галактики NGC 1068 також показало короткий спалах, що складається зі швидкого імпульсу з часом наростання $\sim 0.1 \text{ c}$ і часом загасання близько 1 с. Спостереження швидких спалахів у ядрах галактик підтверджує гіпотезу про існування чорних дір проміжних мас у центрах галактик і щільних кульових скупчень.

8. Вперше виявлено високочастотні коливання в коротких гамма-спалахах за даними каталогу BATSE ЗВ. Високочастотні коливання з періодами в діапазоні мілісекунд і амплітудами кілька десятків відсотків світності спалаху можуть бути пов'язані з акрецією речовини, що утворилася після приливного руйнування нейтронної зорі чорною дірою в подвійній системі. Запропоновано можливий сценарій для такого явища – злиття чорних дір і нейтронних зір сонячної маси.

9. У роботі отримано ряд нових прикладних результатів:

- Під керівництвом та за участю дисертанта розроблено і створено швидкісний двоканальний UBVR-фотометр. Два екземпляри фотометра встановлено на телескопах СМТ. Максимальна швидкість запису кривих блиску становить 25 кГц.

- Проведено цикли спостережень для визначення точності наземної фотометрії. Розроблено техніку «точкових спектрів» для підвищення точності диференціальної фотометрії зір на практиці.
- Виконано чисельне моделювання з метою визначення обмежень для проведення надвисокочастотної (НВЧ) фотометрії. Показано, що фотометрія розріджених потоків квантів, неможлива в часовому поданні, може з успіхом проводитися в частотному представленні Фур'є. Показано, що швидкісна фотометрія до межі частот 1 МГц видається реальним завданням.

Практична цінність отриманих результатів.

1. Вперше розроблений на основі інтегрального рівняння Манделя метод виявлення стохастичної змінності може бути використаний для виявлення і оцінювання широкосмугових сигналів в обмеженій смузі частот при аналізі інтенсивності випромінювання космічних джерел.

2. Розроблений метод інтегральних перетворень кривих блиску з використанням кумулятивного розподілу Пуассона і статистики Фішера для визначення рівня значущості за результатами декількох статистичних випробувань може бути застосований для виявлення і дослідження підпорогових сигналів у техніці, радіо- та оптичній астрономії.

3. Розроблена модифікація алгоритму пошуку періодичностей за методом Барнінга для аналізу даних на нерегулярній часовій сітці, а також вперше розроблений метод побудови емпіричних квантилів для строгої оцінки достовірності гармонік можуть бути застосовані для пошуку і оцінювання періодичностей при аналізі рядів астрономічних спостережень з пропусками, зокрема астероїдів, змінних зір, транзитів екзопланет.

4. Розроблено концепцію створення СМТ, що є інноваційним підходом в астрофізиці і не має аналогів у світі. Розроблена техніка колірних треків на основі UVRI колірних діаграм дозволяє обчислювати характеристики космічної плазми в змінних космічних джерелах випромінювання. Ця техніка може бути використана в подальшому при аналізі експериментальних даних у фізиці змінних зір.

5. Виявлені високочастотні коливання яскравості під час спалахів зір дозволяють на основі методів корональної сейсмології та зв'язку пульсацій оптичного випромінювання з радіальними швидкими магнітозвуковими коливаннями оцінювати параметри плазми спалаху і магнітного поля в області енерговиділення і вивчати структуру корон зір.

6. Розроблений дисертантом метод фотометрії розріджених потоків квантів з використанням частотного представлення Фур'є дозволяє виконувати НВЧ-фотометрію небесних об'єктів аж до частот 1 МГц.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані в таких науково-дослідних установах як Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Кримська астрофізична обсерваторія, Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень при НАН України, Інститут космічних досліджень НАН та ДКА України, Радіоастрономічний інститут НАН України.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів впливає з наступного. 1) Розроблені методи цифрової фільтрації, виявлення і оцінювання параметрів сигналів базуються на математично строгій статистичній теорії виявлення сигналів на тлі перешкод. 2) Фотометричні спостереження використовують апаратні засоби, що пройшли метрологічну атестацію. 3) Використовуються фізично обґрунтовані і практично перевірені методи обробки даних у галузі спектрофотометрії. 4) Аналіз експериментальних даних супроводжується чисельним моделюванням і порівнюється з результатами інших авторів.

Особистий внесок здобувача. Роботи [3, 5–8, 19, 33, 41] виконані дисертантом самостійно. У роботах [2, 4, 9–13, 15, 18, 20, 21, 23–28, 30–32, 34, 37–40, 42–44] дисертант є першим автором, брав участь у постановці завдання, створенні програмного забезпечення, проведенні розрахунків, а також в обговоренні результатів.

В роботах [1, 17] дисертант брав участь у постановці завдання, розробці методів розрахунку і створенні програмного забезпечення, брав участь в обговоренні результатів та підготовці статей.

В роботі [22] дисертант брав участь у постановці завдання та проведенні розрахунків.

В роботах [14, 16, 35–36] дисертант брав участь у проведенні розрахунків, обробці даних та обговоренні результатів.

В роботі [29] дисертант брав участь у розробці методу розрахунків і його чисельної реалізації, а також в обговоренні результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи представлялися на численних наукових конференціях, частина яких перерахована нижче.

- "Flares and Flashes" IAUC No. 151 (Німеччина, Зоннеберг, 1994 р.);
- "Wolf-Rayet stars: binaries, colliding winds, evolution", IAUS No. 163 (Італія, Ла Біодола, Ельба, 1994 р.);
- "Hydrogen Deficient Stars", IAUQ (Німеччина, Бамберг, 1995 р.);
- ESO / OSA Topical Meeting on Astronomy with Adaptive Optics – Present Results and Future Programs (Німеччина, Гарчинг, 1998 р.);
- 4th Astronomical Conference Hellenic Astronomical Society (HEL.AS) (Греція, Самос, 1999 р.);
- Міжнародна конференція "Balkan Meeting of young Astronomers" (Болгарія, Белоградчик, 2000 р.);
- Міжнародна конференція "Astronomy In Ukraine – 2000 And Beyond (Impact of International Co-operation)" (Україна, Київ, 2000 р.);
- Міжнародна конференція "Астроєко-2002: Состояние и перспективы международных исследований по наблюдательной астрономии, экологии и экстремальной физиологии в Приэльбрусье" (РФ, КБР, Терскол, 2002 р.);
- Міжнародна конференція "Околоземная астрономия 2003" (РФ, КБР, Терскол, 2003 р.);

- 6th Astronomical Conference Hellenic Astronomical Society (HEL.AS) (Греція, Пентелі, Афіни, 2003 р.);
- Міжнародна конференція "AGN Variability from X-Rays to Radio Waves" (Україна, АР Крим, с. Науковий, 2004 р.);
- Міжнародна конференція "Астрономія в Україні – минуле, сьогодення і майбутнє" (Україна, Київ, 2004 р.);
- "Конференція, присвячена 60-річчю Кримської астрофізичної обсерваторії" (Україна, АР Крим, с. Науковий, 2005 р.);
- Міжнародна конференція "Near-Earth Astronomy – 2007" (РФ, КБР, Терскол, 2007 р.);
- Міжнародна конференція "150 лет спектральным исследованиям в астрофизике: от Кирхгофа до наших дней" (Україна, АР Крим, с. Науковий, 2009 р.);
- Міжнародна конференція "The Zeiss-50" telescope: the first hundred years working for astronomy" (Україна, АР Крим, с. Науковий, 2012 р.);
- SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Conference AS105, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy (Нідерланди, Амстердам, 2012 р.).

Результати досліджень багаторазово доповідалися на семінарах відділу фізики зір та галактик та об'єднаному астрофізичному семінарі Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладено в 44 публікаціях, з яких 30 – статті у спеціалізованих реферованих журналах "Кинематика и физика небесных тел", "Астрономический журнал", "Письма в Астрономический журнал", "Известия Крымской Астрофизической Обсерватории", "Bulgarian Astronomical Journal", "Baltic Astronomy", "Astronomische Nachrichten", "Astronomy and Astrophysics", "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society" [1–30] і 14 – статті в працях конференцій [31–44]. У 6 публікаціях дисертант є єдиним автором і у 18 фігурує як перший автор.

Перераховані публікації були процитовані 147 разів у роботах, включених до бази даних SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS) (виключаючи самопосилання).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку цитованої літератури (216 найменувань). Загальний обсяг дисертації складає 302 сторінки. Дисертація містить 94 рисунки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** наводиться характеристика дисертації, обґрунтування актуальності предмета досліджень, головної мети, завдань і методів їх вирішення. Розглядаються питання наукової новизни, практичної цінності результатів. Розглядається особистий внесок автора в спільних роботах, наводяться дані про апробацію результатів та їх публікацію.

Розділ 1. Статистична фотометрія зір: концепція та методи. У розділі представлено новий підхід до пошуку мікрозмінності швидкоплинних явищ у змінних зорях на основі статистичної фотометрії. У статистичній фотометрії ми

застосовуємо три методи: 1) цифрову фільтрацію, яка дозволяє помітно поліпшити фотометричну якість кривої блиску за рахунок зниження шумів, 2) співвідношення Манделя для факторіальних моментів на основі статистики фотовідліків для оцінки часових змін потужності флуктуацій, 3) інтегральних перетворень кривої блиску, які трансформують часові ряди фотометричних даних у рівні значущості для кожного фотометричного відліку.

У підрозділі 1.1 ми розглядаємо деякі аспекти теорії лінійної фільтрації, щоб знайти реальний низькоамплітудний сигнал у ряді вимірів яскравості зорі. Ми отримаємо стандартну похибку і коваріаційну функцію в кривій блиску після фільтрації з довільним низькочастотним фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою.

У підрозділі 1.2 наводиться математичний формалізм для задач фільтрації. Ми розглянемо фільтрацію потоку даних низькочастотним фільтром для детектування малоамплітудної зоряної змінності. Частотна фільтрація може бути виконана шляхом згортки відліків ряду вимірювань з коефіцієнтами імпульсної характеристики фільтра:

$$n_f(k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)n(k-i).$$

Імпульсна характеристика є відгук фільтра на сигнал у формі дельта-функції. Фільтрація зменшує дисперсію ряду і робить відліки корельованими. Кореляційна функція фільтрованого ряду є

$$r_f(k) = \frac{\sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)h(i+k)}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} h^2(i)}.$$

Визначимо інтервал кореляції фільтрованого ряду як

$$\tau_{corr} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} |r_f(i)|.$$

Легко показати, що для обмеженого стаціонарного білого гауссового шуму він дорівнює одиниці. Труднощі фільтрації усуваються шляхом використання найбільш досконалого, близького до ідеального фільтра Кайзера [45]. Ідеальний низькочастотний фільтр з частотою обрізання $\nu_c < 1$ з частотною та імпульсною характеристиками

$$H(\nu) = \begin{cases} 1, & \nu \leq \nu_c \\ 0, & \nu > \nu_c \end{cases}, \quad (1)$$

$$h(k) = \frac{\sin(\pi\nu_c k)}{\pi k},$$

не може бути практично реалізований, тому що число членів повинно бути нескінченним, щоб виконати умову (1). Коефіцієнти фільтра Кайзера мають вигляд:

$$h(k) = h(-k) = \frac{\sin(\pi\nu_c k)}{\pi k} \cdot \frac{I_0(\eta\sqrt{1-(k/l)^2})}{I_0(\eta)},$$

де $I(x)$ – модифікована функція Бесселя нульового порядку, η – параметр, що входить у модель фільтра, l – число пар коефіцієнтів фільтра. Три основних параметри: смуга пропускання, ширина перехідної області та величина заглушення в децибелах, повністю визначають величини η , l і фільтр у цілому. Використовуючи фільтр Кайзера, ми можемо встановити обмеження на величину сигналу, який може просочитися через бокові пелюстки в частотну смугу.

У підрозділі 1.3 отримано формули для стандартної похибки і кореляційної функції кривої блиску після фільтрації з низькочастотним фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою. Перевірка запропонованої методики показала, що цифрова фільтрація може призводити до істотного виграшу при детектуванні маломасштабної змінності.

У підрозділі 1.4 розглядається статистичний підхід до зоряної фотометрії. Квантова фізика розглядає випромінювання як мікроскопічний газ фотонів з неklasичними властивостями. Одна з найвідоміших неklasичних властивостей світла – квантові флуктуації. Всі джерела з постійною інтенсивністю демонструють очевидні коливання фотовідліків, які випадкові за своєю природою. Ці відліки підлягають розподілу Пуассона

$$p(n, \tau) = \frac{n_0^n}{n!} \cdot e^{-n_0}.$$

Тут n – число фотонів за час накопичення τ , $n_0 = qI\tau$ – їх середнє значення, де $I = \text{const}$ – постійна інтенсивність, q – квантова ефективність. У разі змінної інтенсивності I ми маємо інтегровану інтенсивність

$$U(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} I(t') dt'.$$

У загальному випадку величина U має невідомий розподіл $p(U)$. У цьому випадку розподіл відліків описується фундаментальним рівнянням Манделя:

$$p(n, \tau) = \int_0^\infty \frac{U^n}{n!} \cdot e^{-U} p(U) dU,$$

де лівостороння p – те, що може бути виміряне, правостороння p – те, що підлягає визначенню. Слід зазначити, що $p(U)$ – невідома функція, так що ми маємо інтегральне рівняння Фредгольма першого роду. Найпростіший шлях рішення полягає в застосуванні методу моментів. Функція розподілу може бути визначена через її моменти

$$\langle U^k \rangle, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \infty,$$

де $\langle \dots \rangle$ означає усереднення за часом. Можна показати, що моменти мають вигляд

$$\langle U^k \rangle = \left\langle \frac{n!}{(n-k)!} \right\rangle = \langle n(n-1)\dots(n-k+1) \rangle = n_{[k]},$$

де $n_{[k]}$ – так звані факторіальні моменти. Зручно використовувати нормалізовані факторіальні моменти

$$h_{[k]} = \frac{n_{[k]}}{\langle n \rangle^k} .$$

У разі пуассонівської статистики можна показати, що всі моменти $h_{[k]} \equiv 1$ для будь-якого k . Отже, якщо $h_{[k]}$ буде відмінне від одиниці, можна стверджувати, що змінність виявлено. Момент другого порядку має найвищу практичну цінність. Він визначає відносну потужність флуктуацій і може бути виражений через вимірювані величини

$$h_{[2]} = \frac{\sigma^2 - \langle n \rangle}{\langle n \rangle^2} + 1 .$$

Стандартне відхилення для $h_{[2]}$ має вигляд [31]:

$$\text{std}(h_{[2]}) = \frac{1}{\langle n \rangle} \sqrt{\left(\frac{2}{N}\right)} ,$$

де N – довжина сегмента даних.

