

Володимир МИСЛИНЧУК
Вадим ДРОЗД

*Дослідження фотометричних характеристик
квазарів на основі астрономичної бази
цифрового огляду неба SDSS-III*

Методичний посібник



@РДГУ, 2025

Міністерство освіти і науки України
Рівненський державний гуманітарний університет
Факультет документальних комунікацій, менеджменту, технологій та фізики
Кафедра фізики, астрономії та методики викладання

Володимир Мислінчук

Вадим Дрозд

*"Дослідження фотометричних характеристик
квazarів на основі астрономічної бази цифрового
огляду неба SDSS-III"*

Методичний посібник для організації дослідницької навчальної діяльності з
фізики та астрономії для здобувачів вищої освіти з спеціальностей:
Е5 Фізика та астрономія, А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія),
А4.15 Середня освіта (Природничі науки)

Рівне 2025 р.

УДК: 524.883 (072)

Д 70

Друкується за рішенням навчально-методичної комісії факультету документальних комунікацій, менеджменту, технологій та фізики Рівненського державного гуманітарного університету (протокол №2 від 27.10.2025 р.).

Д70 Дослідження фотометричних характеристик квазарів на основі астрономічної бази цифрового огляду неба SDSS-III. Методичний посібник для організації дослідницької навчальної діяльності з фізики та астрономії для здобувачів вищої освіти з спеціальностей: Е5 Фізика та астрономія; А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія); А4.15 Середня освіта (Природничі науки) / Автори-укладачі: В.О. Мислінчук, В.П. Дрозд. – Рівне: РДГУ, 2025. – 93 с.

Автори-укладачі:

В.О. Мислінчук, кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, астрономії та методики викладання РДГУ;

В.П. Дрозд, магістр Фізики та астрономії спеціальності Е5 Фізика та астрономія факультету Документальних комунікацій, менеджменту, технологій та фізики РДГУ.

Рецензент: Б.П. Рудик – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри хімії і фізики Національного університету водного господарства та природокористування.

Відповідальний редактор В.О. Мислінчук, кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, астрономії та методики викладання РДГУ.

Методичний посібник призначений для організації самостійної науково-дослідницької діяльності з фізики та астрономії при використанні даних астрономічної бази SDSS. Він буде корисний для вчителів, фізиків-практиків, учнів та здобувачів вищої освіти спеціальностей: Е5 Фізика та астрономія, А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія), А4.15 Середня освіта (Природничі науки).

Методичний посібник схвалений та рекомендований до друку кафедрою фізики, астрономії та методики викладання РДГУ (протокол №9(а) від 25 вересня 2025 р.).

© В.О. Мислінчук В.О., В.П. Дрозд, 2025

ЗМІСТ

Вступ.	5
РОЗДІЛ I. КВАЗАРИ ТА ПРОЕКТ SDSS-III: ОГЛЯД І МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.	7
1.1. Вступ до вивчення квазарів. Відкриття та основні характеристики.	7
1.2. Спектральні та фотометричні властивості квазарів.	9
1.3. Роль квазарів у сучасній астрофізиці.	12
1.4. Огляд проекту SDSS-III. Історія створення та етапи розвитку проекту.	14
1.5. База даних SDSS-III та її можливості.	21
РОЗДІЛ II. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗАРІВ.	25
2.1. Вибір та підготовка вибірки квазарів. Критерії відбору квазарів з бази даних SDSS-III. Мотивація та завдання відбору.	25
2.2. Фотометричний аналіз квазарів. Визначення зоряних величин у різних фільтрах (u, g, r, i, z). Фотометрична система SDSS.	32
2.3. Взаємозв'язок фотометричних характеристик та червоного зміщення.	39
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ.	45
3.1. Аналіз фотометричних характеристик вибраних квазарів.	45
3.2. Математичний опис графіків та їх інтерпретація.	56
3.3. Критерії належності зореподібних об'єктів до квазарів.	61
3.4. Обговорення отриманих результатів.	71
Висновки.	76
Список використаних джерел.	79
Додатки.	85

ВСТУП

Квазари є одними з найбільш енергійних та яскравих об'єктів у Всесвіті, що випромінюють колосальні кількості енергії в широкому діапазоні електромагнітного спектра [1; 2]. Вони відіграють ключову роль у розумінні процесів еволюції галактик, формування надмасивних чорних дір та великомасштабної структури Всесвіту [3; 4]. Завдяки своїй високій світності, квазари можуть бути спостережуваними на дуже великих космологічних відстанях, що дозволяє досліджувати ранні епохи розвитку Всесвіту та перевіряти космологічні моделі [5].

Фотометричні характеристики квазарів, такі як їхні зоряні величини у різних фільтрах та кольорові індекси, надають важливу інформацію про фізичні умови в акреційних дисках надмасивних чорних дір, хімічний склад та поглинання у міжгалактичному середовищі. Вивчення взаємозв'язку між фотометричними характеристиками та червоним зміщенням квазарів є важливим для розуміння їхньої еволюції та для розробки ефективних методів їхнього виявлення та класифікації [6; 7].

Цифровий огляд неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS) є одним із наймасштабніших та найдетальніших астрономічних проєктів, що надає величезний масив високоякісних фотометричних та спектроскопічних даних про небесні об'єкти, включаючи квазари. Використання цієї бази даних відкриває широкі можливості для статистичного аналізу великих вибірок квазарів та дослідження їхніх фотометричних властивостей з високою точністю [8].

Актуальність даного посібника обумовлена необхідністю опису детального аналізу фотометричних характеристик квазарів на основі сучасних та високоточних даних SDSS. Встановлення чітких взаємозв'язків між фотометричними параметрами та червоним зміщенням квазарів сприятиме покращенню методів їхнього виявлення та класифікації, а також глибшому розумінню фізичних процесів, що відбуваються у цих об'єктах [4; 9].

Мета посібника показати процес дослідження фотометричних характеристик квазарів на основі бази даних цифрового огляду неба SDSS та

встановити взаємозв'язок між їхнім розташуванням на кольорових діаграмах та червоним зміщенням з метою розробки критеріїв належності зореподібних об'єктів до класу квазарів.

Об'єкт дослідження: квазари як далекі позагалактичні зореподібні об'єкти з високим червоним зміщенням.

Предмет дослідження: фотометричні характеристики квазарів з бази даних цифрового огляду неба SDSS та їхній взаємозв'язок із червоним зміщенням.

Завдання дослідження:

1. Здійснити огляд історичних передумов відкриття та вивчення квазізоряних об'єктів, їхніх фізичних властивостей та особливостей випромінювання .
2. Розглянути методи спостереження та спектрального аналізу квазарів, особливу увагу приділити фотометричним методам дослідження.
3. Ознайомитися з базою даних цифрового огляду неба SDSS та методами роботи з нею для вибору та аналізу квазарів.
4. Вибрати вибірку з 10000 квазарів із бази даних SDSS та дослідити їхні фотометричні характеристики.
5. Встановити взаємозв'язок між розташуванням квазара на кольоровій діаграмі та його червоним зміщенням.
6. Сформулювати критерії належності зореподібних об'єктів до класу квазарів на основі їхніх фотометричних характеристик.
7. Визначити перспективи подальших досліджень фотометричних властивостей квазарів та їхньої ролі у вивченні Всесвіту.

РОЗДІЛ I. КВАЗАРИ ТА ПРОЕКТ SDSS-III: ОГЛЯД І МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Вступ до вивчення квазарів. Відкриття та основні характеристики.

Початок дослідження квазарів сягає середини XX століття, коли розвиток радіоастрономії відкрив нові горизонти у вивченні Всесвіту. Після Другої світової війни було побудовано перші великі радіотелескопи, які дозволили проводити систематичні огляди неба в радіодіапазоні [10]. У процесі цих оглядів було виявлено численні радіоджерела, які не мали видимих оптичних відповідників.

Виявилося, що кутові розміри цих радіоджерел дуже малі, тому їх назвали "квазізоряними радіоджерелами" або квазарами. Першим квазаром, ідентифікованим в оптичному діапазоні, був 3C48 у 1960 році, хоча його природа залишалася неясною [11]. Однак справжнім проривом стало відкриття Мартіна Шмідта у 1963 році, коли він, аналізуючи спектр об'єкта 3C273, виявив сильне червоне зміщення емісійних ліній [12]. Це зміщення відповідало швидкості віддалення близько 47 000 км/с, що вказувало на космологічну природу цих об'єктів.

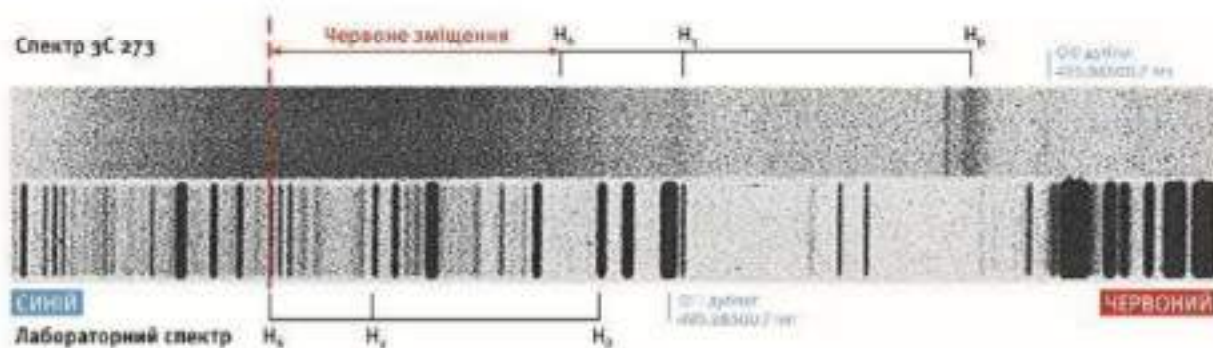


Рисунок 1.1. Спектр квазара 3C273 із зазначеними емісійними лініями та їхнім червоним зміщенням

Відкриття Шмідта мало революційне значення, оскільки вперше було встановлено існування об'єктів з настільки великим червоним зміщенням, що свідчило про їхнє розташування на величезних космологічних відстанях [11]. Ці об'єкти мали зореподібний вигляд у оптичному діапазоні, але водночас були потужними джерелами радіовипромінювання. У 1964 році американський

астрофізик Хонг-Ї Чіу ввів термін "quasar" як скорочення від "quasi-stellar radio sources", що стало загальноприйнятим у науковій спільноті. [13].

Фізичні особливості та класифікація квазарів. Квазари є одними з найяскравіших та найенергійніших об'єктів у відомому Всесвіті. Їхня світність може перевищувати світність типових галактик у сотні разів. Наприклад, потужність випромінювання квазара S50014+81 в оптичному діапазоні перевищує $5 \cdot 10^{14} L_{\odot}$ світність Сонця [14].