У підрозділі 1.5 розглянуто питання виявлення стохастичної змінності. Актуальна величина $h_{[2]}$, викликана атмосферними мерехтіннями, може бути визначена за вимірюваннями зорі порівняння. Різниця $h_{[2]}$ за зорею і зорею порівняння визначає відносну потужність флуктуацій, притаманну змінній зорі.

У підрозділі 1.6 розглянуто інтегральні перетворення кривих блиску для виявлення маломасштабної змінності з кількома синхронно працюючими телескопами. Перетворимо криві блиску, використовуючи кумулятивний розподіл Пуассона

$$P(n, n_0) = \sum_{k=0}^n \frac{n_0^k}{k!} \cdot e^{-n_0} ,$$

який дорівнює ймовірності отримати значення відліку n . Тоді вираз

$$SL = 1 - P(n, n_0) \approx 1 - \Phi[n, n_0]$$

визначає рівень значущості отримати значення відліку n у кривій блиску. Якщо ми розглядаємо завдання для декількох синхронно працюючих телескопів, можна сконструювати ефективний алгоритм на основі статистики SL . Для обчислення спільної ймовірності можна записати

$$SL_m = -2 \sum_{i=1}^m \ln(SL_i) ,$$

де m – число синхронно працюючих телескопів. Ясно, що статистика SL_m слідує χ_{2m}^2 розподілу ймовірності з $2m$ степенями вільності.

Розділ 2. Спектральний аналіз астрономічних рядів даних. Ми використовуємо спектри потужності Фур'є і вейвлет-перетворення для пошуку високочастотних періодичних сигналів у рядах даних вимірювань. Спектральна щільність потужності $P(f)$ може бути обчислена як перетворення Фур'є аподизованої автоковаріаційної функції $c(k)$

$$P(f) = \delta t \left| \sum_{k=-(L-1)}^{L-1} \omega(k) c(k) e^{-i2\pi f k \Delta t} \right|.$$

Ми використовуємо спектральне вікно Тьюки

$$\omega(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi k}{L}\right), & |k| \leq L \\ 0, & |k| > L \end{cases}.$$

Тут $L < N$ – довжина відрізка автоковаріаційної функції, розмір якого дозволяє регулювати спектральну роздільну здатність. Для вікна Тьюки число степенів вільності $\nu = 2.67 \cdot N/L$ і спектральна роздільна здатність $1.33/L\Delta t$ на рівні півширини спектрального піка. З рівняння ми можемо встановити поріг для виявлення сигналу на рівні довірчої ймовірності β :

$$P_n(f) \geq \chi_{\nu, 1-\beta}^2.$$

Для аналізу часових рядів із змінною потужністю ми застосовуємо безперервне вейвлет-перетворення, притримуючись підходу, запропонованого в [47]. Нехай x_n – часовий ряд з часовою роздільною здатністю δt і $n = 0, \dots, N-1$. Ми використовуємо вейвлети Морлі, що складаються з плоскої хвилі, модульованої гауссіаною:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i6\eta} e^{-\eta^2/2},$$

де $\eta = t/s$ – безрозмірний часовий параметр, t – час і s – характерний часовий масштаб. Можна визначити вейвлет-спектр потужності як $|W_n(s)|^2$. Для білого шуму $|W_n(s)|^2 = \sigma^2$, де σ^2 – дисперсія шуму. Розподіл локального значення шумового вейвлет-спектру потужності має вигляд

$$\frac{|W_n(s)|^2}{\sigma^2} \Rightarrow \frac{\chi_2^2}{2}$$

для будь-якого t і s , де χ_2^2 – χ -квадрат розподіл з двома степенями вільності.

У підрозділі 2.2 розглядаються питання виявлення і оцінювання гармонічних і квазігармонічних сигналів при фотометрії зір методом максимальної правдоподібності. Найбільш відомою з них є функція правдоподібності, введена Фішером.

Якщо відомі спектральні характеристики похибок вимірів, може бути побудована коваріаційна матриця похибок оцінюваних параметрів сигналу на основі нерівності Крамера–Рао.

В цьому розділі наведено повністю формалізовані процедури виявлення і оцінювання параметрів гармонік (амплітуди, частоти і фази) на основі функції правдоподібності. Розроблено процедуру виявлення вузькосмугових (квазігармонічних) сигналів, оцінки ефективної ширини їх спектру та ефективної амплітуди. Процес вимірювання блиску зорі можна представити у вигляді дискретної адитивної моделі

$$u_k = u(t_k) = s(\lambda, t_k) + n(t_k),$$

де u_k – вектор вимірювань; $s(\lambda, t)$ – корисний сигнал; λ – вектор невідомих параметрів сигналу, що підлягає оцінці; $n(t_k)$ – вектор похибок (шумів) вимірювань. Функцію правдоподібності можна записати у вигляді:

$$p_{\lambda}(u_k) = \frac{1}{(2\pi\sigma)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N (u_k - s(\lambda, t_k))^2\right].$$

Дисперсія вибіркової оцінки скалярного параметра сигналу визначається нерівністю Крамера–Рао [5]:

$$D[\lambda] = \sigma_{\lambda}^2 = \langle (\tilde{\lambda} - \lambda)^2 \rangle \geq \left\langle \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \ln p_{\lambda}(u) \right\rangle^{-1}.$$

Дисперсія спільної вибіркової оцінки параметрів сигналу буде визначатися діагональними елементами оберненої матриці Фішера:

$$D[\lambda_i] = \sigma_{\lambda_i}^2 = \langle (\tilde{\lambda}_i - \lambda_i)^2 \rangle \geq \Phi_{ii}^{-1},$$

де $\|\Phi_{ij}^{-1}\|$ – матриця, обернена до інформаційної матриці Фішера. Оцінки максимальної правдоподібності при великій енергії сигналу ($Q \gg 1$) будуть асимптотично нормальними і асимптотично ефективними, тобто нерівність Крамера–Рао визначає граничну точність параметра $\tilde{\lambda}$. Ряд вимірів для гармонічного сигналу має вигляд:

$$u(t) = a \cos(2\pi ft + \varphi) + n(t).$$

Обчислюючи елементи інформаційної матриці Фішера, знаходимо дисперсії спільних вибірових оцінок амплітуди, частоти і фази гармонічного сигналу

$$\begin{aligned} D[a] &= \frac{\tilde{a}^2}{Q}, \\ D[f] &= \frac{12}{(2\pi)^2 T^2 Q}, \\ D[\varphi] &= \frac{4}{Q}, \\ Q &= \frac{\tilde{a}^2}{\sigma^2} \cdot \frac{N}{2}, \end{aligned}$$

де Q – відношення сигнал/шум у одиничній смузі частот.

У підрозділі 2.3 отримано незміщені оцінки амплітуд і фаз гармонік, їхніх похибок і коваріацій за відліками даних у випадкові моменти часу. Наведено процедуру виявлення гармонічних сигналів на основі критерію Хотеллінга в припущенні, що похибки вимірювань є нормальним обмеженим білим шумом. Повний виклад проблем можна знайти в роботі автора [5].

Строгу постановку задачі про знаходження спектру сигналу з нерегулярного ряду запропоновано Дімінгом в [68]. Ми доповнюємо формалізм Дімінга процедурами оцінювання похибок параметрів сигналів. Представимо процес вимірювань у вигляді дискретної адитивної моделі:

$$u_k = u(t_k) = f(\theta(t_k)) + \varepsilon(t_k), \Lambda k = 1, 2, 3, \dots, n,$$

де \mathbf{u}_k – вектор спостережень; $f_k = f(\theta, t_k)$ – корисний сигнал відомої форми, що залежить від скінченного числа невідомих параметрів θ ; \mathcal{E}_k – вектор похибок (шумів) вимірювань. Вектор t_k у загальному випадку утворює довільну часову сітку. Запишемо модель спостережень у матричній формі:

$$\mathbf{u} = \mathbf{S}\theta + \varepsilon .$$

Оцінку $\tilde{\theta}$ вектора знаходимо методом найменших квадратів, мінімізуючи вираз

$$\varepsilon^T \varepsilon = (\mathbf{u} - \mathbf{S}\theta)^T (\mathbf{u} - \mathbf{S}\theta) .$$

Отримаємо систему нормальних рівнянь

$$\begin{aligned} (\mathbf{S}^T \mathbf{S}) \tilde{\theta} &= \mathbf{S}^T \mathbf{u} , \\ \tilde{\theta} &= (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{u} . \end{aligned}$$

Якщо похибки вимірювань, крім того, розподілені нормально $\varepsilon \propto N_n(0, \sigma^2 I_n)$, то справедливо:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta} &\propto N_m(\theta, \sigma^2 (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1}), \\ (\tilde{\theta} - \theta)^T \mathbf{S}^T \mathbf{S} (\tilde{\theta} - \theta) / \sigma^2 &\propto \chi_m^2, \\ \text{cov}[\tilde{\theta} - \theta, \sigma^2] &= 0, \\ \frac{e^T e}{\sigma^2} &= (n - m) \sigma^2 \propto \chi_{n-m}^2 , \end{aligned}$$

де m – число компонент вектора θ ; N_m – m -мірний нормальний розподіл; χ_m^2 – χ -квадрат розподіл з k степенями вільності.

Для виявлення гармонічного сигналу в випадку нерегулярного ряду скористаємося розподілом відхилень вибіркової оцінки $\tilde{\theta}$. Якщо дисперсія шумів визначається з ряду спостережень, то для шумового сигналу ($\theta = 0$) скористаємося статистикою T^2 Хотеллінга [69]:

$$T^2 = \tilde{\theta}^T \mathbf{S}^T \mathbf{S} \tilde{\theta} / \tilde{\sigma}^2 .$$

Критичне значення T_{cr}^2 має вигляд:

$$T_{cr}^2 = T_{\alpha; m, n-m} = m F_{\alpha; m, n-m} ,$$

де F – розподіл Фішера з m і $n - m$ степенями вільності при рівні значущості α . Знайдемо похибки оцінювання параметрів гармонічного сигналу. Для дисперсій a і φ отримаємо:

$$\begin{aligned} D[a] &= (\nabla_{\theta} a)^T [\tilde{\theta}] (\nabla_{\theta} a) , \\ D[\varphi] &= (\nabla_{\theta} \varphi)^T [\tilde{\theta}] (\nabla_{\theta} \varphi) , \end{aligned}$$

де $\mathbf{D}[\tilde{\theta}] = \sigma^2 (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1}$ – коваріаційна матриця оцінок вектора $\tilde{\theta}$. Запишемо вирази для дисперсій похибок амплітуди і фази гармоніки в явному вигляді:

$$D[a] = \frac{1}{a^2} \frac{\sigma^2}{d} [n_s \theta_c^2 - 2n_{cs} \theta_c \theta_s + n_c \theta_s^2] ,$$

$$D[\varphi] = \frac{1}{a^4} \frac{\sigma^2}{d} [n_c \theta_c^2 - 2n_{cs} \theta_c \theta_s + n_s \theta_s^2] \cdot$$

У підрозділі 2.4 наводиться аналіз нерегулярних часових рядів методом Барнінга. Для аналізу даних на нерегулярній часовій сітці були використані алгоритми пошуку періодичностей за методом Барнінга [48], оцінювання достовірності виявлених гармонік на основі емпіричних квантилів, отриманих в результаті моделювання та оцінювання параметрів знайдених гармонік за методом найменших квадратів.

Розділ 3. Синхронна Мережа Телескопів. У розділі описано структуру Синхронної Мережі віддалених Телескопів для швидкої фотометрії зір.

СМТ є новим підходом в астрофізиці. СМТ об'єднує телескопи чотирьох обсерваторій в Україні, Росії, Болгарії та Греції, обладнаних GPS-приймачами для синхронізації локальних систем часу фотометрів відносно UTC.

У цьому розділі наводиться опис програмних засобів спеціалізованої спостережної Синхронної Мережі віддалених Телескопів і апаратури для реєстрації та прив'язки моментів спостережень до шкали часу UTC.

Флагманом СМТ є спостережний комплекс швидкісної фотометрії на базі 2-метрового телескопа фірми Карл Цейс на піку Терскол і швидкісного двоканального фотометра, виготовленого в Дослідному виробництві Головної астрономічної обсерваторії НАН України в 1980-і роки [4]. Синхронний комплекс телескопів для швидкісної фотометрії включає 2-м телескоп фірми Карл Цейс обсерваторії Рожен (Болгарія), 50-дюймовий і 1.25-м (АЗТ-11) телескопи Кримської астрофізичної обсерваторії, а також 30-дюймовий телескоп обсерваторії Стефаніон (Греція). Комплекси оснащено швидкісними фотометрами і системою синхронізації на базі GPS-приймача з точністю до 1 мкс.

Далі ми коротко перерахуємо основні новаторські результати, отримані з використанням СМТ. Використання СМТ призвело до нових істотних можливостей у виявленні екстремально слабкої зоряної змінності.

За даними швидкої UBVR-I-фотометрії, отриманими з Синхронною Мережею віддалених Телескопів у ході міжнародних спостережень червоного карлика EV Lac, який спалахує, досліджено тонку часову структуру спалахів і підтверджено появу високочастотних коливань під час спалаху. ВЧК розглядаються як швидкі магнітозвукові коливання в магнітних корональних петлях зорі. Теорія дає можливість оцінити характеристики корональних петель (температуру, електронну концентрацію, характерні розміри). Це відкриває нові перспективи для вивчення корон зір, що спалахують, «корональної сейсмології».

Отримано нові дані в галузі швидкої колориметрії зоряних спалахів. Детальний колориметричний аналіз, проведений за даними спостережень в UBVR-I-системі на декількох віддалених телескопах з високим часовим розділенням, дозволив відмітити зміну в міру розвитку спалахів EV Lac таких характеристик спалахової плазми як оптична товща, електронна концентрація і температура.

Швидкісний синхронний моніторинг на двох віддалених телескопах дозволив виявити короточасні спалахи в ядрах деяких галактик [20]. На рис. 1 представлено спостереження сейфертівської галактики NGC 1068. Криві блиску спостерігалися з роздільною здатністю 10 мілісекунд з 2-м телескопом на піку Терскол (верхній рисунок) і кримським 50-дюймовим телескопом (нижній рисунок) у фільтрі В. Спалах демонструє швидке імпульсне наростання блиску (~ 0.1 с) з подальшим загасанням близько 1 с. Спільна довірча ймовірність сплеску становить 99.99988 %. Короточасні спалахи можуть бути безпосередньо пов'язані з процесами акреції в околі компактних об'єктів, і виявлення таких подій може забезпечити нас унікальною інформацією про чорні діри в центрах галактик і щільних кульових скупчень.

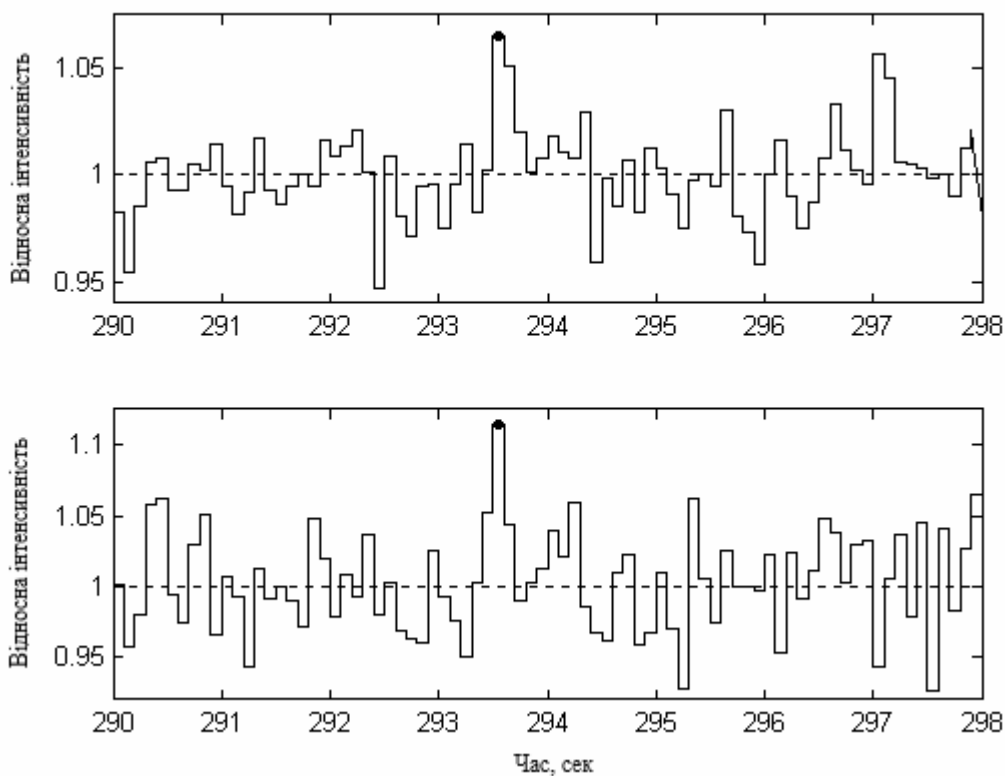


Рис. 1. Спалах в ядрі сейфертівської галактики NGC 1068 22 вересня 2004 р., 00:30:00.19 UT. Синхронні спостереження на 2-м телескопі на піку Терскол (верхній рисунок) і 50-дюймовому телескопі КрАО (нижній рисунок) у фільтрі В. Криві блиску з роздільною здатністю 10 мілісекунд згорнуто до роздільної здатності 0.5 с.

Розділ 4. Швидка спектродіагностика і колориметрія небесних об'єктів.

Застосування нових технологій спостережень з Синхронною Мережею Телескопів і нових методів обробки даних дозволило отримати ряд нових результатів: були виявлені 1) депресії фотосферного випромінювання під час спалахів EV Lacertae на 1–4%, 2) високочастотні коливання оптичного випромінювання спалахів зір типу UV Cet, 3) варіації емісій в бальмерівських лініях і лініях Ca II H, K у зорі EV Lac, що спалахує, в субсекундному діапазоні.

Спостереження, показані на рис. 2, були виконані в 1995 р. на 1.25-м телескопі АЗТ-11 в Криму з UBVR-I-фотометром-поляриметром. Багатоколірні високошвидкісні синхронні спостереження дозволили виявити нові маломасштабні прояви спалахової активності у зорі EV Lac. Прояви складаються зі спалаху і пов'язаного з ним падіння інтенсивності у В та І фільтрах. Ці структури кратероподібної форми центровані на піку спалаху. Отримані результати повинні привести до нового розуміння фізики зоряних спалахів.

У підрозділі 4.2 розглянуто високочастотні коливання оптичного випромінювання спалахів зір типу UV Cet. Спостережні дані для спалахів зорі EV Lac, що наводяться тут, були отримані на чотирьох обсерваторіях протягом 19 ночей у вересні-жовтні 1998 року. Наведені докази про високочастотні коливання були підтверджені завдяки синхронним спостереженням на декількох телескопах. Порівняння двох вимірів, отриманих на різних телескопах, показало очевидну кореляцію даних, значущу на довірчому рівні більше ніж 99% (рис. 3). Виходячи з наведених фактів, ми можемо з упевненістю зробити висновок, що атмосферне або інструментальне походження високочастотних коливань може бути виключено з високим ступенем ймовірності.

У підрозділі 4.3 ми наводимо повний колориметричний аналіз двох спалахів EV Lac, зареєстрованих у ході синхронного моніторингу на декількох телескопах у вересні 2004 року. На рис. 4, 5 представлено криві блиску і колірні треки другого 107-секундного спалаху, виявленого 12 вересня 2004 р. Всі чотири обсерваторії в Україні, Росії, Греції та Болгарії зареєстрували цю подію. Рис. 4 демонструє гарну узгодженість U-кривих блиску, одночасно отриманих в обсерваторіях в Криму, Стефаніоне і Белоградчику. Згладжені дані ясно показують присутність ВЧК на спадаючій частині спалаху.

Використовуючи колірні треки, отримані з UBVR-I-колірних діаграм, можна обчислити характеристики плазми з самого раннього етапу розвитку спалаху. Як свідчать результати колориметричного аналізу, показані на рис. 5, випромінювання в максимумі спалаху має спектр абсолютно чорного тіла.

Колірні треки вказують на наступні сценарії. На початку на інтервалі ~ 10 с спалах досягає максимуму, розташованого в зоні, яка займає випромінювання абсолютно чорного тіла з $T = 17000\text{--}22000$ К. Потім спалах починає коливатися між областями, які відповідають оптично товстій і оптично тонкій плазмі. Наприкінці спалаху колірний трек переміщується в зону випромінювання водневої плазми, оптично тонкої для бальмерівського континууму з $T_e \sim 10000$ К. Деякі точки треку, відмічені товстими колами, відповідають переходам через лінію випромінювання абсолютно чорного тіла. Далі наведено дослідження корон зір, що спалахують, методами корональної сейсмології. Досліджено квазіперіодичні пульсації оптичного випромінювання спалаху на активному червоному карлику YZ CMi, виявлені в одному з найбільш потужних і тривалих спалахів 9 лютого 2008 р. на піку Терскол за спостереженнями в смузі U. Виходячи з діагностичного методу, запропонованого в роботі [52], були отримані формули, що дозволяють оцінювати температуру T , концентрацію n і магнітне

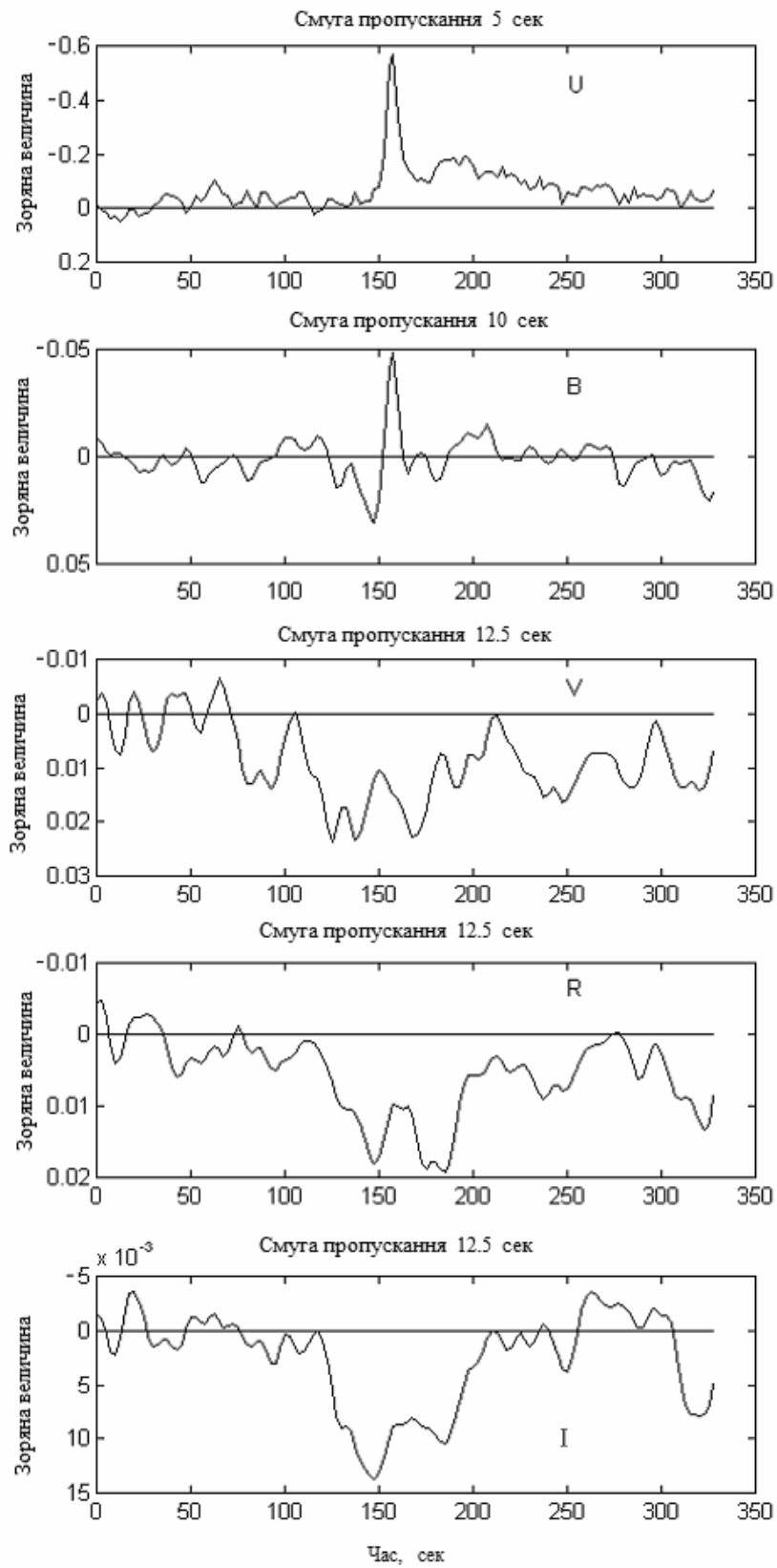


Рис. 2. EV Lac 5 жовтня 1995 р. 23:47:36 UT. UBVRI-фільтри зверху вниз. Кримська астрофізична обсерваторія.

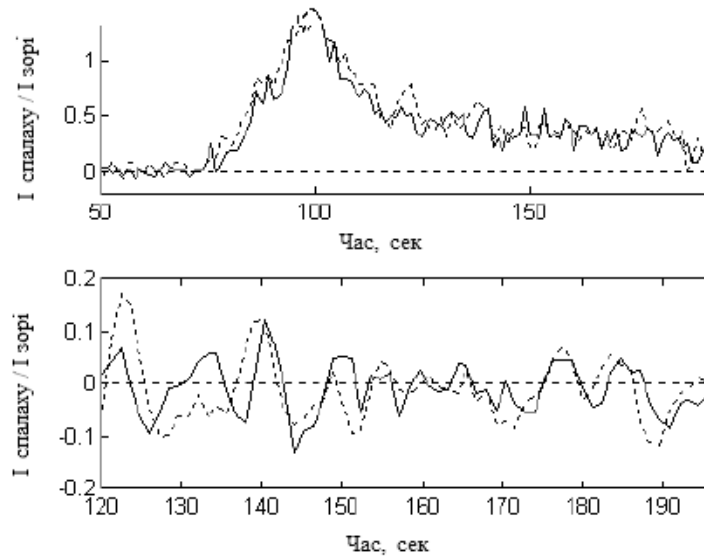


Рис. 3. Фрагменти високочастотних коливань у фільтрі В (нижня панель) і основна крива блиску (верхня панель) за спостереженнями EV Lac у Криму (суцільна крива) та Греції (точкова крива) 11 вересня 1998 р., 21:55:02 UT (максимум).