Основним джерелом енергії квазарів вважається акреція матерії на надмасивну чорну діру, розташовану в центрі активної галактики [2]. Газ, що падає на чорну діру, утворює акреційний диск, в якому речовина нагрівається до температур мільйонів градусів, випромінюючи енергію в широкому діапазоні електромагнітного спектра.



Рисунок 1.2. Художнє зображення акреційного диска навколо надмасивної чорної діри в квазарі [15]

Квазари демонструють змінність яскравості на часових масштабах від днів до років, що є характерною рисою цих об'єктів [16]. Така змінність обумовлена фізичними процесами в компактній зоні випромінювання, пов'язаній з акреційним диском і джетами, що оточують надмасивну чорну діру. За принципом каузальності, максимальний розмір зони випромінювання обмежується швидкістю світла та часом варіації яскравості. Наприклад, якщо

зміна яскравості відбувається за кілька днів (Δt), то розмір зони випромінювання не може перевищувати $R \leq c \cdot \Delta t$, де c — швидкість світла. Це означає, що джерела, які спричиняють таку змінність, є надзвичайно компактними.

Класифікація квазарів (радіогучні та радіотихі). Квазари класифікуються на дві основні групи за їхніми радіовипромінювальними характеристиками:

1. Радіогучні квазари — складають близько 10% усіх квазарів і є потужними джерелами радіовипромінювання. Вони часто мають релятивістські джети — струмені плазми, що викидаються зі швидкостями, близькими до швидкості світла, завдяки акреції матерії на надмасивну чорну діру [17; 18].

2. Радіотихі квазари — складають ~90% квазарів і мають відносно слабке або відсутнє радіовипромінювання. Їхнє випромінювання домінує в оптичному та рентгенівському діапазонах, а джети зазвичай відсутні або незначні [19].

Таблиця 1.1.

Порівняльні характеристики радіогучних та радіотихих квазарів

Параметр	Радіогучні квазари	Радіотихі квазари
Відсоток від загальної кількості	~10%	~90%
Радіовипромінювання	Потужне	Слабке або відсутнє
Наявність джетів	Зазвичай є	Рідко або відсутні
Домінуюче випромінювання	Радіо та оптичне	Оптичне та рентгенівське

Причини різниці між радіогучними та радіотихими квазарами досі є предметом досліджень. Однією з гіпотез є вплив магнітних полів та швидкості обертання чорної діри на формування джетів [20].

1.2. Спектральні та фотометричні властивості квазарів

Спектри квазарів та їх особливості. Спектральні дослідження квазарів є ключовими для розуміння фізичних процесів, що відбуваються в їхніх ядрах. Спектри квазарів характеризуються наявністю широких емісійних ліній, ширина

яких може досягати декількох тисяч кілометрів на секунду [1]. Це вказує на високі швидкості руху газу в околицях чорної діри.

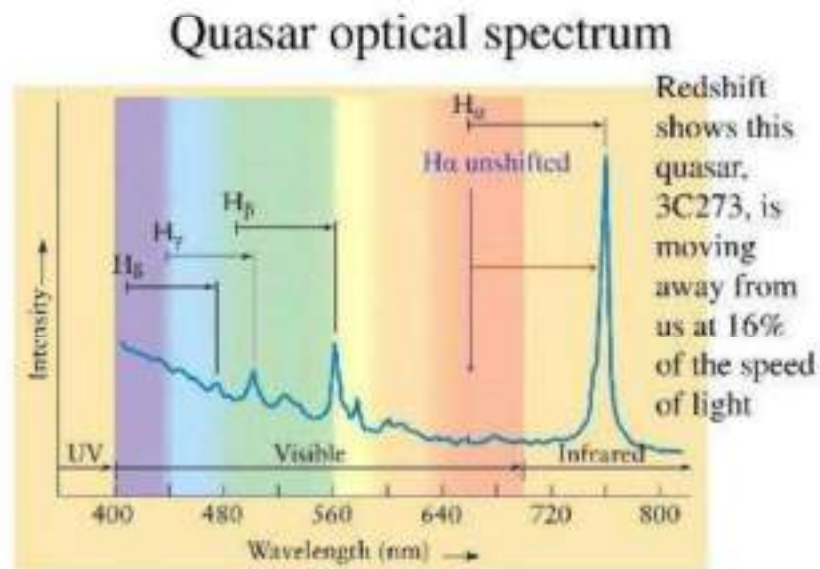


Рисунок 1.3. Типовий оптичний спектр квазара

На рисунку 1.3 показано типовий оптичний спектр квазара 3C273, включно з червоним зміщенням емісійних ліній, що підтверджує швидкість його віддалення (16% швидкості світла) і космологічну природу об'єкта.

Основні особливості спектрів квазарів:

- *Широкі емісійні лінії* (наприклад, лінії водню $H\beta$, $H\alpha$) — виникають у зоні широких ліній (BLR) поблизу надмасивної чорної діри. Ширина цих ліній, що досягає кількох тисяч км/с, вказує на високу швидкість обертання газу в гравітаційному полі чорної діри.
- *Вузькі емісійні лінії* — походять із області вузьких ліній (NLR), яка розташована на більшій відстані від чорної діри, де швидкість руху газу є значно меншою.
- *Континуум випромінювання* з ультрафіолетовим і рентгенівським надлишком є наслідком процесів у гарячій плазмі акреційного диска, що випромінює енергію у широкому діапазоні електромагнітного спектра.

Червоне зміщення в спектрах квазарів. Червоне зміщення (z) є фундаментальним параметром в астрофізиці, що відображає розтягнення спектра об'єкта через розширення Всесвіту [Hogg D.W., 1999]. Для квазарів

значення z можуть бути дуже великими, досягаючи $z > 7$ [21], що відповідає епоху, коли Всесвіту було лише кілька сотень мільйонів років.

Червоне зміщення визначається за формулою:

$$z = \frac{\lambda_{\text{спост}} - \lambda_{\text{лаб}}}{\lambda_{\text{лаб}}} \quad (1.1)$$

де $\lambda_{\text{спост}}$ — спостережувана довжина хвилі, $\lambda_{\text{лаб}}$ — лабораторна довжина хвилі.

Велике червоне зміщення квазарів дозволяє вивчати ранні етапи еволюції Всесвіту, зокрема процеси реіонізації та формування перших структур [5].

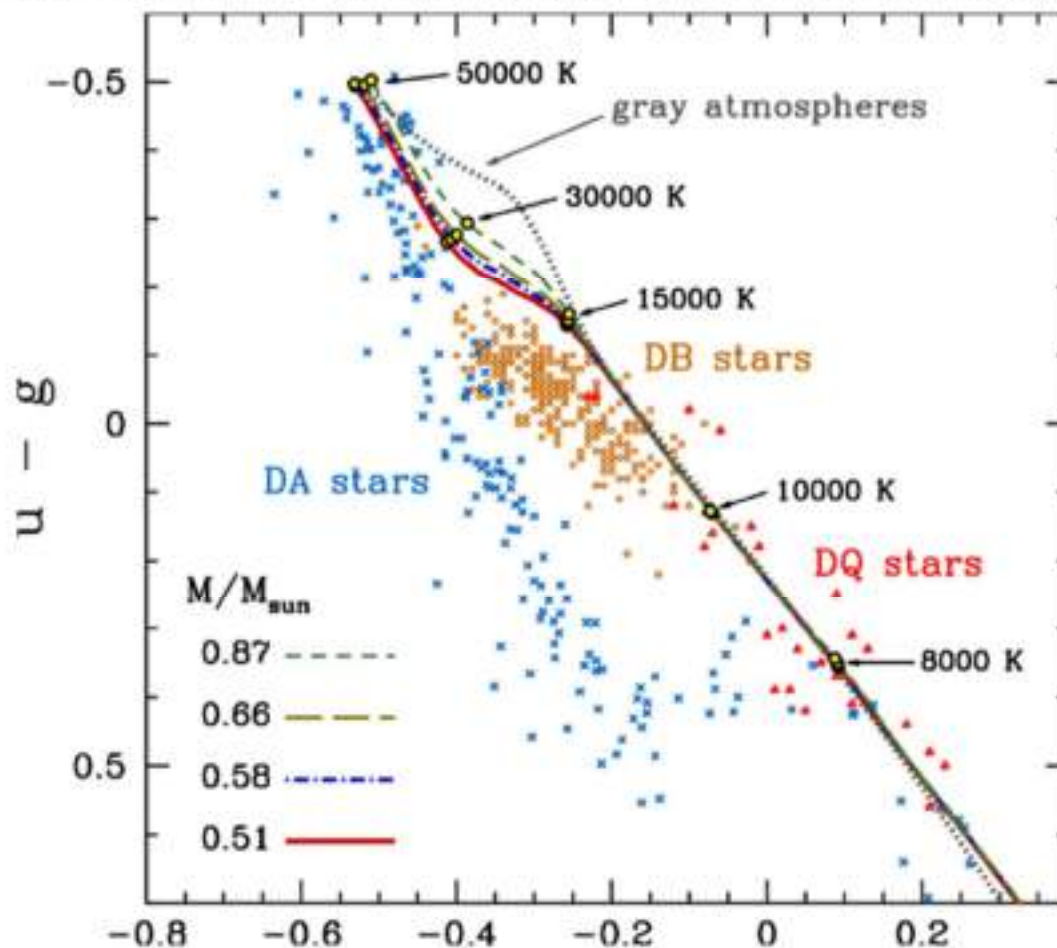


Рисунок 1.4. Приклад кольорової діаграми $(u - g)$ проти $(g - r)$ для зір та квазарів у системі SDSS.

Фотометричні характеристики та змінність квазарів. Фотометричні спостереження квазарів надають інформацію про їхню яскравість у різних діапазонах електромагнітного спектра. Завдяки своїй високій світності, квазари можуть бути видимими на дуже великих космологічних відстанях [22].

Кольорові індекси квазарів, що визначаються як різниці між зоряними величинами в різних фотометричних фільтрах, використовуються для їхньої ідентифікації та відрізнення від зір та галактик [23]. Наприклад, у системі фотометричних фільтрів SDSS (фільтри u , g , r , i , z) квазари займають певні області на кольорових діаграмах. Квазари також демонструють змінність яскравості на часових масштабах від днів до років [24]. Це може бути використано для дослідження внутрішньої структури акреційного диска та фізичних процесів у ньому.

1.3. Роль квазарів у сучасній астрофізиці. Квазари відіграють унікальну роль у сучасній астрофізиці завдяки їхнім екстремальним фізичним властивостям, високій світності та можливості спостерігати їх на величезних космологічних відстанях. Вони є незамінними інструментами для вивчення фізичних процесів, що відбувалися у ранньому Всесвіті, еволюції галактик та надмасивних чорних дір. Цей розділ об'єднує ключові аспекти, що характеризують значення квазарів у сучасній астрофізиці.