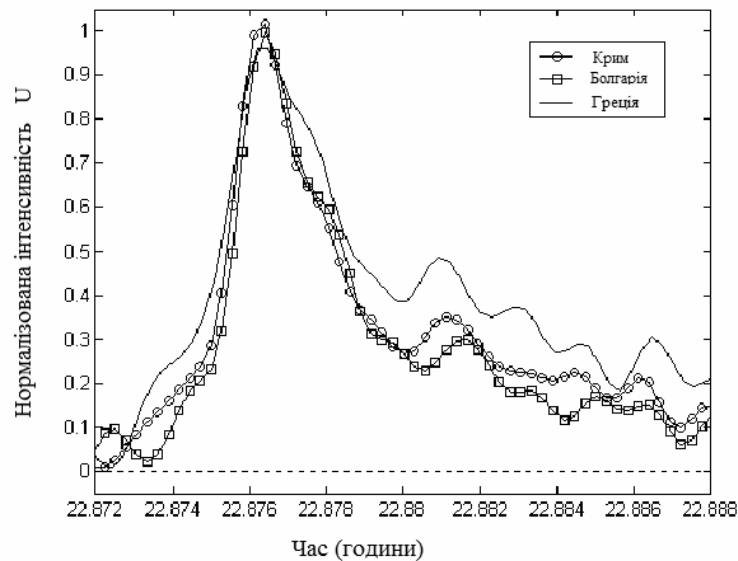


Рис. 4. Синхронні криві блиску спалаху 12 вересня 2004 р., отримані на трьох телескопах в Україні (кілця), Греції (точки) і Болгарії (квадрати).

поле V спалахової петлі за спостережуваними параметрами осциляцій випромінювання: періодом T_p , глибиною модуляції M і добротністю Q . За параметрами пульсацій випромінювання визначено значення температури ($T \approx 3 \cdot 10^7$ K), концентрації плазми ($n \approx 2 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$) і магнітного поля (150 Гс) в області спалаху.

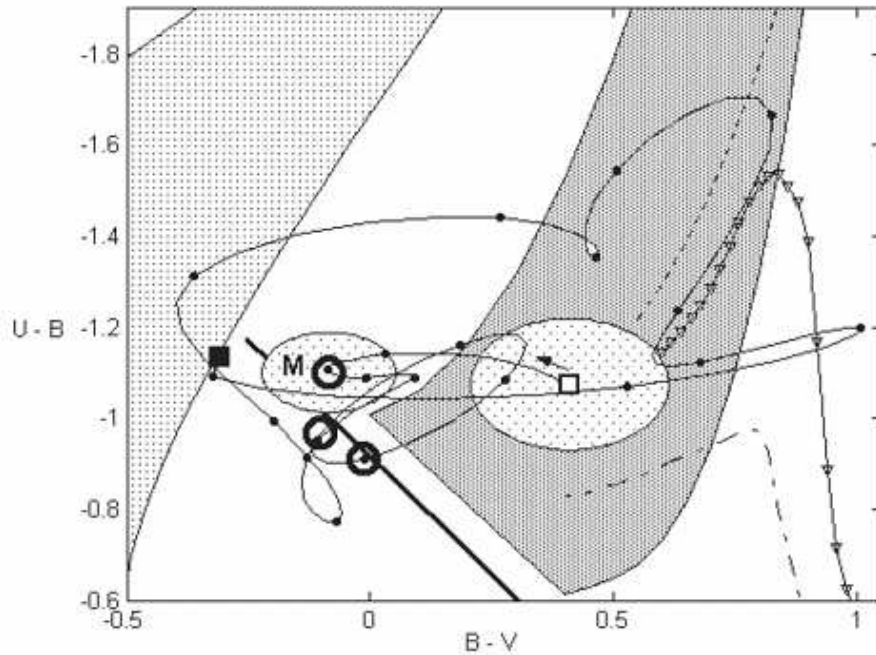


Рис. 5. Колірні треки спалаху 12 вересня 2004 р. (тривалість 107 с), за спостереженнями на кримському 1.25-м рефлекторі АЗТ-11. 95%-еліпси похибок показано на початку і в максимумі (літера М) спалаху. Початок і кінець спалаху позначені відкритим і заповненим квадратами. Маркери (малі заповнені кола) позначають 5-секундні інтервали. Суцільна товста лінія відповідає випромінюванню абсолютно чорного тіла. Температура зростає знизу вгору до 50000 К. Точки треку, марковані товстими колами, відповідають перетинанню лінії випромінювання абсолютно чорного тіла.

Далі розглядається колориметрія зір за даними спектрофотометрії з безщілинним спектрографом. Показано часову еволюцію колірних характеристик власного випромінювання спалаху 10 серпня 2010 р. Знаючи спостережувану амплітуду спалаху в смузі U, температуру фотосфери EV Lac (3700 K [53]) і температуру в максимумі спалаху, можна легко оцінити розмір спалаху. Лінійний розмір спалаху 30 травня 2010 р. у максимумі світності становить приблизно 7% радіуса зорі або близько 0.5% площі видимого диска зорі. Далі розглянуто спостереження активності зорі EV Lac у спокійному стані. За нашими даними спектр потужності EV Lac у спокійному стані на рис. 6 демонструє варіації в емісійних лініях водню і Ca II H, K, бальмерівському континуумі і, можливо, в емісії гелію He I λ 402.6 і 447.1 нм і кремнію Si I λ 390.5 нм.

Амплітуда варіацій інтенсивності в лінії H β становить близько 0.01 зоряної величини. Варіацій інтенсивності в навколишньому континуумі не виявлено.

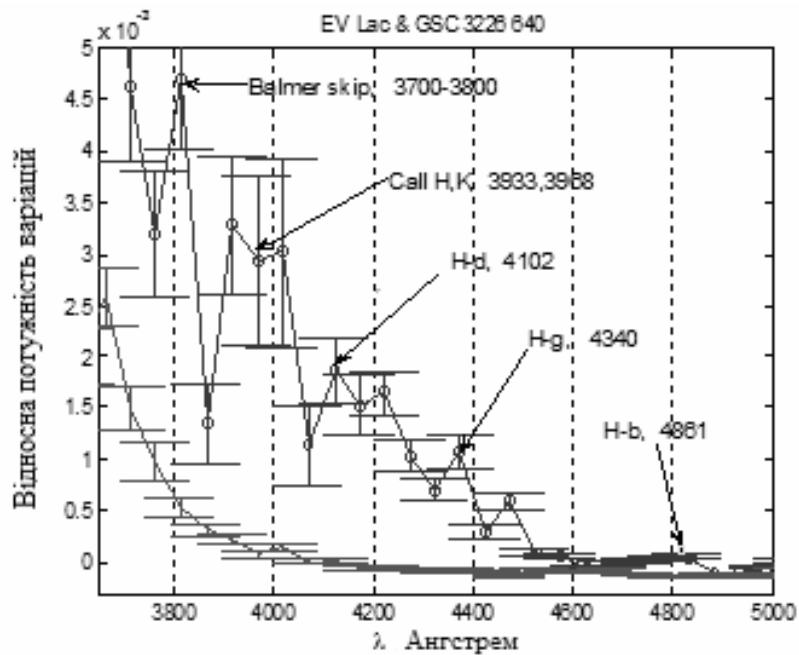


Рис. 6. Потужність варіацій у спектрах EV Lac (кільця) і зорі порівняння GSC 3226 640 (без маркерів). Наведено бари помилок вимірювань. Спектри зір отримано одночасно на телескопі Цейс-600, пік Терскол, 30 травня 2010 р.

У підрозділі 4.4 розглядається високочастотна змінність хромосферноактивної зорі V390 Aur. V390 Aur є хромосферноактивним гігантом пізнього спектрального класу, що швидко обертається. Синхронна високошвидкісна UVRI-фотометрії V390 Aur і опорних зір проводилася в 2002–2009 роках на піку Терскол, в обсерваторіях у Криму і Белоградчику. Спостереження були спрямовані на пошук змінності в мілісекундному і субсекундному діапазонах. Була знайдена змінність із максимумом на частоті близько 1 Гц, яка поступово слабшає в діапазоні 0.1–10 Гц, зі середньоквадратичною амплітудою близько 0.005 зоряної величини в смугах UV (рис. 7). Було показано, що криві блиску V390 Aur містять мікроспахи, які можуть бути відповідальні за спостережувану активність у субсекундному діапазоні, з відносною потужністю коливань $(2.1 - 3.0) \cdot 10^{-5}$ в UV-смугах.

Згідно нашої «іграшкової моделі», «типовий» мікроспалах має максимальну амплітуду 0.005 зоряної величини, частоту спалахів $\nu_0 = 0.15 \text{ с}^{-1}$ і тривалість близько 4 секунд. Вихід енергії від усереднених за ансамблем мікроспалахів оцінюється як $E = 8 \cdot 10^{-4}$ зоряної світності. Таким чином, на V390 Aur усереднений за ансамблем мікроспалахів може випромінювати ту саму енергію, що і великий спалах на Сонці.

У підрозділі 4.5 розглянуто флікерінг (flickering) і коливання катаклізмичної змінної KR Aurigae. KR Aur, що відома як антикарликова нова в тісній подвійній системі, що складається з білого карлика і червоного карлика з періодом обертання 3.91 години. Флікерінг, як передбачається, виникає від гарячого диска, розташованого близько до білого карлика. Наші спостережні дані дозволяють

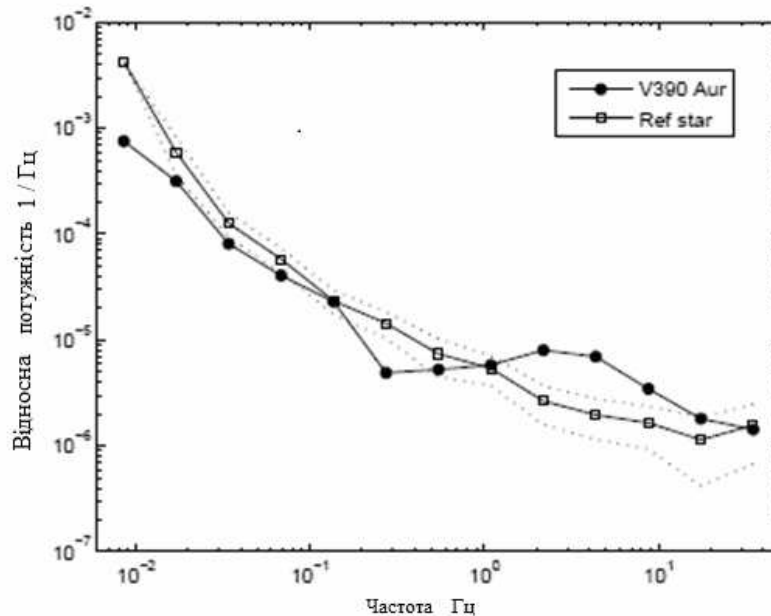


Рис. 7. Відносні спектри щільності потужності V390 Aur (кілеця) і опорної зорі (квадрати) з коридором похибок. Отримано 25/26 вересня 2009 р. у фільтрі U.

простежити властивості флікерінга аж до 5 Гц. Як буде показано нижче, флікерінг KR Aur падає практично до нуля в часовому масштабі коротшому 5 с.

Для дослідження частотного спектру коливань криві блиску KR Aur у фільтрі U піддавалися стандартному спектральному аналізу. Аналіз спектрів потужності показує, що всі істотні гармоніки (0.023, 0.029, 0.039, 0.059 Гц) демонструють властивості когерентних коливань. Гармоніка 0.039 Гц є дуже стабільною і наявна протягом двох днів, інші гармоніки присутні, принаймні, протягом двох серій спостережень тривалістю близько 2 годин. Вони демонструють час когерентності не менше 7000 і 150 циклів відповідно. Амплітуда імпульсного випромінювання в смузі U становить 0.006 зоряної величини.

Деякі орбіти поблизу внутрішнього краю диска можуть бути зруйновані, що призводить до формування випадкових імпульсів випромінювання на поверхні білого карлика. Максимальна частота коливань 0.059 Гц відповідає кеплерівській орбіті на відстані 1.12 радіуса білого карлика.

Підрозділ 4.6 присвячений швидкій фотометрії галактик і спостереженням короткочасних спалахів в ядрах галактик. Пошук оптичних спалахів у напрямку центра Галактики був виконаний на початку 1970-х рр. [54]. Найбільш багатообіцяючим джерелом гравітаційних хвиль, які, як очікується, будуть виявлені в таких експериментах, є коалесценція зір у подвійній системі в останні моменти їхнього існування [55, 56]. Найшвидші очікувані зміни на шкалі часу в десятки мілісекунд сумісні з моделлю компактних об'єктів, що зіштовхуються.

Зрозуміло, що швидкісна фотометрія галактик може дати прямі докази існування таких гіпотетичних процесів як коалесценція зір у парах і акреція речовини на компактні об'єкти. Слід зазначити, що швидкісна фотометрія

галактик в оптичному діапазоні синхронно на декількох телескопах була зроблена вперше.

Відмітимо також, що нещодавно були виявлені чотири швидкі радіосплески мілісекундної тривалості (Fast Radio Bursts, FRBs, ФРБ) у регіонах високих галактичних широт у рамках огляду High Time Resolution Universe (HTRU) [57]. Вони мають космологічні червоні зміщення від 0.5 до 1, а відстані – до 3 гігапарсек.

Нижче ми повідомляємо про фотометричний аналіз двох яскравих галактик – сейфертівської галактики NGC 1068 і NGC 7331 з часом накопичення 0.01 с. Спостереження проводилися в фільтрах UBVRI з 2-м телескопом на піку Терскол, кримськими 1.25-м і 50-дюймовим телескопами, оснащеними високошвидкісними фотометрами з підрахунком фотонів.

Виявлення швидкоплинних варіацій ґрунтується на пошуку збігів між даними двох віддалених телескопів, діючих синхронно. Ми дослідили криві блиску, використовуючи кумулятивний розподіл Пуассона, що описаний вище.

Рис. 1 показує, що техніка збігів може привести до істотного прогресу у виявленні маломасштабної змінності. Спалах у галактиці NGC 1068 на 293.6 секунді має окремо довірчу ймовірність 99.971338 і 99.983787%. Спільна довірча ймовірність для двох телескопів, що працюють синхронно, доходить до 99.999917%. Частота виникнення такої події дорівнює 0.0023 за час реєстрації 830 секунд при частоті вибірки 3.33 Гц. Це означає, що потрібно виконати в середньому 435 подібних тестів по 830 с кожен, тривалістю випробувань 4.2 дні в цілому, щоб отримати той самий результат через випадкові збіги. Таким чином, ми переконуємося, що спостережувані спалахи є реальним явищем. Коефіцієнт кореляції кривих блиску спалаху значущий на рівні довіри більше 99%. Кеплерівський орбітальний період для чорної діри маси M в околі горизонту подій становить $P \approx 10^{-5}(M/M_{\odot})$ с [61]. Таким чином, орбітальний рух в околі надмасивної чорної діри в центрі галактики може бути потужним джерелом гравітаційного випромінювання (і оптичного випромінювання також) у часовому діапазоні 10^{1+5} с. Для чорних дір проміжних мас цей час знаходиться в діапазоні $1 \div 100$ мс. Підводячи підсумок: наші спостереження підтверджують гіпотезу про існування чорних дір проміжних мас у центрах галактик і щільних кульових скупчень.

У підрозділі 4.7 досліджуються швидкі варіації блиску космічних гамма-спалахів. У підрозділі представлено результати досліджень, спрямованих на пошук коливань під час коротких гамма-сплесків. Вейвлет-метод, який використовується для цього аналізу, застосовується до даних каталогу BATSE 3B. Ми виявили у сплесках коливання, періоди яких лежать у діапазоні мілісекунд, а їх амплітуди досягають десятків відсотків. Можливий сценарій для такого явища – злиття чорних дір і нейтронних зір сонячної маси. У процесі коалесценції така система буде випромінювати гравітаційні хвилі, які викликають зменшення радіуса орбіти і призводять до випромінювання особливого частотно модульованого оптичного сигналу, званого «чірпом» (англ. chirp – щебетання,

гліссандо). Оцінки призводять до шкали часу в мілісекунди для процесу коалесценції і частоти коливань у сотні герц.

Для нашого аналізу ми використовували дані часових подій (the time-tagged event, TTE) з каталогу BATSE 3B [59], отримані на Комптонівській гамма-обсерваторії (Compton Gamma-Ray Observatory). Межі енергії каналів приблизно рівні 25–50 кеВ, 50–100 кеВ, 100–300 кеВ і більше 300 кеВ. Ми вибрали чотири коротких спалахи, а саме тригери 207, 432, 512, 2463. Як наголошується в [60], всі вони мають схожу тонку часову структуру та розподіл енергії. Автори дають наступні тривалості гамма-сплесків: 0.030 ± 0.002 , 0.050 ± 0.002 , 0.014 ± 0.001 і 0.049 ± 0.005 секунд відповідно.

Чисельні розрахунки часу припливного руйнування, виконані в роботі [61], дали значення, близьке до часу вільного падіння. Для нейтронної зорі сонячної маси це дає $T_{ff} \sim 0.1$ мс.

На рис. 8 показано криву блиску BATSE-тригера 432 в енергетичному каналі 50–100 кеВ і її вейвлет-спектр потужності. Рисунок показує наявність «чірпа», сигналу з періодом коливань, змінним у часі. Коливання виявляються на початку сплеску на частоті близько 300 Гц. Частота збільшується протягом наступних 30 мс, зростаючи до приблизно 1000 Гц. З цього моменту і далі спостерігається зменшення частоти. Це зниження частоти спостерігається протягом наступних 20 мс згасання сплеску аж до приблизно 400 Гц. Як було сказано вище, його зниження може бути пояснено уповільненням часу поблизу горизонту подій чорної діри.

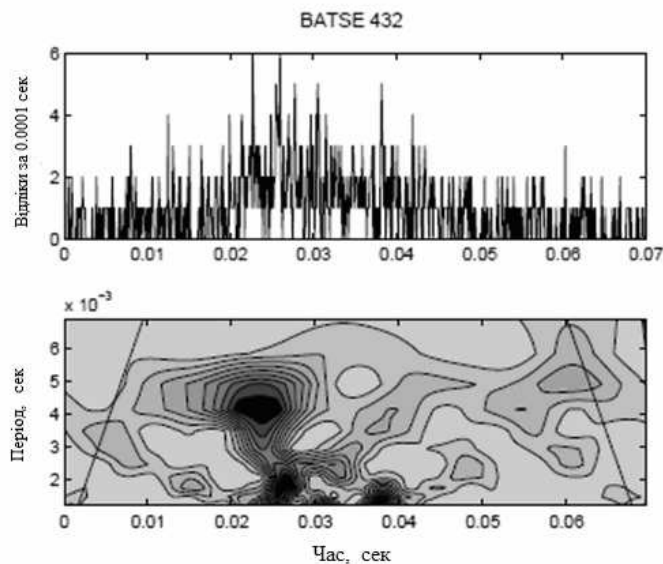


Рис. 8. Крива блиску BATSE-тригера 432 для енергетичного каналу 50–100 кеВ за TTE-даними, сегментованими до 100 мікросекунд (вгорі) і її вейвлет-спектр потужності (внизу). Контури відповідають рівням довіри 90 і 95% відповідно до χ^2 -розподілу.

У підрозділі 4.8 описано виявлення коливань оптичного післясвітіння космічного гамма-спалаху GRB 050922 С за спостереженнями на піку Терскол.

22 вересня 2005 р. космічний апарат Свіфт виявив гамма-спалах GRB 050922 С. Крива блиску показує інтенсивний пік шириною $T_{90} = (5 \pm 1)$ с. Оптичний телескоп Нордік отримав спектри післясвітіння з декількома лініями поглинання з червоним зміщенням $z = 2.17 \pm 0.03$. Спостереження оптичного післясвітіння GRB 050922 С були проведені в R-фільтрі з 60-см телескопом, обладнаним ПЗЗ-фотометром на піку Терскол (Північний Кавказ). Величина оптичного післясвітіння змінювалася від $R \approx 16$ до $R \approx 17.5$. У цьому розділі повідомляється про виявлення коливань блиску в післясвітінні спалаху. Аналіз даних виявив гармоніку з періодом 0.0050 ± 0.0003 днів (7.2 хв.) протягом часу спостережень близько 0.05 днів (~ 70 хв.). Амплітуда коливань складає близько 0.05 зоряних величин. Очікується, що спалах GRB 050922 С може бути пов'язаний з приливним руйнуванням білого карлика чорною дірою з масою близько тисячі сонячних мас. Періодичність у кривій блиску може бути пов'язана з релятивістською прецесією диска акреції.

Розділ 5. Прикладні питання швидкої фотометрії зір. У даному розділі наводиться опис основного матеріального елементу Синхронної Мережі Телескопів – швидкісного двоканального фотометра ОСТАП–Б (Однофотонний Статистичний Аналізатор Змінності Блиску), створеного під керівництвом і за участю дисертанта.

Важливим компонентом всіх досліджень із швидкої маломасштабної змінності зір є питання точності наземної фотометрії. Ця тема становить великий самостійний інтерес. Їй присвячено другу частину розділу.

Синхронна Мережа Телескопів надає ексклюзивні можливості з дослідження надвисокочастотної змінності небесних тіл. Обмеженням за частотою є тільки фазова стабільність генератора, що задає частоту сигналу часу вибірки фотометра. Сучасні GPS-технології забезпечують фазову стабільність на рівні близько 150 нс. Таким чином, швидкісна фотометрія аж до межі частот 1 МГц видається цілком реальною справою. Потенційні можливості НВЧ-фотометрії обговорюються у третій частині розділу.

У підрозділі 5.1 наведено опис оптико-механічного блоку і системи реєстрації даних швидкісного двоканального фотометра. Фотометр розроблено, виготовлено і випробувано в Головній астрономічній обсерваторії АН УРСР у 1980–1986 рр. У 1987 р. його встановлено на 60-см телескопі фірми «Карл Цейс» на високогірній обсерваторії на піку Терскол.

Фотометр дозволяє здійснювати ряд спеціальних режимів спостережень.

1) Режим однофотонної реєстрації. Прихід кожного кванта викликає запис показників лічильника часу в буфер і переривання ЕОМ. Програма керування реєструє інтервали між відліками з точністю $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ с. Система часу дозволяє здійснювати прив'язку кожної події до шкали UTC з точністю до 100 мкс.
2) Режим зменшення мультиплікативних перешкод. 3) Режим синхронної фотометрії. Натурні випробування фотометра проводилися на телескопі АЗТ-2 в Києві та на телескопі Цейс-600 високогірної спостережної бази на піку Терскол. Ефективність підрахунку квантів у смузі V системи «атмосфера ($z = 0$) – телескоп – фотометр» в обох каналах становить близько 2%.

У підрозділі 5.2 розглядаються питання точності наземної фотометрії. Як зазначено в роботі [62], відношення сигнал/шум S/N у зоряній фотометрії збільшується тільки до певної міри зі збільшенням часу інтегрування τ . Подальше інтегрування з $\tau > 40$ с може зменшувати значення S/N . S/N рідко буває вище, ніж 200 (точність краще, ніж 0.005 зоряної величини). Середня зовнішня похибка диференційної фотометрії зір 0.0017 зоряної величини, досягнута в роботі [63] в кінці 1980-х років на роботизованих телескопах, здається, досі залишається верхньою межею точності наземної фотометрії.

Аналогічним чином, інструментальна точність визначення координат з наземними телескопами, оснащеними ПЗЗ-камерами, як правило, не перевищує 0.1–0.2 секунди дуги [64]. У роботі [65] дано вичерпний перелік факторів, що обмежують точність диференційної фотометрії зір. Автори роботи пропонують впровадження 15 рекомендацій для досягнення точності наземної фотометрії на рівні 0.001 зоряної величини або краще.

Практично проблема полягає в тому, як ми можемо експериментально оцінити і поліпшити точність фотометрії. Техніка «точкових спектрів», представлена в цьому розділі, містить корисний набір інструментів для підвищення точності диференційної фотометрії зір на практиці. Техніка «точкових спектрів» дозволяє: 1) знайти оптимальне значення часу інтегрування, 2) досягти максимуму відношення сигнал/шум. Таким чином, ми в змозі визначити яскравість програмної зорі щодо зорі порівняння з найкращою можливою точністю.

У підрозділі 5.2.4 описано вимірювання фотометричних похибок. На рис. 9 показано типові значення похибок, отриманих з 2-м телескопом на піку Терскол. Верхня крива (квадрати) показує внутрішні інструментальні похибки для двох яскравих зір, що мають подібні U -величини (OP And у спокої і її опорної зорі). Нижня крива похибок подає дані моделювання. Вони взяті з вибірки з гауссівським розподілом з тим же середнім і коваріаційною функцією, як і реальні дані.

Нескладно бачити, що похибка зменшується пропорційно степеню $\frac{1}{2}$ від часу інтегрування сигналу. Гладка нижня крива відповідає точному рішенню для строго стаціонарних випадкових шумів з розподілом Пуассона. Цей експеримент показує, що фотометричні похибки не зменшуються з часом і через час накопичення близько 60 с коливаються близько 0.002 зоряної величини.

У підрозділі 5.3 розглядаються питання детектування НВЧ-змінності. Здавалося б, дефіцит квантів ставить нездоланні перешкоди на шляху швидкої фотометрії. Для розрідженого потоку квантів стає невизначеним саме поняття кривої блиску. Це створює помилкове враження майже нерозв'язної задачі, коли ми маємо справу з процесами, які швидко змінюються. Тим не менш, ця задача, нерозв'язна у часовому поданні, може бути точно вирішена в частотному представленні Фур'є.

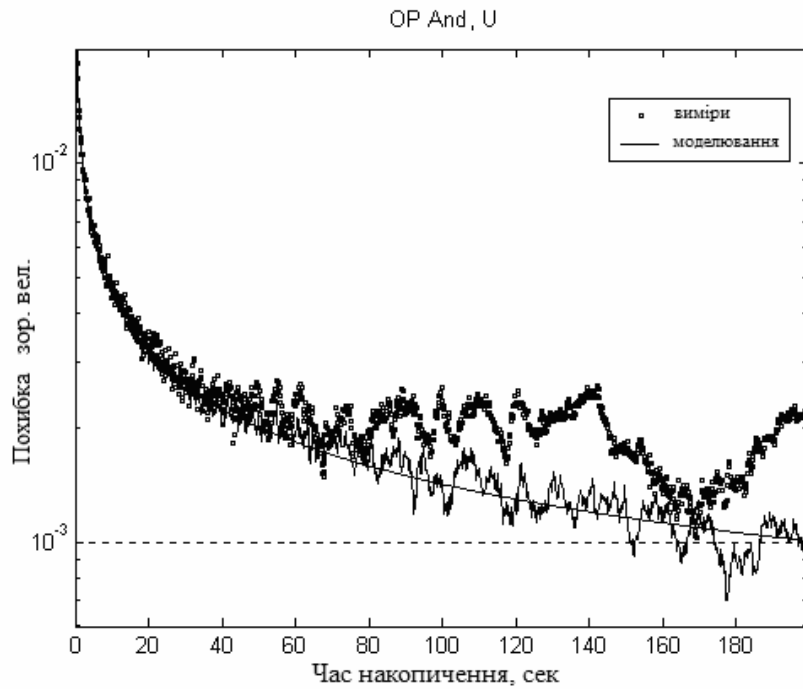


Рис. 9. OP And (квадрати) і її опорна зоря (кільця). Модельні дані (суцільна крива). 2-м телескоп обсерваторії на піку Терскол.

Для демонстрації можливостей надвисокочастотної фотометрії з Синхронною Мережею Телескопів ми проводимо наступний чисельний експеримент. Ряд вимірів є пуассонівським потоком квантів з середньою інтенсивністю, рівною одній сотій за час вибірки фотометра. Це означає, що в середньому на сто вимірювань припадає один квант і дев'яносто дев'ять нулів. Корисний сигнал є нестационарним пуассонівським процесом з інтенсивністю, що описується синусоїдальною хвилею. Квантова ефективність лічильників прийнята рівною 10%. Умови моделювання такі, що на сто тисяч вимірювань припадає близько тисячі фотонів. Два телескопа Мережі приймають потоки квантів з однаковим сигналом, але незалежними шумами. Абсолютно ясно, що в цих умовах неможливо побудувати криву блиску.