Квазари як інструменти для вивчення далекого Всесвіту. Завдяки своїй високій світності, квазари є одними з небагатьох об'єктів, які можна спостерігати на великих космологічних відстанях. Світло від найбільш віддалених квазарів, які ми спостерігаємо сьогодні, почало свій шлях до Землі понад 12 мільярдів років тому [21]. Це дозволяє використовувати їх як природні маяки для дослідження ранніх епох розвитку Всесвіту.

Спектри далеких квазарів дають змогу вивчати такі ключові аспекти:

- Хімічний склад міжгалактичного середовища через аналіз ліній поглинання в спектрах квазарів. Це дозволяє визначити елементний склад і фізичні умови у міжгалактичному середовищі.
- Епоху реіонізації Всесвіту, спостерігаючи за змінами в поглинанні Лайман-альфа лісу. Ці спостереження вказують на момент, коли перші джерела випромінювання іонізували нейтральний водень.

- Великомасштабну структуру Всесвіту через статистичний аналіз просторового розподілу квазарів, що дозволяє вивчати галактичні скупчення, філаментну структуру та інші космологічні особливості.

Зв'язок квазарів з надмасивними чорними дірами. Квазари є проявом активності надмасивних чорних дір у центрах галактик. Їхнє дослідження надає важливу інформацію про фізичні процеси, пов'язані з формуванням та еволюцією чорних дір. Зокрема, вивчення квазарів дозволяє:

- Досліджувати процеси акреції матерії на чорні діри, що лежать в основі їхньої екстремальної світності. Фізика акреційних дисків включає нагрівання газу до високих температур, генерацію рентгенівського та ультрафіолетового випромінювання.

- Визначати механізми формування надмасивних чорних дір у ранньому Всесвіті. Це дає змогу зрозуміти, як ці об'єкти досягли маси мільярдів сонць упродовж відносно короткого часу після Великого вибуху.

- Вивчати взаємодію між чорними дірами та галактиками-господарями, включаючи механізми зворотного зв'язку. Ці процеси впливають на формування зір, потоки газу та загальну структуру галактики.

Використання квазарів для дослідження космологічної еволюції. Квазари є цінними індикаторами для вивчення космологічної еволюції Всесвіту. Їхня висока світність і віддаленість роблять їх ідеальними для космологічних досліджень. Зокрема, квазари використовуються для:

- Вимірювання параметрів космологічних моделей, таких як постійна Габбла та параметри темної енергії. Це досягається через аналіз їхніх спектрів і розподілу в просторі.

- Дослідження еволюції хімічного складу міжгалактичного середовища та процесів нуклеосинтезу. Це дозволяє відстежувати зміни в хімічному складі від раннього Всесвіту до сучасності.

- Вивчення темної матерії через аналіз гравітаційного лінзування квазарів. Гравітаційне лінзування дає змогу дослідити масу та розподіл темної матерії у великих структурах.

Квазари є одними з найважливіших інструментів для вивчення далекого Всесвіту, надмасивних чорних дір та космологічної еволюції. Їхня унікальна світність і спектральні особливості дозволяють заглибитися в ранні епохи розвитку Всесвіту, дослідити міжгалактичне середовище та фізичні процеси в акреційних дисках.

1.4. Огляд проекту SDSS-III. Історія створення та етапи розвитку проекту. Проект *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* є одним із найбільших та найамбітніших астрономічних оглядів в історії. Його метою було створення детальних карт Всесвіту шляхом систематичного спостереження та каталогізації небесних об'єктів [25].

Ідея створення SDSS виникла наприкінці 1980-х років, коли технології детекторів та комп'ютерної обробки даних досягли рівня, необхідного для масштабних астрономічних проектів. Офіційно проект розпочався у 1990 році зі співпраці декількох університетів та дослідницьких інститутів. На рисунку 1.5 представлено хронологію розвитку проекту SDSS з основними етапами та підпроектами.

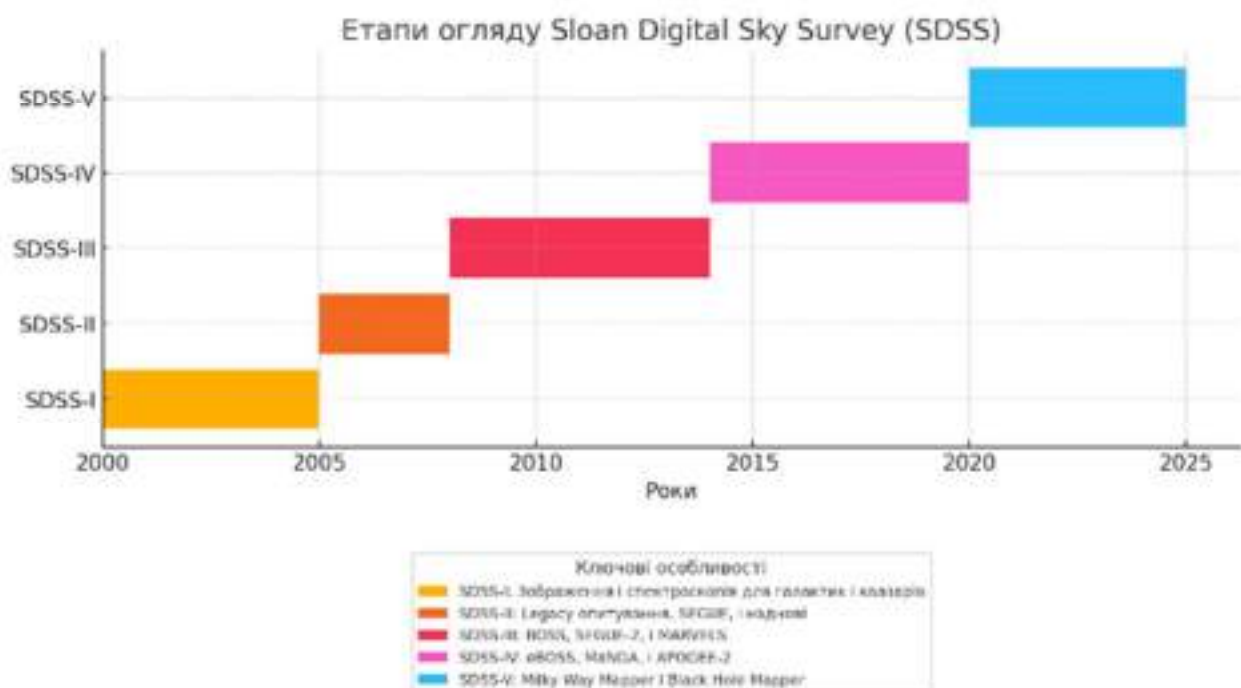


Рисунок 1.5. Хронологія розвитку проекту SDSS з основними етапами та підпроектами

Перший етап, SDSS-I, тривав з 2000 по 2005 роки. За цей період було отримано зображення близько 8000 квадратних градусів неба та спектри понад 1 мільйона об'єктів. Основними досягненнями SDSS-I були:

- *Фотометричний огляд* понад 14 000 квадратних градусів неба в п'яти оптичних фільтрах.
- *Спектроскопічний огляд* з отриманням спектрів понад 930 000 галактик, 120 000 квазарів та 225 000 зір.

Другий етап, SDSS-II (2005–2008), включав три підпроекти:

- *Legacy Survey*: продовження основного фотометричного та спектроскопічного огляду.
- *SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration)*: дослідження структури та складу нашої Галактики.
- *Supernova Survey*: пошук та вивчення наднових типу Ia для космологічних досліджень [26].

Третій етап, SDSS-III (2008–2014), був спрямований на розширення спектроскопічних спостережень та включав чотири основні огляди.

- *BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)*: вивчення баріонних акустичних осциляцій для вимірювання масштабів Всесвіту з високою точністю.
- *SEGUE-2*: продовження досліджень нашої Галактики, зокрема її гало та диска.
- *MARVELS (Multi-object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey)*: пошук екзопланет за допомогою методу радіальних швидкостей.
- *APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment)*: інфрачервоний спектроскопічний огляд зір нашої Галактики з високою роздільною здатністю.

Четвертий етап, SDSS-IV (2014–2020), продовжив та розширив попередні дослідження.

- *eBOSS (extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)*: розширення досліджень баріонних акустичних осциляцій.

- *APOGEE-2*: продовження інфрачервоного спектроскопічного огляду.

- *MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at APO)*: дослідження внутрішньої структури галактик за допомогою інтегрального польового спектроскопії.

П'ятий етап SDSS-V. П'ятий етап проекту SDSS-V, який розпочався у 2020 році, має на меті ще ширше охоплення космологічних та галактичних досліджень за допомогою інноваційних технологій. Цей етап включає три основні проекти:

- *Milky Way Mapper*: детальне картування структури та кінематики Чумацького Шляху шляхом спектроскопічних спостережень мільйонів зір.

- *Black Hole Mapper*: вивчення надмасивних чорних дір через спектроскопію активних ядер галактик.

- *Local Volume Mapper*: дослідження газових потоків у найближчих галактиках за допомогою інтегрального польового спектроскопії.

SDSS-V є першим багатороботизованим спектроскопічним оглядом, який дозволяє одночасно спостерігати тисячі об'єктів, що значно підвищує ефективність спостережень. Цей етап відкриває нові горизонти у вивченні еволюції галактик, формування зір та природи чорних дір.

Цілі та завдання SDSS-III. *Sloan Digital Sky Survey (SDSS-III)* був амбітним проектом, спрямованим на поглиблення нашого розуміння Всесвіту шляхом збору високоякісних спектроскопічних і фотометричних даних про небесні об'єкти. Основні цілі проекту були спрямовані на вивчення космологічних, галактичних і позагалактичних явищ із використанням найсучасніших методів спостереження. Конкретні завдання *SDSS-III* включали:

1. **Вимірювання масштабів Всесвіту за допомогою баріонних акустичних осциляцій.** Проект *BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)* мав на меті вимірювання масштабів Всесвіту через вивчення баріонних акустичних осциляцій у розподілі галактик та міжгалактичного газу. Ці вимірювання дозволяли уточнити параметри космологічної моделі, зокрема

константу Габбла, щільність темної матерії та вплив темної енергії на розширення Всесвіту.

2. **Дослідження структури та еволюції Чумацького Шляху.** В рамках проекту *APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment)* було отримано високоточні інфрачервоні спектри понад 300 тисяч зір у нашій галактиці. Це дозволило:

- Вивчити хімічний склад та кінематику зір у різних компонентах Чумацького Шляху (галактичний диск, балдж, гало).
- Побудувати моделі формування й еволюції галактик, зокрема нашої.