На рис. 10 показано крос-кореляційні функції і крос-спектр для двох рядів згенерованих шумів, а також суми шуму і синусоїдальної хвилі з амплітудою, рівною стандартному відхиленню шуму. Середня панель показує крос-кореляційну функцію, розраховану для шумових рядів у відсутності сигналу. 95%-довірчі межі для шумових піків показано у вигляді горизонтальних ліній. Нижня панель показує крос-спектр, отриманий як перетворення Фур'є крос-кореляційної функції двох телескопів. Чітко видно пік на частоті сигналу, використовуюваного в згенерованих комп'ютером рядах вимірювань. Таким чином, фотометрія розріджених потоків квантів, неможлива у часовому поданні, у відсутності кривих блиску, пов'язаних або зі слабкістю спостережуваного об'єкта,

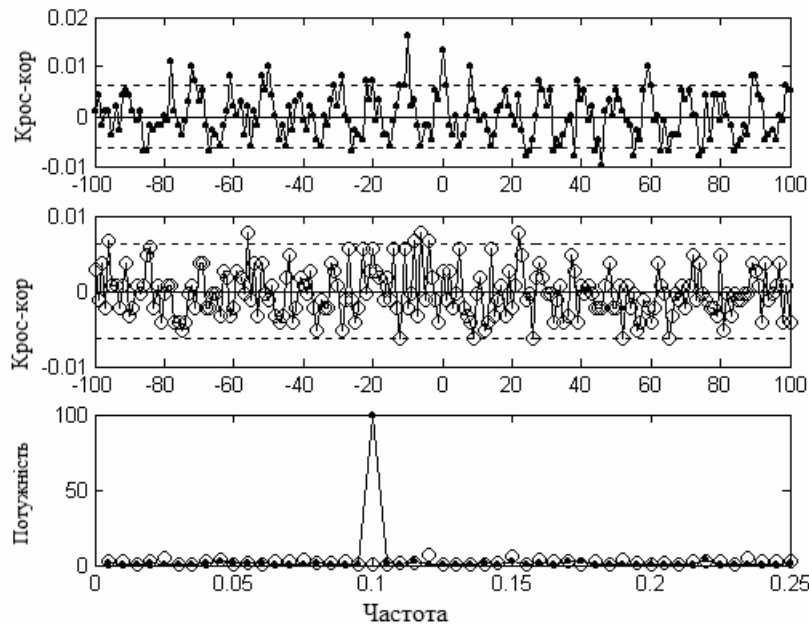


Рис. 10. Взаємні кореляційні функції незалежних шумів (середня панель), шуму і синусоїдального сигналу (верхня панель) і взаємного спектру потужності на частоті гармонічного сигналу (нижня панель).

або з пошуком НВЧ-змінності, може з успіхом проводитися в частотному представленні Фур'є. Сучасні GPS-технології забезпечують фазову стабільність на рівні близько 150 нс. Таким чином, швидкісна фотометрія аж до межі частот 1 МГц видається цілком реальною.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено підсумки досліджень, що проводилися з 1980-х років до нинішнього часу. Розглянуто широке коло проблем, пов'язаних з вивченням властивостей швидкої маломасштабної змінності небесних тіл. Внаслідок малого відношення сигнал/шум значну увагу приділено розробці статистичних методів виявлення і оцінювання сигналів на тлі перешкод. Робота базується в основному на аналізі даних фотометрії, отриманих з Синхронною Мережею віддалених Телескопів, розташованих на території України, Росії, Болгарії та Греції. Дослідження включає також інтерпретацію спостережень швидкої маломасштабної змінності ряду зір, що спалахують, хромосферноактивних, катаклізмичних змінних зір, а також короточасних спалахів у ядрах галактик і космічних гамма-сплесків. Нижче ми наведемо основні завдання та отримані результати.

Розробка і реалізація методів виявлення мікрозмінності і оцінювання її характеристик. Статистичні методи, що базуються на статистиці квантів, дозволяють вивчати амплітудно-частотні властивості змінних сигналів, коли

рівень сигналу співрозмірний, а іноді і нижчий, ніж у шумів вимірювань. У дисертації запропоновано ряд нових ефективних методів розрахунку, що спираються на статистику квантів. Розроблено методи, що базуються на техніці цифрової фільтрації, оцінювання параметрів гармонік і стандартних похибок їхніх характеристик на основі функції правдоподібності, виявлення стохастичної змінності зір на основі інтегральних перетворень кривих блиску; відновлення сигналів на заданому рівні довірчої ймовірності методами фур'є-аналізу і лінійного безперервного вейвлет-перетворення; аналізу часових рядів даних, що містять пропуски, або отриманих у випадкові моменти часу на базі критерію Хотеллінга і методу Барнінга.

Розроблена нами методика, яка базується на результатах чисельного моделювання, дає кількісні оцінки квантилів при спектральному аналізі як регулярних часових рядів, так і рядів, отриманих у довільні моменти часу. Це дозволяє виявити всі значимі гармоніки в реалізації часового ряду. Використання цього методу (модифікований метод Барнінга) дозволило визначити період обертання астероїда 2013 ET з точністю близько 3% за спостереженнями на нерегулярній часовій сітці.

Створення Синхронної Мережі віддалених Телескопів для швидкої фотометрії зір. Під керівництвом та за участю дисертанта був створений унікальний інструмент для астрономічних спостережень, що не має аналогів у світі. Були створені уніфіковані апаратні і програмні засоби для оснащення телескопів Мережі. СМТ об'єднує телескопи чотирьох обсерваторій в Україні, Росії, Болгарії та Греції (телескопи АЗТ-11 і 50-дюймів в КрАО, 2-м телескопи на піку Терскол і в обсерваторії Рожен, 30-дюймовий телескоп обсерваторії Стефаніон і 60-см телескопи на Терсколі і в обсерваторії Белоградчик). GPS-приймачі для синхронізації локальних систем часу фотометрів відносно UTC забезпечують прив'язку моментів реєстрованих подій з похибкою не гірше 1 мкс. Розроблено нові алгоритми, які базуються на пошуку збігів у багатоканальних датчиках, які забезпечують ефективний спосіб заглушення шумів. Застосовується статистичний критерій Фішера з метою обчислення спільної ймовірності для співпадаючих подій і асоційованої з ними кумулятивної кривої ймовірностей. Все це дозволило отримувати інформацію безпрецедентної якості для вивчення швидкої маломасштабної змінності.

Швидка спектروفотометрія зір, що спалахують. Застосування нових технологій спостережень і нових методологій обробки даних – високошвидкісного моніторингу, синхронних спостережень на декількох телескопах, цифрової фільтрації даних – дали нові оригінальні результати. Ми підтвердили наявність високочастотних коливань у зоряних спалахах, спочатку виявлених Родано в 1972 р., виявили швидкі зміни кольору випромінювання спалахів, підтвердили, що амплітуди швидких ВЧК набагато перевищують діапазон інструментальних похибок. Ми показали, що колірні індекси коливаються на часовій шкалі кілька секунд, що спалах коливається протягом більшої частини свого життя між станами водневої плазми прозорої і непрозорої в бальмерівському континуумі.

Колориметрія і спектрофотометрія зір за даними спостережень з безщелевим спектрографом. Спостереження проводилися з грізм-спектрографом на телескопі Цейс-600 на піку Терскол з часовою роздільною здатністю в субсекундному діапазоні і спектральною роздільною здатністю $R \sim 100$. Із записів спектрів були отримані оцінки UBV R зоряних величин шляхом математичної згортки спектрів з кривими пропускання фільтрів фотометричної системи Джонсона–Казинса. Внутрішні похибки даних для зір до 13-ї величини при експозиції 10 секунд дозволяють виявляти спалахи з амплітудою в смузі U більше приблизно 0.3 зоряної величини.

Спектральні спостереження з високою роздільною здатністю показали, що зоря EV Lac, що спалахує, демонструє варіації в емісійних лініях у спокійному стані блиску. Спектр потужності демонструє варіації в емісійних лініях водню і Ca II H, K, бальмерівському континуумі і, можливо, в емісії гелію He I $\lambda\lambda$ 402.6 і 447.1 нм в субсекундному діапазоні. Це підтверджує гіпотезу, висунуту в роботі [66], що у червоних карликів, що спалахують, «перманентно існують мікроспалахи».

Високочастотна змінність хромосферноактивних зір. Спостереження хромосферноактивного гіганта пізнього спектрального класу V390 Aur зі швидким обертанням, виконані з Синхронною Мережею Телескопів, показали існування швидкої маломасштабної фотометричної змінності у вигляді спалахів тривалістю від декількох секунд до хвилини і амплітудою до 0.025 зоряної величини. Для перевірки гіпотези про існування мікроспалахової активності були проведені кампанії швидкісної UBVRI-фотометрії V390 Aur у 2002–2009 роках на піку Терскол, у Кримській і Белоградчицькій обсерваторіях з частотою реєстрації відліків до 100 Гц. За підсумками розрахунків, що спираються на статистику фотонів, зокрема на факторіальні моменти другого порядку, була виявлена змінність з максимумом на частоті близько 1 Гц, яка поступово слабшає в діапазоні 0.1–10 Гц, із амплітудою близько 0.005 зоряної величини в смугах UVV. Було запропоновано зв'язати спостережувані закономірності варіацій блиску з ансамблем мікроспалахів. Згідно запропонованій моделі, типовий мікроспалах має максимальну амплітуду 0.005 зоряної величини, частота спалахів складає близько шести на хвилину, і тривалість активної фази – близько 4 секунд.

Швидка фотометрія галактик. Спостереження короткочасних спалахів. Вперше пошук оптичних спалахів у напрямку центра Галактики, Малої Магелланової Хмари і кульового скупчення 47 Tuc був виконаний на початку 1970-х рр. [67]. Цей експеримент був першою спробою знайти потік електромагнітних і гравітаційних хвиль, які супроводжують такі гіпотетичні процеси як коалесценція зір у парах і акреція речовини на компактні об'єкти. Для спостережень був використаний високошвидкісний фотометр на 2-м телескопі на піку Терскол, фотополяриметр на 1.25-м телескопі АЗТ-11 і високошвидкісний двоканальний фотометр на 50-дюймовому телескопі Кримської обсерваторії. Моніторинг ядер галактик виконувався синхронно з точністю синхронізації 1 мілісекунда з частотою вибірки 100 Гц. Об'єкти: NGC 7331, сейфертівська

галактика NGC 1068. У процесі синхронного моніторингу були виявлені одночасні короткі спалахи блиску на двох інструментах. Криві блиску NGC 7331, які отримані синхронно з інтервалом у 10 мс на двох телескопах, віддалених на відстань близько тисячі кілометрів один від одного, виявляють спалах амплітудою 0.4 зоряної величини, який збігається з точністю до 10 мс. Спільна довірча ймовірність сплеску дорівнює 99.999880%. Спалах у галактиці NGC 1068 тривалістю близько 1 с має спільну довірчу ймовірність для двох телескопів 99.999917%. Злиття чорних дір (ЧД) проміжної маси з ЧД малих мас або з нормальними зорями в ядрах галактик і кульових скупчень очікується як найбільш вірогідний механізм для коротких спалахів у галактиках. Таким чином, наші спостереження підтверджують гіпотезу про існування чорних дір проміжних мас у центрах галактик і щільних кульових скупчень. Нещодавно було виявлено чотири швидкі радіосплески мілісекундної тривалості в рамках огляду High Time Resolution Universe [57], які мають космологічні червоні зміщення від 0.5 до 1. Спостереження радіосплесків мілісекундної тривалості підтверджує наші висновки щодо реальності спалахів оптичного випромінювання в галактиках.

Швидкі варіації блиску космічних гамма-спалахів. Представлено результати досліджень, направлених на пошук коливань під час коротких гамма-сплесків. Виявлено у сплесках коливання, періоди яких лежать у діапазоні мілісекунд, а їх амплітуди досягають десятків відсотків. Можливий сценарій для такого явища – злиття чорних дір і нейтронних зір сонячної маси. Проаналізовано чотири події: BATSE-тригери номер 207, 432, 512, 2463. Тривалості гамма-сплесків: 0.030 ± 0.002 , 0.050 ± 0.002 , 0.014 ± 0.001 і 0.049 ± 0.005 секунд відповідно. Вейвлет-спектр тригера 432 в енергетичному каналі 50–100 кеВ показує наявність «чірпа». Коливання виявляються на початку сплеску на частоті близько 300 Гц. Частота збільшується протягом наступних 30 мс, зростаючи до приблизно 1000 Гц. З цього моменту і далі спостерігається зменшення частоти. Це зниження частоти спостерігається протягом наступних 20 мс загасання сплеску аж до приблизно 400 Гц. Ми аргументуємо, що високочастотні коливання з періодами в діапазоні мілісекунд і амплітудами кілька десятків відсотків світності сплеску можуть бути пов'язані з акрецією «сміття», що утворилося після руйнування нейтронної зорі чорною дірою в подвійній системі. При такому сценарії можна було б очікувати кілька циклів випромінювання з орбітальною частотою, що спочатку збільшується, а потім зменшується. Цей феномен «чірпа» дійсно спостерігається в гамма-спалахах, розглянутих вище.

Прикладні питання швидкої фотометрії зір. Під керівництвом та за участю дисертанта розроблений і створений швидкісний двоканальний UBVR-фотометр ОСТАП-Б. Два екземпляри фотометра встановлено на телескопах Синхронної Мережі Телескопів.

Проведено цикли спостережень для визначення точності наземної фотометрії. За результатами спостережень з двоканальним фотометром на телескопах АЗТ-11 ГАО НАН України, 50-дюймовому телескопі Кримської астрофізичної обсерваторії, 60-см і 2-м телескопах на піку Терскол показано, що

фотометричні похибки досягають мінімуму за час накопичення близько 60 секунд і далі коливаються приблизно на рівні 0.002 зоряної величини.