3. **Пошук та характеристика екзопланет.** Проект *MARVELS (Multi-object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey)* був спрямований на виявлення та аналіз екзопланет методом вимірювання радіальних швидкостей. Основні досягнення:

- Створення статистичних вибірок планет у різних зіркових системах.
- Дослідження зв'язку між властивостями зір і їхніх планет.

4. **Розуміння темної енергії та темної матерії.** SDSS-III зосередив значні зусилля на уточненні космологічних параметрів через вивчення розподілу галактик, гравітаційного лінзування та статистичних властивостей міжгалактичного середовища.

Особливий акцент на вивчення квазарів. У SDSS-III значна увага приділялась квазарам — найяскравішим активним ядрам галактик. Основні задачі у цьому напрямі включали:

- *Дослідження еволюції квазарів:* Спектроскопічні дані дозволили відстежити зміни кількості, яскравості та інших характеристик квазарів у різних епохах.
- *Вивчення міжгалактичного середовища:* Лінії поглинання у спектрах квазарів надали унікальну інформацію про розподіл газу, зокрема водню, у ранньому Всесвіті.

- *Квазари як космологічні зонди:* Використання квазарів з високим червоним зсувом ($z > 2.15$) для вимірювання параметрів розширення Всесвіту і структури космічної павутини.

Додаткові завдання SDSS-III. Проект також передбачав:

- Розширення каталогу квазарів, зокрема об'єктів із високим червоним зсувом, для уточнення їхньої популяційної статистики.
- Вивчення фізичних характеристик квазарів: мас чорних дір, темпів акреції, властивостей акреційних дисків і механізмів формування джетів.
- Вимірювання властивостей галактик-господарів квазарів для вивчення взаємодії активних ядер із навколишнім середовищем.

Приладова база та методологія спостережень. Для реалізації цілей SDSS-III використовувався спеціально побудований 2,5-метровий телескоп, розташований в Обсерваторії Апач-Пойнт у Нью-Мексико, США. Фото даного телескопу показано на рисунку 1.6.

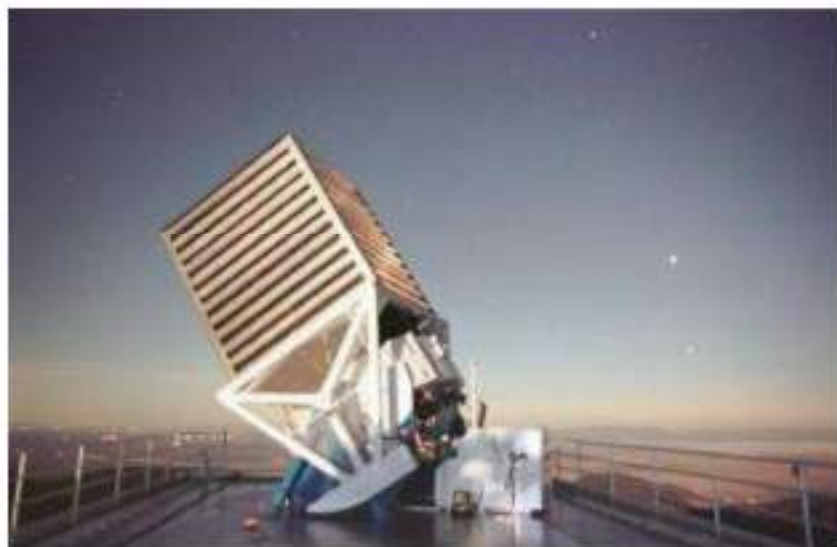


Рисунок 1.6. 2,5-метровий телескоп SDSS з інструментами [25]

Приладова база включала:

- *Ширококутну фотометричну камеру,* оснащену 30 ПЗЗ-детекторами, яка дозволяла одночасно спостерігати у п'яти фотометричних фільтрах: *u, g, r, i, z*. Ці фільтри покривали діапазон довжин хвиль від ультрафіолету до ближнього інфрачервоного. Детальні характеристики вказано

в таблиці 1.2. На рисунку 1.7 представлено криві пропускання фотометричних фільтрів SDSS

- *Багатооб'єктні спектрографи (BOSS Spectrograph)*, які дозволяли одночасно отримувати спектри до 1000 об'єктів. Для цього використовувалися спеціальні алюмінієві пластини з просвердленими отворами, в які вручну вставлялися оптичні волокна, підведені до спектрографів.
- *Система волоконної оптики*. Оптичні волокна дозволяли передавати світло з фокальної площини телескопа до спектрографів. Висока точність установки волокон забезпечувала мінімальні втрати сигналу.

Таблиця 1.2.

Характеристики фотометричних фільтрів SDSS

Фільтр	Середня довжина хвилі (нм)	Ширина смуги (нм)
u	354	60
g	477	137
r	623	137
i	763	152
z	913	95

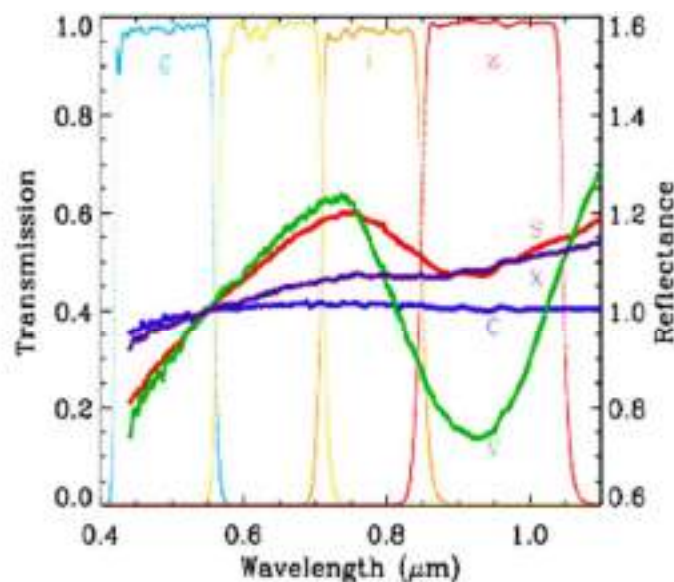


Рисунок 1.7. Криві пропускання фотометричних фільтрів SDSS, спектр нормалізовано на 550нм

Методологія спостережень:

- *Фотометричний огляд:* небо сканувалося в режимі дрейф-сканування (drift scanning), при якому зображення послідовно фіксувалися у всіх п'яти фільтрах. Це дозволяло отримувати однорідні фотометричні дані з високою точністю калібрування.
- *Спектроскопічні спостереження:* об'єкти для спектроскопії вибиралися на основі фотометричних критеріїв. Особлива увага приділялася вибору квазарів на основі їхніх кольорових характеристик.

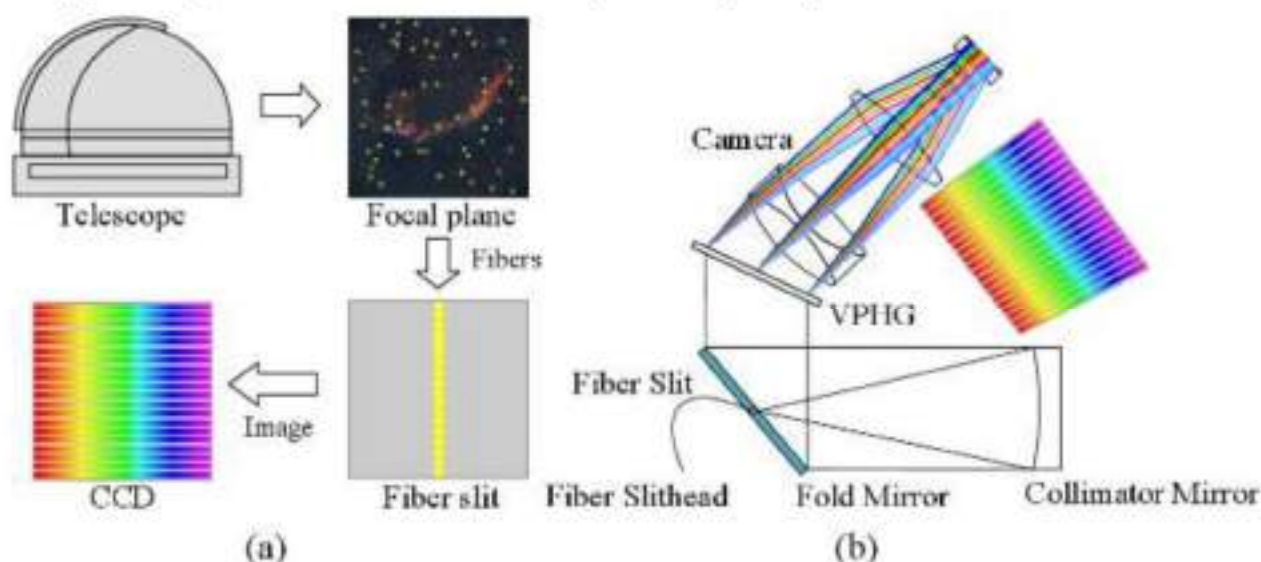


Рисунок 1.8. Схема роботи багатооб'єктного спектрографа SDSS з оптичними волокнами [25]

Обробка та зберігання даних: усі отримані дані автоматично оброблялися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке включало корекцію за атмосферне поглинання, калібрування та витяг спектрів. Дані зберігалися в публічно доступній базі даних SDSS.

Переваги методології SDSS

- *Висока однорідність та якість даних* завдяки стандартизованим методам спостережень та обробки.
- *Масштабність огляду,* що дозволило створити великі вибірки квазарів та інших об'єктів.

- *Публічний доступ до даних*, що сприяло широкому використанню результатів у науковому співтоваристві.

Результати SDSS-III

- *Каталог квазарів BOSS DR12*, який містить понад 300 000 квазарів з червоним зміщенням до $z \approx 6$.
- *Вимірювання баріонних акустичних осциляцій* з високою точністю, що покращило наші знання про параметри космологічних моделей.
- *Детальні карти Чумацького Шляху* з використанням інфрачервоних спектрів зір, що дозволило дослідити хімічний склад та кінематику нашої Галактики.

Таким чином, проект **SDSS-III** став важливим кроком у розвитку спостережної астрономії, надавши величезний масив даних для дослідження різних аспектів будови та еволюції Всесвіту, зокрема для вивчення квазарів. Його успіхи стали фундаментом для подальших проектів, таких як **SDSS-IV** та **SDSS-V**.

1.5. База даних SDSS-III та її можливості

Організація та доступ до даних SDSS-III

Усі дані, отримані в рамках проекту SDSS-III, після відповідної обробки та калібрування публікуються у відкритому доступі через спеціалізовані платформи. База даних організована у вигляді серії періодичних публічних релізів, позначених Data Release (DR), кожен з яких містить оновлені фотометричні та спектроскопічні каталоги, а також супровідну інформацію про інструменти та методи обробки даних. Ключові риси організації бази даних SDSS-III:

- *Структуровані каталоги*: Дані представлені у вигляді великих таблиць з інформацією про об'єкти – їхні координати, фотометричні величини, спектральні параметри та інші характеристики.
- *Єдина система ідентифікації*: Кожен об'єкт має унікальний ідентифікатор, що дозволяє легко поєднувати дані з різних релізів та порівнювати їх між собою.

- *Документація та супровідні матеріали:* Кожен реліз супроводжується детальною документацією, де описано методи калібрування, критерії відбору об'єктів, алгоритми визначення червоного зміщення та похибки вимірювань. Це забезпечує прозорість та відтворюваність наукових результатів [25].

Інструменти та сервіси для роботи з базою даних. Для доступу до даних SDSS-III існує низка онлайн-сервісів та інструментів, які полегшують пошук, аналіз та завантаження інформації:

- *SkyServer:* Це офіційний веб-портал SDSS, що надає зручний графічний інтерфейс для пошуку об'єктів за координатами, застосування фільтрів за фотометричними та спектроскопічними параметрами, а також попереднього перегляду зображень і спектрів.

- *CasJobs:* Потужна платформа для виконання SQL-запитів до бази даних. Дослідник може створювати складні вибірки об'єктів, застосовувати власні умови відбору, а також об'єднувати результати з власними локальними даними. CasJobs надає можливість пакетної обробки великих обсягів інформації, що надзвичайно важливо для статистичних досліджень квазарів та інших об'єктів [27].

- *Science Archive Server (SAS):* Сервер наукового архіву, де можна отримати доступ до сирих даних, калібрувальних файлів, програмного забезпечення та детальної документації щодо методів обробки.

- *API та машиночитні формати:* Дані доступні у форматах FITS, CSV та VOTable, що дозволяє легко інтегрувати їх у робочі процеси за допомогою мов програмування *Python*, *R*, *IDL* та ін. Це спрощує автоматизоване опрацювання великих зразків об'єктів та створення складних аналізаторів даних [8].

Можливості пошуку та інтеграції з іншими базами даних. Однією з ключових переваг SDSS-III є можливість інтегрувати дані з іншими великими астрономічними оглядами та базами даних. Наприклад, координати об'єктів SDSS-III можна використати для пошуку відповідників у таких каталогах, як 2MASS (*Two Micron All Sky Survey*), WISE (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) та

Gaia. Така крос-ідентифікація дозволяє розширити набір параметрів об'єктів, доповнити спектральні дані інфрачервоними вимірюваннями або високоточною астрометрією [28; 29].

Крім того, використання віртуальних обсерваторій (Virtual Observatory – VO) полегшує доступ до даних та крос-ідентифікацію. Стандарти VO та протоколи, як-от Simple Image Access (SIA) чи Table Access Protocol (TAP), дозволяють автоматизовано отримувати дані з різних джерел, поєднуючи їх в єдині наукові робочі процеси.

Спеціалізовані застосування бази даних для дослідження квазарів. Попри те, що попередньо обговорювалися загальні цілі *SDSS-III* щодо дослідження квазарів, тут варто акцентувати увагу на тому, які саме інструменти бази даних розкривають її потенціал:

- **Статистичні дослідження:** Завдяки багаторівневим фільтрам та *SQL*-запитам, можливо швидко сформувати великі вибірки квазарів за певними критеріями (наприклад, червоний зсув, яскравість, маса чорної діри, наявність певних спектральних ліній).

- **Аналіз еволюції:** Комбінуючи каталоги різних релізів *SDSS* та порівнюючи їх з даними інших оглядів, можна відстежувати еволюційні тренди популяцій квазарів і досліджувати їх вплив на формування галактик та еволюцію Всесвіту .

- **Перевірка космологічних моделей:** Великі вибірки квазарів дозволяють вивчати баріонні акустичні осциляції та інші космологічні ефекти. Використовуючи інтерактивні інструменти аналізу даних, дослідники можуть оперативно тестувати різні космологічні моделі і уточнювати параметри, пов'язані з темною енергією та темною матерією [30].

Переваги та перспективи використання даних *SDSS-III*. База даних *SDSS-III* забезпечує дослідників величезним обсягом високоякісних фотометричних і спектроскопічних даних, які можна гнучко застосовувати для широкого спектра астрофізичних задач. Її відмінними рисами є:

- **Масштаб та універсальність:** Великі каталоги квазарів та інших об'єктів дозволяють досліджувати не лише окремі джерела, а й статистичні властивості цілих популяцій.
- **Відкритість та повторюваність результатів:** Дані та код доступні для перевірки та використання іншими дослідниками, що стимулює наукову відкритість та співпрацю.
- **Синергія з іншими даними:** Легкість крос-ідентифікації з іншими оглядами та архівами створює умови для багатоаспектних досліджень.
- **Перспективи для машинного навчання та інтелектуального аналізу даних:** Величезний обсяг даних SDSS-III та структуровані каталоги становлять відмінну базу для застосування сучасних методів машинного навчання, які дозволяють автоматично класифікувати об'єкти, шукати аномалії та виявляти приховані кореляції [31].

Таким чином, база даних *SDSS-III*, разом із інструментами доступу та методами інтеграції з іншими джерелами інформації, надає дослідникам унікальні можливості для фундаментальних та прикладних астрономічних досліджень. Це стосується не лише квазарів, але й широкого спектра астрофізичних об'єктів та явищ, що робить *SDSS-III* одним із наріжних каменів сучасної спостережної астрономії.

РОЗДІЛ II. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗАРІВ

2.1. Вибір та підготовка вибірки квазарів. Критерії відбору квазарів з бази даних SDSS-III. Мотивація та завдання відбору. Для дослідження фотометричних характеристик квазарів важливо сформувати репрезентативну та якісну вибірку об'єктів з бази даних *Sloan Digital Sky Survey (SDSS-III)* [32]. Враховуючи величезний обсяг даних та різноманітність об'єктів, необхідно розробити чіткі критерії відбору, що забезпечать високу чистоту (мінімум домішок не-квазарів), повноту (максимальне охоплення істинних квазарів) та якість (надійність фотометричних і спектроскопічних вимірювань) вибірки [23].

Основними критеріями відбору є:

1. *Спектроскопічна класифікація об'єкта як квазара.* Використовується параметр *class = 'QSO'* у таблиці *SpecObj* бази даних SDSS. Така класифікація заснована на аналізі спектральних характеристик, зокрема присутності широких емісійних ліній та характерного континууму, що гарантує високу надійність ідентифікації [33].

2. *Діапазон червоних зміщень $0 < z \leq 5$.* Включення квазарів з червоними зміщеннями від низьких (z_0) до високих (z_5) дозволяє дослідити еволюційні аспекти їх фотометричних властивостей у різних космологічних епохах [5; 27]. Такий широкий діапазон забезпечує можливість аналізу змін у кольорових індексах із плином космічного часу.

3. *Якість спектроскопічних та фотометричних даних*

- Співвідношення сигнал/шум (S/N): Відбір об'єктів із $S/N > 10$ у спектральному діапазоні гарантує надійність визначення червоного зміщення та характеристик спектральних ліній [34].

- Обмеження на фотометричні помилки: Наприклад, $\sigma_m < 0.1m$ для кожного фільтра. Це забезпечує точне визначення зоряних величин і, відповідно, кольорових індексів.

4. *Корекція за міжзоряне поглинання.* Об'єкти з високим значенням галактичної екстинкції можуть мати спотворені фотометричні характеристики.

Тому застосовується обмеження екстинкції у фільтрі *r*: *extinction_r* < 0.1. Це мінімізує вплив пилу та газу в Чумацькому Шляху на величини квазарів [35].

5. *Фотометрична повнота*. Наявність вимірювань зоряних величин у всіх п'яти фільтрах (u, g, r, i, z) критично важлива для розрахунку кольорових індексів та побудови кольорових діаграм. Повнота у всіх фільтрах підвищує якість та інформативність фотометричного аналізу [36].

Процедура відбору:

1. Формулювання SQL-запиту до бази даних SDSS через інтерфейс *CasJobs* або *SkyServer*. Приклад запиту:

```
SELECT
  s.specObjID, s.ra, s.dec,
  p.u, p.g, p.r, p.i, p.z,
  s.z AS redshift, s.snMedian_r AS snMedian,
  p.extinction_u, p.extinction_g, p.extinction_r, p.extinction_i, p.extinction_z
FROM
  SpecObj AS s
  JOIN PhotoObjAll AS p ON s.bestObjID = p.objID
WHERE
  s.class = 'QSO'
  AND s.z BETWEEN 0 AND 5
  AND s.snMedian_r > 10
  AND p.extinction_r < 0.1
  AND p.u BETWEEN 14 AND 22
  AND p.g BETWEEN 14 AND 22
  AND p.r BETWEEN 14 AND 22
  AND p.i BETWEEN 14 AND 22
  AND p.z BETWEEN 14 AND 22;
```

Пояснення запиту:

- З'єднання таблиць таблиці *SpecObj* та *PhotoObj* за допомогою *bestObjID* та *objID* для отримання спектроскопічних та фотометричних даних.
- Відбір здійснюється за класом об'єкта (*class* = 'QSO'), діапазоном *z* та якістю даних (*S/N*, *extinction_r*).

- Діапазон зоряних величин: відбираємо об'єкти з зоряними величинами в межах $14^m \leq m \leq 22^m$ у всіх фільтрах, щоб уникнути насичення надто яскравих об'єктів та великої шумності для надто слабких.

2. Завантаження та перевірка даних

- Завантажуємо результати запиту та перевіряємо їх на відповідність критеріям.
- Проводимо початковий аналіз розподілу даних для виявлення можливих аномалій.

Обґрунтування вибору критеріїв

- Спектроскопічна класифікація гарантує високу точність ідентифікації квазарів.
- Діапазон червоних зміщень забезпечує можливість вивчення еволюції квазарів у різних космологічних епохах.
- Контроль за якістю спектроскопічних та фотометричних даних дозволяє мінімізувати систематичні та статистичні похибки, а також підвищити надійність подальших висновків.
- Врахування міжзоряного поглинання та забезпечення повноти фотометрії у всіх п'яти фільтрах є критичним для коректного аналізу кольорових характеристик.

Обробка та очищення даних від шумів та артефактів. Необхідність очищення даних. Після первинного відбору квазарів за визначеними критеріями у вибірці можуть залишатися шумові дані, артефакти та об'єкти з некоректно виміряними параметрами. Такі дані здатні викривити статистичний аналіз, знизити точність оцінок фотометричних характеристик та систематично змішувати отримані результати [34]. Тому важливо провести ретельне очищення та попередню обробку вибірки перед подальшим аналізом.