Детектування НВЧ-змінності. Виконано чисельне моделювання з метою визначення обмежень для проведення надвисокочастотної фотометрії. Показано, що фотометрія розріджених потоків квантів у відсутності кривих блиску, пов'язаних або зі слабкістю спостережуваного об'єкта, або з пошуком НВЧ-змінності, неможлива в часовому поданні, може з успіхом проводитися в частотному представленні Фур'є.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ

У реферованих наукових журналах:

1. Totochava A. G. Discovery of microvariability in normal stars. Analysis of six main sequence stars / Totochava A. G., Zhiljaev V. E. // *Astron. Nachr.* – 1981. – V. 302. – N. 5. – P. 219–222.
2. Жилиев Б.Е. Вспышки в эмиссионной линии звезды Вольфа–Райе HD 191765 / Жилиев Б.Е., Романюк Я.О., Святогоров О.А. // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1991. – Т. 7. – No 4. – С. 48–50.
3. Жилиев Б.Е. Быстрые вспышки звезд. Методы обнаружения и оценивания параметров / Жилиев Б.Е. // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1991. – Т. 7. – No 5. – С. 61–67.
4. Жилиев Б.Е. Скоростной автоматический двухканальный фотометр / Жилиев Б.Е., Романюк Я.О., Святогоров О.А. // *Астрономич. Журнал.* – 1992. – Т. 69., вып. 4. – С. 895–900.
5. Жилиев Б.Е. Спектральный анализ нерегулярных временных рядов / Б.Е. Жилиев // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1993. – Т. 9. – No 6. – С. 82–90.
6. Жилиев Б.Е. Обнаружение и оценивание гармонических и квазигармонических сигналов при фотометрии звезд / Б.Е. Жилиев // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1993. – Т. 9. – No 5. – С. 89–96.
7. Жилиев Б.Е. Наблюдения быстрых вспышек EV Lacertae / Б.Е. Жилиев // *Кинемат. и физ. небесн. тел.* – 1994. – Т. 10. No 1. – С. 32–35.
8. Жилиев Б.Е. Наблюдения быстрых колебаний атмосферной прозрачности / Б.Е. Жилиев // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1994. – Т. 10. – No 1. – С. 77–79.
9. Жилиев Б.Е. Точная фотометрия звезд. Техника предварительной фильтрации / Жилиев Б.Е., Романюк Я.О., Святогоров О.А. // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1994. – Т. 10. – No 6. – С. 88–94.
10. Жилиев Б.Е. Наблюдения быстрых колебаний прозрачности при фотометрии звезд. Атмосферный инфразвук / Б.Е. Жилиев, И.А. Верлюк, Я.О. Романюк, О.А. Святогоров, В.Р. Халак // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1996. – Т. 12. – No 6. – С. 86–93.

11. Жилиев Б.Е. Скоростная фотометрия звезды Вольфа–Райе HD 191765 (WN6) / Б.Е. Жилиев, В.Р. Халак // Кинематика и физика небес. тел. – 1996. – Т. 12. – No 2. – С. 14–19.
12. Zhilyaev B. E. New features in the EV Lacertae flares discovered by fast high precision UBVRI photometry / Zhilyaev B. E., Verlyuk I. A., Romanyuk Ya. O., Svyatogorov O. A., Konstantinova-Antova R. K., Antov A. P., Bachev R. S., Alekseev I. Yu., Chalenko V. E., Shakhovskoy D. N. // *Astron. Astrophys.* – 1998. – V. 334. – P. 931–934.
13. Zhilyaev B. E. Detection of high-frequency optical oscillations on the flare star EV Lacertae / Zhilyaev B. E., Romanyuk Ya. O., Verlyuk I. A., Svyatogorov O. A., Khalack V. R., Sergeev A. V., Konstantinova-Antova R. K., Antov A. P., Bachev R. S., Alekseev I. Yu., Chalenko V. E., Shakhovskoy D. N., Contadakis M. E., Avgoloupis S. J. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 364. – P. 641–645.
14. Alekseev I. Yu. Coordinated observations of the red dwarf flare star EV Lac in 1998 / I. Yu. Alekseev, A. P. Antov, S. J. Avgoloupis, G. M. Beskin, N. V. Borisov, V. E. Chalenko, M. E. Contadakis, R. E. Gershberg, V. R. Khalack, R. K. Konstantinova-Antova, V. M. Larionov, I. P. Panferova, V. L. Plokhotnichenko, L. A. Pustil'nik, Ya. O. Romanyuk, J. – H. Seiradakis, S. G. Sergeev, O. A. Svyatogorov, I. A. Verlyuk, B. E. Zhilyaev // *Кинематика и физика небес. тел.* – 2001. – Т. 17. – No 2. – С. 147–156.
15. Zhilyaev B. E. Principles and Applications of the Synchronous Network of distant Telescopes / Zhilyaev B. E., Romanyuk Ya. O., Svyatogorov O. A., Verlyuk I. A. // *Baltic Astronomy.* – 2003. – V. 12. – P. 561–567.
16. Konstantinova-Antova R. K. The Flare Activity of V390 AUR: First Results of an International Collaboration / R. K. Konstantinova–Antova, A. P. Antov, B. E. Zhilyaev, I. A. Verlyuk, Ya. O. Romaniuk, O. A. Svyatogorov, S. Avgoloupis, J. H. Seiradakis, M. E. Contadakis // *Astron. Nachr.* – 2005. – V. 326. – N. 1. – P. 38–42.
17. Ловкая М.Н. Колориметрия двух вспышек EV Лас по UBVRI наблюдениям в 2004 г. / М.Н.Ловкая, Б.Е.Жилиев // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* – 2007. – Т. 103.– С. 158–168.
18. Zhilyaev B. E. Fast colorimetry of the flare star EV Lacertae from UBVRI observations in 2004/ B. E. Zhilyaev, Ya. O. Romanyuk, O. A. Svyatogorov, I. A. Verlyuk, B. Kaminsky, M. Andreev, A. V. Sergeev, R. E. Gershberg, M. N. Lovkaya, S. J. Avgoloupis, J. H. Seiradakis, M. E. Contadakis, A. P. Antov, R. K. Konstantinova-Antova, and R. Bogdanovski // *Astronomy and Astrophysics.* – 2007. – V. 465.– N. 1. – P. 235–240.
19. Zhilyaev B. E. Short Gamma-Ray Bursts as Manifestation of Collisions of Primordial Black Holes with Stars / B. E. Zhilyaev // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* – 2007. – Т. 103.– С. 58–64.
20. Zhilyaev B. E. The Synchronous Network of small Robotic Telescopes (Ukrainian RoboNet. Avant-project) / B. E. Zhilyaev, O. A. Svyatogorov, V. K. Tarady, A. V. Sergeev, and N. V. Karpov // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* – 2007. – Т. 103.– С. 169–174.

21. Zhilyaev B.E. On the detection of high-frequency oscillations in short gamma-ray bursts / B.E. Zhilyaev and D. Dubinovska // *Astron. Nachr.* – 2009. – V. 330. – N. 4. – P. 1–7.
22. Tsap Yu. T. Diagnostics of a Flare on EQ Peg B from Optical Pulsations / Yu. T. Tsap, A. V. Stepanov, Yu.G. Kopylov, and B. E. Zhilyaev // *Astronomy Letters.* – 2010. – V. 36. – N. 12. – P. 49–54.
23. Жилиев Б.Е. Пульсации оптического излучения вспышки YZ CMi 9 февраля 2008 г. / Б.Е. Жилиев, Ю.Т. Цап, М.В. Андреев, А.В. Степанов, Ю.Г. Копылова, Р.Е. Гершберг, М.Н. Ловкая, А.В. Сергеев, И.А. Верлюк, К.О. Стеценко // *Кинематика и физика небесн. тел.* – 2011. – Т. 27. – No 3. – С. 75–84.
24. Zhilyaev B. The Synchronous Network of distant Telescopes / B. Zhilyaev, O. Svyatogorov, I. Verlyuk, M. Andreev, A. Sergeev, M. Lovkaya, S. Antov, R. Konstantinova-Antova, R. Bogdanovski, S. Avgoloupis, J. Seiradakis, and M.E. Contadakis // *Bulgarian Astronomical Journal.* – 2012. – V. 18. – N 1. – P. 62–70.
25. Zhilyaev B. E. Fast Spectrophotometry of the Flare Star EV Lacertae / B. E. Zhilyaev, M. V. Andreev, A. V. Sergeev, V.N.Reshetnik, and N. A. Parakhin // *Astronomy Letters* – 2012. –V. 38. – N 12. – P. 793–800.
26. Жилиев Б.Е. Бесщелевой спектрограф для малых телескопов: первые результаты / Жилиев Б.Е., Сергеев А.В., Андреев М.В., Годунова В.Г., Решетник В.Н., Тарадий В.К. // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2013. – Т. 29. – No 3. – С. 64–79.
27. Жилиев Б.Е. Некоторые итоги международных кампаний наблюдений вспыхивающих звезд в 90-е и 2000-е годы с участием 50-дюймового телескопа КрАО / Б.Е. Жилиев, И.А. Верлюк, О.А. Святогоров // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* – 2013. – Т. 109. – С. 158–164.
28. Жилиев Б.Е. Перспективы спектрофотометрии звезд на 50-дюймовом телескопе КрАО / Б.Е. Жилиев, О.А. Святогоров, В.Н. Решетник // *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* – 2013. – Т. 109. – С. 189–195.
29. Konstantinova-Antova R. Magnetic activity in stars on the giant branches: Twenty years of observations / R. Konstantinova-Antova, M. Auriere, C. Charbonnel, G. Wade, D. Kolev, A. Antov, S. Tsvetkova, K.-P. Shroder, N.A. Drake, P.Petit, J.-R. de Medeiros, A. Lebre, B. Zhilyaev, I. Verlyuk, O. Svyatogorov, R. E. Gershberg, M. Lovkaya, R. Bogdanovski, I. Stateva, R. Cabana, S. Avgoloupis, J. Seiradakis and M.E. Contadakis // *Bulgarian Astronomical Journal.* – 2013. – V. 19. – P. 14–28.
30. Zhilyaev B.E. Observations of high-frequency variability in the chromospherically active star V390 Aurigae / Zhilyaev B.E., Verlyuk I. A., Andreev M.V., Sergeev A.V., Lovkaya M.N., Tsap Yu.T., Konstantinova-Antova R.K., Antov A.P., Bogdanovski R., Spassov B., Svyatogorov O.A., Stetsenko K.O., Bondar A.V., Taradii V.K. // *MNRAS.* – 2013. – V. 436. – No 3. – P. 1986–1992.

У працях конференцый:

31. Zhilyaev B. E. Observations of High-Frequency Activity of EV Lacertae / Zhilyaev B. E., Verlyuk I. A. // Proceedings of IAU Colloq. No. 151: Flares and Flashes, 5–9 December 1994, Sonneberg, Germany. Eds. J.Greiner, H.W. Duerbeck and R.E. Gershberg, 1994, P. 82–84.
32. Zhilyaev B. E. Short-Time Flare Events of EV Lac / Zhilyaev B. E., Verlyuk, I. A. // Proceedings of IAU Colloq. No. 151: Flares and Flashes, 5–9 December 1994, Sonneberg, Germany. Eds. J.Greiner, H.W. Duerbeck and R.E. Gershberg, 1994, P. 80–81.
33. Zhilyaev B. E. A New Technique for Precise Stellar Photometry: Application to Small-Scale Activity of EV Lacertae / Zhilyaev B. E. // Proceedings of IAU Colloq. No. 151: Flares and Flashes, 5–9 December 1994, Sonneberg, Germany. Eds. J.Greiner, H.W. Duerbeck and R.E. Gershberg, 1994, P. 133–134.
34. Zhilyaev B. E. Some results of high-speed two-channel photometry of Wolf-Rayet stars with suspected compact companions / Zhilyaev B. E., Khalack V. R., Verlyuk I. A. // Proceedings of the IAU Symposium No. 163: Wolf–Rayet Stars: Binaries, Colliding Winds, May 2–6, 1994, Biodola, Elba, Italia. Eds. K.A. van der Hucht, P.M. Williams, 1995. – P. 550–553.
35. Романюк Я.О. Разработка и внедрение системы точного времени для синхронной сети телескопов / Романюк Я.О., Святогоров О.А., Жилияев Б.Е., Халак В.Р., Сергеев А.В. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement. –2003. – No 4. – P. 87–90.
36. Verlyuk I. The cataclysmic binary KR Auriga in February 2002: Flickering and oscillations / I.Verlyuk, B.Zhilyaev // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement. – 2003. – N 4. – P. 173–176.
37. Zhilyaev B. E. A Short-Lived Flare on EV Lacertae / Zhilyaev B. E., Romanjuk Y. O., Svyatogorov O. A. // Proceedings of IAU Symposium No. 137: Flare Stars in Clusters, Associations and Solar Viicinity Ed. L.V. Mirzoyan, October 23–27, 1990, Byurakan, Armenia, USSR. 1990. – P. 35–36.
38. Zhilyaev B. E. High-frequency optical oscillations on the flare star EV Lac / Zhilyaev B. E., Romanyuk Ya. O., Verlyuk I. A., Svyatogorov O. A., Khalack V. R., Sergeev A. V., Konstantinova-Antova R. K., Antov A. P., Bachev R. S., Alekseev I. Yu., Chalenko V. E., Shakhovskoy D. N., Contadakis M. E., Avgoloupis S. J. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement. – 2000. – N 3. – P. 339–340.
39. Zhilyaev B. Fast UBVRI colorimetry of stellar flares on EV Lacertae / B.Zhilyaev, Ya. Romanyuk, O.Svyatogorov, I. Verlyuk, I. Alekseev, M. Lovkaya, S. Avgoloupis, M. Contadakis, J. Seiradakis, A. Antov, and R.Konstantinova-Antova // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement. – 2003. – N 4. – P. 30–35.
40. Zhilyaev B. Observations of Stellar Image Motions with the Synchronous Network of Telescopes / B. Zhilyaev, Ya. Romanyuk, O. Svyatogorov,