Основні етапи обробки даних

1. Перевірка на відсутні та аномальні значення. Видаляються записи з відсутніми зоряними величинами або іншими критично важливими параметрами (наприклад, браком даних у певному фільтрі). Виявлення та виключення об'єктів

з нереалістичними значеннями зоряних величин, кольорових індексів або екстремально великими похибками. Наприклад, квазари з дуже яскравими значеннями поза очікуваним діапазоном можуть бути дефектами зображень або результатом випадкових інструментальних помилок.

2. Корекція за міжзоряне поглинання. Для коректного відтворення спектрального енергетичного розподілу застосовується поправка на галактичну екстинкцію за моделями

$$m_{\text{corr},\lambda} = m_{\text{obs},\lambda} - A_{\lambda} \quad (2.1)$$

Де:

$m_{\text{corr},\lambda}$ — скоригована зоряна величина;

$m_{\text{obs},\lambda}$ — спостережувана зоряна величина;

A_{λ} — екстинкція (поглинання) для відповідного фільтра.

3. Видалення повторюваних записів. Перевіряємо на наявність повторюваних об'єктів та залишаємо один запис з найкращими даними, що унеможливорює подвійну вагу одного і того ж квазара у статистичних розрахунках.

4. Виявлення викидів. Застосовуються статистичні методи для ідентифікації викидів, такі як фільтрація за межами 3σ від середнього значення або використання методів машинного навчання (наприклад, Isolation Forest, DBSCAN) для виявлення аномалій [38]. Візуалізація у вигляді гістограм, діаграм розсіювання кольорових індексів або двовимірних щільнісних мап дозволяє ідентифікувати групи об'єктів, що значно відрізняються від основної популяції. Такі об'єкти можуть бути не-квазарами, сильно зачепленими артефактами вимірювань, або рідкісними типами квазароподібних джерел.

Інструменти для обробки даних. *Програмне забезпечення:* використання мов програмування та бібліотек, розроблених спеціально для астрономічних даних, є стандартним підходом. *Python* з бібліотеками *Pandas*, *NumPy*, *AstroPy* [39] надає широкий функціонал для читання каталогів, фільтрації та статистичної обробки.

Візуалізація: для побудови графіків і виявлення аномалій широко застосовуються бібліотеки *Matplotlib* [40] та *Seaborn*, які дозволяють швидко створювати гістограми, діаграми розсіювання, contour-плоти тощо. Це спрощує інтерактивний аналіз та прийняття рішень щодо подальшого очищення.

Приклад виявлення аномалій. На рисунку 2.1 представлено гістограму розподілу зоряних величин у фільтрі r . Аномальні піки або довгі "хвости" можуть свідчити про наявність артефактів або унікальних характеристик об'єктів.

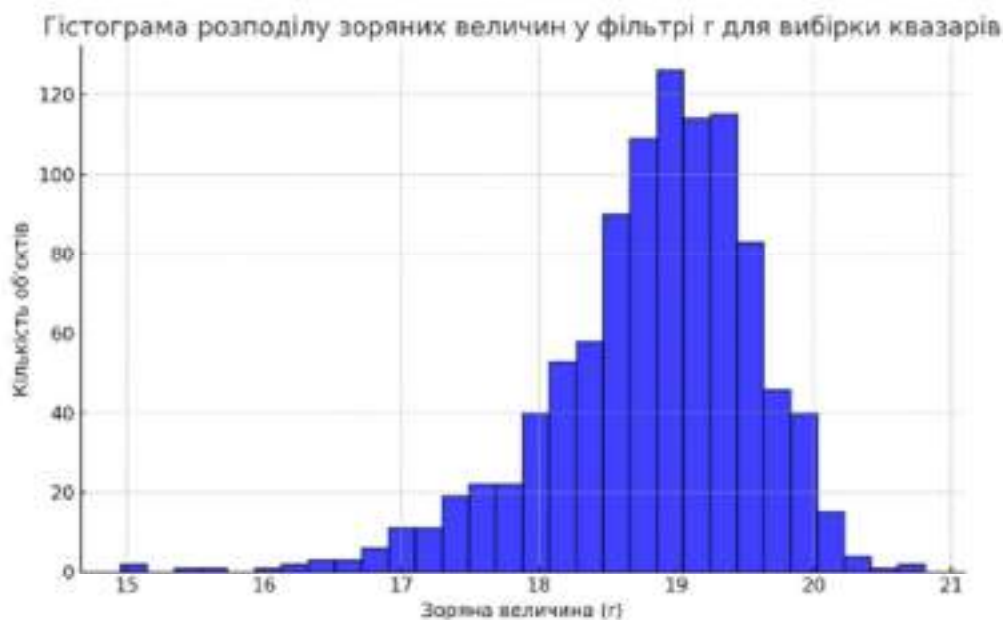


Рисунок 2.1. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі r для вибірки квазарів.

Діаграма розсіювання кольорових індексів. Побудова діаграми $(u-g)$ та $(g-r)$ допомагає виявити об'єкти, що відхиляються від основної послідовності.

Гістограма показує, що кольоровий індекс $u-g$ для більшості об'єктів має середнє значення 0.38 із мінімумом близько -0.54 і максимумом 3.03. Кольоровий індекс $g-r$ має середнє значення 0.23 і максимум 1.35. Аномальні точки (велике або мале значення) можуть свідчити про об'єкти, що відхиляються від основної послідовності.

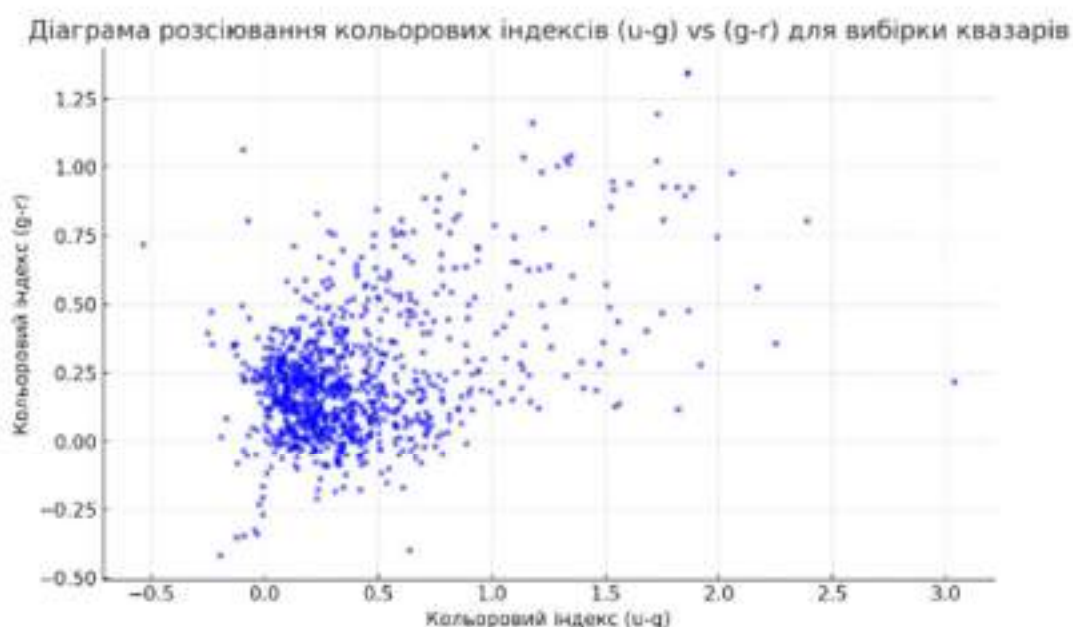


Рисунок 2.2. Діаграма розсіювання кольорових індексів квазарів для невеликої вибірки

Важливість очищення даних. *Підвищення якості аналізу:* очищення даних від шумів та артефактів сприяє отриманню більш надійних статистичних висновків, а також мінімізує ризик неправильного трактування результатів.

Зменшення систематичних похибок: очищені дані допомагають уникнути систематичних спотворень, пов'язаних із некоректними вимірюваннями, поганою фотометрією чи проблемами з калібруванням. Це надзвичайно важливо при пошуку тонких залежностей та кореляцій між фотометричними характеристиками й червоним зміщенням квазарів.

Врахування систематичних похибок та невизначеностей. Вивчення фотометричних характеристик квазарів вимагає не лише ретельного відбору та очищення даних, але й врахування різних джерел похибок та невизначеностей. Коректний облік систематичних та випадкових помилок є критичним для досягнення достовірних наукових висновків. Нехтування цим аспектом може призвести до неправильних інтерпретацій та систематичних зміщень у результатах [34]. Джерела похибок:

1. *Фотометричні помилки.* Виникають через інструментальні обмеження, неточності калібрування, атмосферні флуктуації, ефекти витримки

та фонового світла. Навіть при високій якості даних завжди існують випадкові та систематичні складові похибок зоряних величин [41]. Для квазарів особливо важливим є точний вимір слабких об'єктів, оскільки мала похибка у фотометрії дозволяє більш надійно визначити кольори та спектральний енергетичний розподіл.

2. *Міжзоряне поглинання.* Неповна або некоректна корекція за екстинкцію зумовлена невизначеністю в картах пилу та моделях міжзоряного середовища [35]. Ця помилка може систематично зміщувати зоряні величини та кольори, особливо в ультрафіолетовій та синій частині спектра.

3. *Змінність квазарів (варіабельність).* Квазари відомі своєю фотометричною варіабельністю на різних часових шкалах — від днів до років [42]. Якщо фотометричні спостереження у різних фільтрах чи епохах проводилися неодноразово, змінність об'єкта може спотворити кольорові індекси, іноді імітуючи спектральні особливості, яких насправді немає.

4. *Невизначеність у визначенні червоного зміщення:* Навіть спектроскопічно виміряне червоне відхилення z може мати певний рівень похибки, пов'язаний з якістю спектру, роздільною здатністю та шумами [43]. Якщо ці похибки не враховувати, то аналіз залежностей кольорів від z може дати оманливі результати.

Методи врахування похибок

1. *Аналіз помилок вимірювань.* Значення фотометричних похибок використовуються для оцінки невизначеностей у кольорових індексах:

$$\sigma_{(m_1-m_2)} = \sqrt{\sigma_{m_1}^2 + \sigma_{m_2}^2} \quad (2.2)$$

Це дозволяє встановити достовірні інтервали невизначеностей і розуміти ступінь впевненості у кожному вимірюванні.

2. *Зважена регресія.* При побудові емпіричних залежностей (наприклад, між кольоровими індексами та z) корисно застосувати зважені методи регресії, де вага кожного об'єкта обернено пропорційна квадрату його похибки. Такий підхід мінімізує вплив об'єктів із великими невизначеностями.

3. *Перевірка на статистичні зміщення:*

- Аналіз середніх значень та медіан, порівняння з еталонними зразками (наприклад, квазарами зі спеціально відібраних каталогів) допомагає виявити систематичні відхилення.

- Дослідження залишків моделей (наприклад, регресії кольору від z) може вказати на залежності, що вказують на невраховані систематичні похибки.

4. *Корекція за варіабельність:*

- Використання багатократних спостережень в різні епохи дозволяє оцінити амплітуду та характер фотометричних змін квазара.

- Обмеження вибірки об'єктами з відомою стабільністю яскравості протягом певного періоду спостережень зменшує вплив варіабельності на аналіз кольорових характеристик [42].

Важливість врахування похибок

1. *Достовірність результатів.* Коректний облік похибок забезпечує надійність висновків про фізичні властивості квазарів, їх еволюцію та фотометричні характеристики. Без належної оцінки невизначеностей результати можуть бути статистично нестійкими.

2. *Статистична значущість.* Оцінка невизначеностей дозволяє визначити, наскільки отримані результати перевищують рівень випадкових флуктуацій. Це має особливе значення при виявленні слабких кореляцій або при тестуванні моделей фотометричного redshift-оцінювання, де навіть невеликі зсуви можуть призвести до суттєвих помилок у космологічних висновках [44].

2.2. Фотометричний аналіз квазарів. Визначення зоряних величин у різних фільтрах (u, g, r, i, z). Фотометрична система SDSS

Sloan Digital Sky Survey (SDSS) використовує п'ять широкосмугових фільтрів: u, g, r, i, z , які оптимізовані для отримання однорідних та високоякісних фотометричних даних об'єктів у широкому спектральному діапазоні — від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного [5; 45]. Ця система розроблена таким чином, щоб мінімізувати лінійні перекриття між фільтрами та забезпечити стабільність калібрування у великих масштабах, що є критично важливим для виявлення тонких фотометричних особливостей квазарів.

Методи вимірювання зоряних величин. Для фотометричного аналізу квазарів зазвичай застосовуються декілька типів вимірювань зоряних величин, кожен із яких має свої переваги та обмеження [34; 46]:

1. *PSF-фотометрія (psfMag).* Цей метод використовує модель профілю точкового розсіяння (PSF) інструмента для оцінки інтегральної яскравості об'єкта. PSF-фотометрія є особливо корисною для точкоподібних джерел, таких як далекі квазари, оскільки враховує форму зображення об'єкта, зумовлену оптикою телескопа та атмосферним "розмиттям" зображення [47]. Вимірювання psfMag зазвичай мають найменші статистичні похибки для об'єктів, що не розділені на компоненти.

2. *Модельна фотометрія (modelMag).* Зоряні величини modelMag отримують шляхом підбору до профілю об'єкта модельних функцій розподілу яскравості (наприклад, де Вокулера або експоненційний профіль) та зважування їх PSF. Такий підхід особливо корисний для об'єктів, які можуть мати деяке просторове розширення або не є ідеальними точковими джерелами. Для квазарів, зазвичай точкоподібних, різниця між psfMag і modelMag невелика, але аналіз цих різниць може вказати на можливо присутні галактичні складові або артефакти.

3. *Апертура (apertureMag).* Апертурна фотометрія вимірює загальну яскравість у заданому радіусі апертури. Вона менш чутлива до детальних профілів яскравості, але залежить від вибору розміру апертури та рівня фонового шуму. Хоча для квазарів апертурні величини зазвичай менш точні, вони можуть бути корисними для перевірки стабільності результатів, отриманих іншими методами.

Корекція за атмосферне поглинання та інструментальні ефекти. Зоряні величини в SDSS коригуються за атмосферне поглинання за допомогою стандартних зірок-порівнянь, які спостерігаються одночасно з науковими об'єктами. Атмосфера землі вносить додаткове послаблення світла, особливо у синьому та ультрафіолетовому діапазонах (фільтри *u*, *g*), а її прозорість може варіюватися в часі. Систематичне калібрування (відоме як "*UberCal*") дозволяє

зменшити варіації між полями спостережень і забезпечити майже однорідну фотометричну шкалу по всьому небу [41].

На зоряні величини також впливають інструментальні ефекти, такі як нелінійність детекторів, ефект засвічення яскравими об'єктами та дрейфи фотометричної нульової точки з часом. У *SDSS* ці систематичні ефекти ретельно контролюються та мінімізуються за допомогою стабільних процедур калібрування та програмної обробки даних, що забезпечує надійну фотометричну точність для подальшого аналізу квазарів [34].

Корекція за міжзоряне поглинання. Світло від далеких квазарів проходить крізь міжзоряний простір Чумацького Шляху, де наявний пил спричиняє екстинкцію — послаблення та червоніння світла об'єкта. Для отримання "істинних" зоряних величин необхідно застосувати поправки за екстинкцію за допомогою моделей розподілу пилу [35; 37]. Для квазарів така корекція особливо важлива, оскільки навіть невелике зміщення кольору може призвести до помилкової інтерпретації спектрального енергетичного розподілу.

Приклад даних та точність вимірювань. Для проведення корекції зоряних величин спостережуваних даних враховуються значення екстинкції для кожного фільтра. Нижче наведено приклад коригування зоряних величин на основі формули (2.1):

Таблиця 2.1

Вихідні дані (приклад одного об'єкта квазара)

Параметр	Значення	Параметр	Значення
specObjID	7220538045883504640	redshift	0.6876317
ra	166.97161	snMedian	11.09877
dec	25.70744	extinction_u (A_u)	0.0777958
$u (m_{\text{obs},u})$	20.03933	extinction_g (A_g)	0.06061796
$g (m_{\text{obs},g})$	19.48282	extinction_r (A_r)	0.04193523
$r (m_{\text{obs},r})$	19.50253	extinction_i (A_i)	0.03116237
$i (m_{\text{obs},i})$	19.55515	extinction_z (A_z)	0.02317908
$z (m_{\text{obs},z})$	19.47433		

Розрахунок скоригованих величин (дані наведено в таблиці 2.2):

- Для фільтра u : $m_{\text{corr},u} = 20.03933 - 0.0777958 \approx 19.9615$

- Для фільтра g : $m_{\text{corr},g} = 19.48282 - 0.06061796 \approx 19.4222$
- Для фільтра r : $m_{\text{corr},r} = 19.50253 - 0.04193523 \approx 19.4606$
- Для фільтра i : $m_{\text{corr},i} = 19.55515 - 0.03116237 \approx 19.5240$
- Для фільтра z : $m_{\text{corr},z} = 19.47433 - 0.02317908 \approx 19.4512$

Таблиця 2.2

Скориговані зоряні величини об'єкта

specObjID	u_{corr}	g_{corr}	r_{corr}	i_{corr}	z_{corr}
7220538045883504640	19.961	19.422	19.461	19.524	19.451

Метод корекції зоряних величин з використанням значень екстинкції дозволяє отримати більш точні фотометричні дані, що важливо для аналізу об'єктів у галактичному і позагалактичному масштабах. Дані, скориговані за міжзоряним поглинанням, знижують систематичні похибки, спричинені впливом міжзоряного середовища

Кольорові індекси та їх фізичний зміст. Визначення кольорових індексів. Кольоровий індекс — це різниця між зоряними величинами об'єкта, виміряними у двох різних фотометричних фільтрах. Для коректного порівняння важливо використовувати уже скориговані величини (m_{corr}), де враховано міжзоряне поглинання та інші систематичні ефекти:

$$(m_1 - m_2) = m_{\text{corr},1} - m_{\text{corr},2} \quad (2.3)$$

Кольорові індекси дають змогу охарактеризувати спектральний енергетичний розподіл об'єкта, навіть коли спектроскопічні дані відсутні або обмежені за якістю.

Основні кольорові індекси в системі SDSS

Система SDSS надає п'ять фільтрів (u , g , r , i , z), тому найчастіше аналізують такі комбінації кольорів:

1. **($u-g$):** Чутливий до ультрафіолетового випромінювання. Відображає наявність гарячих компонентів у спектрі, а також вплив ліній високої іонізації, зокрема Ly α для далеких квазарів [9]. Менші значення ($u-g$) свідчать про більш

"синій" спектр, що може бути ознакою активного акреційного диску чи малої кількості пилу.

2. **($g-r$):** Відображає нахил спектра в оптичному діапазоні. Використовується для класифікації об'єктів і відокремлення квазарів від зір та галактик. Зі зростанням червоного зміщення (z) важливі емісійні лінії та безперервний спектр зміщуються у червонішу область, що призводить до збільшення ($g-r$).

3. **($r-i$) та ($i-z$):** Чутливі до спектральних особливостей у червоній та ближній інфрачервоній ділянках. Допомагають виявляти зміни у спектрі, пов'язані з виникненням та зсувом сильних емісійних ліній, наприклад $MgII$ або CIV , та континууму, який зміщується в інфрачервону область на великих z . Квазари з високими z (наприклад, $z > 3$) можуть проявляти характерні особливості саме в цих індексах, оскільки ультрафіолетові емісійні лінії переходять до червоного та інфрачервоного діапазону.

Фізичний зміст кольорових індексів для квазарів

Квазари є далекими активними ядрами галактик, у центрах яких розташовані надмасивні чорні діри, оточені акреційними дисками та газовими хмарами високої іонізації [1]. Їхній спектр характеризується інтенсивним континуумом, що походить від акреційного диску, та сильними широкими емісійними лініями. Вплив основних чинників на кольорові індекси квазарів та їхній фізичний зміст такий:

1. **Червоне зміщення (z).** Зі збільшенням z максимум спектральної енергодистрибуції та емісійні лінії зміщуються до довших хвиль. Це означає, що фільтри, які раніше фіксували ультрафіолетове випромінювання та гарячі компоненти, тепер реєструватимуть випромінювання, яке раніше було на більш синіх довжинах хвиль [5; 9]. Наприклад, зростання ($g-r$) зі збільшенням z відображає поступове "почервоніння" спектра, оскільки ультрафіолетова та синя частини континууму виходять за межі фільтра g .

2. **Емісійні лінії.** Сильні емісійні лінії ($Ly\alpha$, CIV , $MgII$ та інші) можуть значно впливати на зоряні величини в певних фільтрах. Якщо сильна лінія

потрапляє у діапазон пропускання фільтра u чи g , це може знизити $(u-g)$, роблячи об'єкт "синішим". У той же час, зміщення цих ліній у червоніші фільтри (r, i, z) призводить до змін кольорів у відповідних індексах [48].