- I. Verlyuk, V. Tarady, A. Sergeev, N. Karpov, M. Lovkaya // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement.* – 2003. – N 4. – P. 177–181.
41. Zhilyaev B. Intensity Interferometer Experiment with the Synchronous Network of Telescopes / B. Zhilyaev // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement.* – 2003. – N 4. – P. 65–70.
42. Zhilyaev B. What limits the precision of ground-based stellar photometry and positional measurements? / Zhilyaev B., E., Romanyuk Ya., Verlyuk I.A., Svyatogorov O., Lovkaya M. N. // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Supplement.* – 2005. – N 5. – P. 528–533.
43. Жилияев Б.Е. Спектрометр низкого разрешения для быстрой спектрометрии и фотометрии звезд / Б.Е.Жилияев, К.О. Стеценко, А.В. Сергеев, М.В. Андреев, Ю.С. Иванов, О.А. Святогоров // *Kinematics and physics of celestial bodies. Supplement.* – 2009. – N 6. – P. 422–425.
44. Zhilyaev B.E. A slitless spectrograph for observing transient events with small telescopes / B.E. Zhilyaev, O.V. Sergeev, M.V. Andreev, V.G. Godunova, V.M. Reshetnyk, V.K. Tarady // *Proc. of SPIE* – 2012.– V. 8446. – Published by SPIE. – P. – 844681–1–10.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

45. Kaiser J.F. Data smoothing using low-pass digital filters / Kaiser J.F. and Reed W.A. // *Rev. Sci. Instrum.* – 1977. – V. 48. – No. 11.– P. 1447–1457.
46. Жилияев Б.Е. Вспышки в эмиссионной линии звезды Вольфа–Райе HD 191765 / Жилияев Б.Е., Романюк Я.О., Святогоров О.А. // *Кинематика и физика небесных тел.* – 1991. – Т. 7. – No 4. – С. 48–50.
47. Torrence C. A Practical Guide to Wavelet Analysis / Torrence C., Compo G. P. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1998. – V. 79. – pp. 61–78.
48. Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике / Теребиж В.Ю. – М.: Наука, Мир, 1971. – 316 с.
49. Cheng K. S. The formation and merger of compact objects in the central engine of active galactic nuclei and quasars: gamma-ray burst and gravitational radiation / K. S. Cheng and Jian-Min Wang // *Ap.J.* – 1999. – V. 521. – P. 502–508.
50. Deeming T. J. Fourier analysis with unequally-spaced data / Deeming T. J. // *Astrophys. Space Sci.* – 1975. – V. 36. – P. 137–158.
51. Bastian, T. S. Dynamic spectra of radio bursts from flare stars / Bastian T. S., Bookbinder J., Dulk, G. A., Davis M. // *ApJ.* – 1990. – Part 1. – V. 353. – p. 265–273.
52. Stepanov A. V. Oscillations of Optical Emission from Flare Stars and Coronal Loop Diagnostics / Stepanov A. V., Kopylova Yu. G., Tsap Yu. T., Kupriyanova E. G. // *Astronomy Letters.* – 2005. – V. 31. – Issue 9. – pp. 612–619.
53. Pettersen, B. R. Physical parameters of solar neighbourhood flare stars / Pettersen B. R. // *Astron. and Astrophys.* – 1980. – V. 82. – No. 1–2. – P. 53–60.
54. Byrne, P. B. A search for optical pulses from the galactic Centre / Byrne, P. B.; Wayman, P. A. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1975. – V. 173. – p. 537–552.

55. Kokkotas K.D. On the detectability of the post-Newtonian effects in gravitational-wave emission of a coalescing binary / Kokkotas K.D., Krolak A., Schafer G. // Proceedings, 2nd Hellenic Astronomical Conference, Ed. by M. Contadakis – 1996. – P. 461–465.
56. Chronopoulos A.E. Less accurate but more efficient family of search templates for detection of gravitational waves from inspiraling compact binaries / Chronopoulos A.E., Apostolatos T.A. // Physical Review D. – 2001. – V. 64. – N. 4. – id.042003.
57. Thornton D. A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances / D. Thornton, B. Stappers, M. Bailes, et al. // Science. – 2013. – V. 340. – Issue 6141. – 5th July 2013. – P. 6.
58. Engelkemeir D. Photoelectric Observations of a Flare on AD Leonis / D. Engelkemeir // Publ. Astron. Soc. Pacific. – 1959. – V.71. – P. 522 – 525.
59. Meegan C.A. The Third BATSE Gamma-Ray Burst Catalog / Meegan C.A., Pendleton G.N., Briggs M.S., et al. // ApJS. – 1996. – V. 106.– P. 65.
60. Cline, D.B. Study of Very Short Gamma-Ray Bursts / Cline D.B., Matthey C., Otwinowski S. // ApJ. – 1999. – V. 527. – p. 827–834.
61. Evans C.R. The tidal disruption of a star by a massive black hole / Evans, C.R., Kochanek, C.S. // ApJ. – 1989. – V. 346. – L13.
62. Heintze J.R.W. The accuracy limit of ground-based stellar photometry / J.R.W. Heintze, C. de Jager, W. Van der Veen // Proceedings of the Workshop on Space research prospects in stellar activity and variability, 1984. Edited by A.Mangeney and F. Praderie, Observatoire de Paris–Meudon. – 1984. – P. 157–168.
63. Lockwood G.W. Luminosity Variations of Stars Similar to the Sun / Lockwood G. W., Skiff, B. A. // Bulletin of the American Astronomical Society. – 1988. – V. 20. – P. 997.
64. Ivantsov A. Observations of asteroids with CCD telescopes according to the programme of international co-operation between the Mykolaiv Astronomical Observatory, Institute of Applied Astronomy, and Bordeaux Astronomical Observatory / Ivantsov A., Kovalchuk M., Martinov K., et al. // Kinematics and physics of celestial bodies, Supplement – 2000. – No 3. – P. 225–226.
65. Young A. T. Precise automatic differential stellar photometry / Young A. T., Genet R. M., Boyd L. J., et al. // PASP – 1991. – V. 103. – P. 221–242.
66. Alekseev I. Yu. Modeling of Emission Spectra of the Flaring Red Dwarf EV Lac: Active Regions, Flares, and Microflares / I. Yu. Alekseev, E. A. Baranovskij, R. E. Gershberg, I. V. Ilin, B. P. Pettersen, D. N. Shakhovskoi, and M. Jablonsky / – MAIK Nauka Interperiodica, 2003. – 21с.
67. Byrne, P. B. A search for optical pulses from the galactic Centre / Byrne P. B., Wayman P. A. // MNRAS. – 1975. – V. 173. – p. 537–552.
68. Deeming T. J. Fourier analysis with unequally-spaced data / Deeming T. J. // Astrophys. Space Sci. – 1975. – V. 36. – P. 137–158.
69. Болч Б. Многомерные статистические методы для экономики / Болч Б., Хуань С. Дж. – Пер. с англ. – М: Статистика, 1979. – 317 с.

АНОТАЦІЯ

Жиляев Б.Ю. Швидка маломасштабна змінність зір. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2014.

Розглянуто коло проблем, пов'язаних з вивченням швидкої маломасштабної змінності небесних тіл. Досліджено швидкі варіації блиску ряду зір, космічних гамма-сплесків, короткочасні спалахи в ядрах галактик. Розроблено методи оцінювання параметрів гармонік, стохастичної змінності, аналізу даних, отриманих у випадкові моменти часу. Створено інструмент, який не має аналогів у світі, – Синхронна Мережа віддалених Телескопів. Виявлено швидкі коливання в зоряних спалахах, у гіганта V390 Aur, спалахи в галактиках NGC 7331 і NGC 1068 тривалістю близько 1 с, коливання в космічних гамма-сплесках. Проведено цикли спостережень для визначення точності наземної фотометрії. Виконано чисельне моделювання з метою визначення обмежень для проведення надвисокочастотної фотометрії. Показано, що фотометрія розріджених потоків квантів у відсутності кривих блиску, пов'язаних або зі слабкістю спостережуваного об'єкта, або з пошуком надвисокочастотної змінності, неможлива в часовому поданні, може з успіхом проводитися в частотному представленні Фур'є.

Ключові слова: статистичні методи оцінювання, змінні зорі, фотометрія зір, гамма-спалахи, ядра галактик, вейвлет-перетворення, цифрова фільтрація.

АННОТАЦИЯ

Жиляев Б.Е. Быстрая маломасштабная переменность звезд. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2014.

В диссертации рассмотрен обширный круг проблем, связанных с изучением свойств быстрой маломасштабной переменности небесных тел. Значительное внимание уделено разработке статистических методов обнаружения и оценивания сигналов на фоне помех. Работа базируется в основном на анализе данных фотометрии, полученных с Синхронной Сетью удаленных Телескопов, расположенных на территории четырех стран. Исследование включает также интерпретацию наблюдений быстрой маломасштабной переменности ряда вспыхивающих, хромосферноактивных, катаклизмических переменных звезд, а также кратковременных вспышек в ядрах галактик и космических гамма-всплесков.

В диссертации предложен ряд новых эффективных методов расчета, опирающихся на статистику квантов. Разработаны методы, базирующиеся на технике цифровой фильтрации; оценивания параметров гармоник и стандартных ошибок их характеристик на основе функции правдоподобия; обнаружения

стохастической переменности звезд на основе интегральных преобразований кривых блеска; восстановления сигналов на заданном уровне доверительной вероятности методами фурье-анализа и линейного непрерывного вейвлет-преобразования; анализа временных рядов данных, полученных в случайные моменты времени на базе критерия Хотеллинга и метода Барнинга.

Под руководством и при участии диссертанта был создан уникальный инструмент для астрономических наблюдений не имеющий аналогов в мире, – Синхронная Сеть удаленных Телескопов, объединяющая телескопы четырех обсерваторий в Украине, России, Болгарии и Греции. Использование GPS технологии обеспечивает привязку моментов регистрируемых событий с погрешностью не хуже 1 мкс к шкале времени UTC. Разработаны новые алгоритмы, основанные на поиске совпадений в многоканальных датчиках. Это позволило получать информацию беспрецедентного качества для изучения быстрой маломасштабной переменности.

Быстрая спектрофотометрия вспыхивающих звезд подтвердила наличие высокочастотных колебаний в звездных вспышках, первоначально обнаруженных Родоно в 1972 г. Мы показали, что цветовые индексы колеблются на временной шкале несколько секунд, что вспышка колеблется в течение большей части своей жизни между состояниями водородной плазмы прозрачной и непрозрачной в бальмеровском континууме. Спектральные наблюдения с высоким временным разрешением показали, что вспыхивающая звезда EV Lac демонстрирует вариации в эмиссионных линиях в спокойном состоянии блеска. Это подтверждает гипотезу, что у вспыхивающих красных карликов «перманентно существуют микровспышки».

Наблюдения быстро вращающегося хромосферноактивного гиганта позднего спектрального класса V390 Aur, выполненного с Синхронной Сетью Телескопов позволили обнаружить переменность в диапазоне 0.1 – 10 Гц, с максимумом на частоте около 1 Гц, с амплитудой около 0.005 звездной величины в полосах UVV. Было предложено связать наблюдаемые вариации блеска с ансамблем микровспышек. Согласно предложенной модели, типичная микровспышка имеет максимальную амплитуду 0.005 звездной величины, частота вспышек около шести событий в минуту, и продолжительность активной фазы около 4 секунд.

В процессе синхронного мониторинга ядер галактик NGC 7331 и сейфертовской галактики NGC 1068 с точностью синхронизации 1 мс с частотой выборки 100 Гц были обнаружены одновременные короткие вспышки блеска на двух инструментах, расположенных на расстоянии около тысячи километров друг от друга. Так вспышка в галактике NGC 1068 длительностью около 1 с имеет совместную доверительную вероятность для двух телескопов 99.999917%. Слияние черных дыр (ЧД) промежуточной массы с ЧД малых масс или с нормальными звездами предполагается как наиболее вероятный механизм для коротких вспышек. Наши наблюдения подтверждают гипотезу о существовании черных дыр промежуточных масс в центрах галактик и плотных шаровых скоплениях.

Мы обнаружили в коротких космических гамма-всплесках (BATSE триггеры 207, 432, 512, 2463) колебания, периоды которых лежат в диапазоне миллисекунд, а амплитуды достигают десятков процентов. Мы аргументируем, что высокочастотные колебания во всплесках могут быть связаны с аккрецией «мусора», образовавшегося после приливного разрушения нейтронной звезды черной дырой в двойной системе.

Проведены циклы наблюдений для определения точности наземной фотометрии. По результатам наблюдений с двухканальными фотометрами было показано, что фотометрические ошибки достигают минимума за время накопления около 60 секунд и далее колеблются примерно около 0.002 звездной величины.

Выполнено численное моделирование с целью определения ограничений для проведения сверхвысокочастотной фотометрии. Показано, что фотометрия разреженных потоков квантов в отсутствии кривых блеска, связанных со слабостью наблюдаемого объекта либо с поиском сверхвысокочастотной переменности, невозможная во временном представлении, может с успехом проводиться в частотном представлении Фурье.

Ключевые слова: статистические методы оценивания, переменные звезды, фотометрия звезд, гамма-вспышки, ядра галактик, вейвлет-преобразование, цифровая фильтрация.

ABSTRACT

Zhilyaev B.E. Rapid small-scale variability of stars. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of physical mathematical sciences, specialty 01.03.02 – Astrophysics, radio astronomy. – Main Astronomical Observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, 2014.

A range of problems related to the study of small-scale rapid variability of the celestial bodies are considered. A number of fast light variations of stars, gamma-ray bursts, and short bursts in galactic nuclei are investigated. The methods for estimating the parameters of harmonics, stochastic variability, and analysis of data obtained at random moments of time are developed. The Synchronous Network of distant Telescopes is established. We have detected oscillations in stellar flares, in the giant V390 Aur, flashes in galaxies NGC 7331 and NGC 1068 with duration of about 1 s, short-term fluctuations in the cosmic gamma-ray bursts. A series of observations to determine the accuracy of ground-based photometry were carried out. We made numerical simulation to determine the limits for ultrahigh frequency photometry. It is shown that photometry of sparse quantum fluxes in the absence of the light curves associated with the weakness of the observed object or finding ultrahigh frequency photometry impossible in the time representation can be successfully carried out in the frequency Fourier representation.

Key words: statistical methods for estimating, variable stars, photometry of stars, gamma flares, galactic nuclei, wavelet transformation, digital filtering.