3. *Міжзоряне поглинання та пил.* Хоча корекція за екстинкцію вже застосована до зоряних величин, залишкові ефекти або внутрішньогалактичний пил (у галактиці-хазяїні квазара) можуть вплинути на кольори, роблячи спектр "червонішим". Такі впливи важливі при інтерпретації кольорових індексів, оскільки вони можуть імітувати підвищений z або зміну спектрального нахилу континууму [49].

4. *Акреційний диск та середовище ядра.* Кольорові індекси відображають фізичні умови в акреційному диску та оточуючих областях. Наприклад, "синіший" спектр (менші $(u-g)$) може вказувати на потужний акреційний диск із високою частотою випромінювання у ультрафіолеті, тоді як "червоніший" спектр може свідчити про нижчу ефективність акреції або вплив пилу [50].

Інтерпретація кольорових індексів у контексті еволюції квазарів
Кольорові індекси дозволяють, хоча й опосередковано, простежити еволюцію квазарів:

- На ранніх етапах (низький z) квазари часто мають більш "синій" спектр, вказуючи на сильну акрецію.
- Зі збільшенням z характер випромінювання змінюється, і це відображається у кольорах, які поступово "червоніють" через космологічне зміщення та фізичні умови в акреційному диску [6].

Таким чином, аналіз кольорових індексів — це ключовий інструмент для вивчення фізичних властивостей квазарів, їх еволюційних станів та об'єктивної класифікації за допомогою фотометричних даних.

Побудова кольорових діаграм для квазарів. Мета кольорових діаграм. Кольорові діаграми — це візуалізація розподілу об'єктів у просторі кольорових індексів. Вони дають змогу:

- *Класифікація об'єктів.* Шляхом проєкції об'єктів у просторі кольорів (наприклад, $(u-g)$ проти $(g-r)$) можна відокремити квазари від зір та галактик. Зазвичай, зорі й галактики утворюють відносно компактні та стабільні "смуги" чи "скупчення" на таких діаграмах, тоді як квазари, особливо на певних діапазонах червоного зміщення, займають інші, характерні області [23].

- *Виявлення трендів та еволюції.* Розглядаючи залежності між кольоровими індексами, можна виявити тенденції, пов'язані з червоним зміщенням, віком Всесвіту, фізичними параметрами акреційного диску квазара, вмістом пилу та іншими чинниками

Методика побудови діаграм

1. *Обчислення кольорових індексів.* Після корекції за екстинкцію та врахування похибок кожен об'єкт отримує набір скоригованих зоряних величин. З них обчислюють кольорові індекси.

2. *Вибір осей діаграми.* Часто осі обирають так, щоб вони були чутливі до певних спектральних особливостей. Наприклад,

- По осі x — $(g-r)$, яка добре відображає зсув континууму у видимому діапазоні,
- По осі y — $(u-g)$, яка чутлива до ультрафіолетової частини спектра та присутності емісійних ліній.

Інші комбінації (наприклад, $(r-i)$ проти $(i-z)$) допомагають краще виявляти об'єкти на високих червоних зміщеннях.

3. *Візуалізація та аналіз.* Класичний підхід — побудова діаграми розсіювання, де кожна точка відповідає одному об'єкту (квазару). Однак, для великих вибірок корисно застосовувати:

- Контурні діаграми щільності для виявлення основних скупчень.
- 2D-гістограми та теплові карти для кількісної оцінки розподілу об'єктів.
- Методи машинного навчання (PCA, t-SNE, UMAP) для виявлення нестандартних підструктур і поділу на кластери.

Використання кольорових діаграм

1. *Відбір кандидатів у квазари.* Кольорові діаграми дозволяють сформулювати фотометричні критерії для відбору квазароподібних кандидатів. Це особливо корисно для попереднього відбору об'єктів для спектроскопічних спостережень, коли отримання спектрів для всієї вибірки недоцільне.

2. *Дослідження еволюції.* Аналіз змін кольорів зі зростанням z дає змогу простежити, як змінюється спектральний енергетичний розподіл квазарів у різні космологічні епохи. Вивчення розподілу квазарів на кольорових діаграмах у функції червоного зміщення дозволяє отримати важливу інформацію про еволюцію надмасивних чорних дір та їхніх живильних середовищ [44].

Таким чином, кольорові діаграми — це потужний інструмент для візуалізації, класифікації та інтерпретації фотометричних властивостей квазарів. Їх використання сприяє кращому розумінню фізики цих об'єктів, оптимізації відбору кандидатів для майбутніх досліджень та вивченню космологічної еволюції активних ядер галактик.

2.3. Взаємозв'язок фотометричних характеристик та червоного зміщення

Аналіз залежності кольору від червоного зміщення. Мета аналізу. Основною метою є виявлення закономірностей між кольоровими індексами квазарів та їхнім червоним зміщенням (z). Такий аналіз дозволяє:

- Визначити, як змінюються фотометричні характеристики квазарів із віддаленістю та епохою спостереження у Всесвіті.
- Розробити емпіричні та напівемпіричні моделі, які дадуть змогу оцінювати "фотометричні" червоні зміщення (z_{phot}), використовуючи лише інформацію про кольорові індекси [9].
- Допомогти у великих оглядах, де спектроскопічні дані не завжди доступні, але потрібна попередня оцінка z для статистичного аналізу великої кількості об'єктів [51].

Процедура аналізу

1. Підготовка даних.

- Використання вибірки квазарів, для яких наявні надійні спектроскопічні червоні зміщення (z_{spec}) з каталогів SDSS.

- Обчислення кольорових індексів $(u-g)$, $(g-r)$, $(r-i)$, $(i-z)$ для кожного квазара після корекції зоряних величин за міжзоряне поглинання та ретельного врахування фотометричних похибок.

- Можлива попередня сегментація вибірки за якістю даних (наприклад, видалення об'єктів з великими фотометричними похибками або сумнівними спектроскопічними z).

2. Побудова графіків та візуалізація.

- Створення двовимірних діаграм (наприклад, $(u-g)$ та z або $(g-r)$ та z), де кожна точка відповідає одному квазару.

- Використання контурних діаграм щільності чи медіанних кривих для кількісного опису тенденцій.

- Застосування згладжуючих сплайнів або локальної лінійної регресії (*LOESS*) для підкреслення загального тренду й приглушення впливу викидів.

3. Аналіз трендів та виявлення особливостей.

- Визначення "опорних точок" або інтервалів z , де залежність кольору від z зазнає переломів або різких змін.

- Ідентифікація областей, де визначені емісійні лінії (*Ly α* , *CIV*, *MgII*, *Balmer* лінії) переходять із одного фільтра в інший, змінюючи відношення кольорових індексів.

- Аналіз розсіювання точок навколо середнього тренду для оцінки невизначеностей та систематичних відхилень. Особливий інтерес становлять об'єкти, які не вписуються у загальний тренд, оскільки вони можуть вказувати на незвичайні спектральні характеристики або сильний вплив пилу.

Фізичне трактування результатів

Виявлені залежності дозволяють:

- Зрозуміти вплив космологічного червоного зміщення на розподіл енергії в спектрі квазара. Чим більший z , тим більш у червону та інфрачервону області переносяться ультрафіолетові та оптичні спектральні лінії.

- Оцінити зміни властивостей акреційного диску та оточуючого середовища квазарів у різних космологічних епохах: зв'язок між кольорами та z може відображати еволюцію інтенсивності випромінювання у різних спектральних ділянках.

Практична користь. Окрім суто наукового інтересу, подібний аналіз корисний для:

- Розробки емпіричних методів фотометричного визначення z (z_{phot}), що широко використовується у великих оглядах, де спектроскопія доступна лише для відносно малої частки об'єктів.
- Оптимізації стратегії відбору кандидатів у квазари за фотометричними критеріями, що дозволяє ефективніше планувати спектроскопічні дослідження.
- Підготовки до майбутніх телескопів та оглядів (наприклад, Rubin Observatory LSST, Euclid), де точні фотометричні методи будуть критично важливими для аналізу мільйонів квазарів [42; 52].

Математичне моделювання отриманих залежностей. Після виявлення емпіричних трендів між фотометричними характеристиками (кольоровими індексами) та червоним зміщенням (z) корисно побудувати математичні моделі, які б дозволили передбачити характер залежностей, оцінити параметри і оцінити фотометричні червоні зміщення з мінімальними похибками.

Методи моделювання

Лінійна регресія: найпростіший підхід, коли припускається, що залежність між кольором (наприклад, $g - r$) та z є приблизно лінійною:

$$(g - r) = az + b, \quad (2.4)$$

де a та b — невідомі коефіцієнти, що оцінюються за методом найменших квадратів. Лінійна модель може бути адекватною лише для обмеженого діапазону z або тоді, коли спектральні особливості не змінюють форму залежності суттєво.

Поліноміальна регресія: якщо залежність є більш складною, доцільно використати поліноми вищих степенів:

$$(g - r) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n. \quad (2.5)$$

Поліноміальні моделі можуть точніше описувати складні криволінійні залежності, проте ризикують перенавчитися, якщо ступінь полінома надто високий, або якщо дані містять випадковий шум.

Нелінійні моделі: У випадках, коли відомо, що залежність має експоненційну, логарифмічну чи іншу функціональну форму (наприклад, через присутність певних фізичних ефектів), застосовують відповідні нелінійні моделі:

$$(u - g) = a \ln(z) + b, \quad \text{або} \quad (g - r) = a e^{bz}. \quad (2.6)$$

Такий підхід вимагає попереднього фізичного обґрунтування або емпіричного підбору функціональної форми.

Методи машинного навчання: сучасні підходи (нейронні мережі, метод опорних векторів, дерева рішень, градієнтний бустинг) дозволяють побудувати моделі без чіткого припущення про форму функції. Вони здатні враховувати складні нелінійні залежності, взаємодії між кількома кольоровими індексами та додатковими параметрами (наприклад, яскравістю, наявністю пилу). Ці методи часто дають змогу суттєво підвищити точність прогнозування порівняно з простими регресійними моделями.

Приклад моделювання. Як приклад можна розглянути поліноміальну модель для залежності $g - r$ від z .

Поліноміальна модель третього ступеня для залежності $(g - r)$ від z має вигляд:

$$(g - r) = a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + b,$$

де: a_3 : коефіцієнт при z^3 , a_2 : коефіцієнт при z^2 , a_1 : коефіцієнт при z , b : вільний член.

Значення коефіцієнтів:

$$a_3 = -0.0136, \quad a_2 = 0.0684, \quad a_1 = -0.1332, \quad b = 0.3543.$$

Оцінка якості моделі. Коефіцієнт детермінації (R^2): **0.1797**. Модель пояснює близько **17.97%** варіацій у даних, що краще за лінійну модель ($R^2=0.0815$ на цих даних), та все ще дуже недостатньо для можливості

використання такої моделі. Тому варто розглядати іншу модель для даної вибірки, або проводити моделювання на обмеженішій ділянці z .

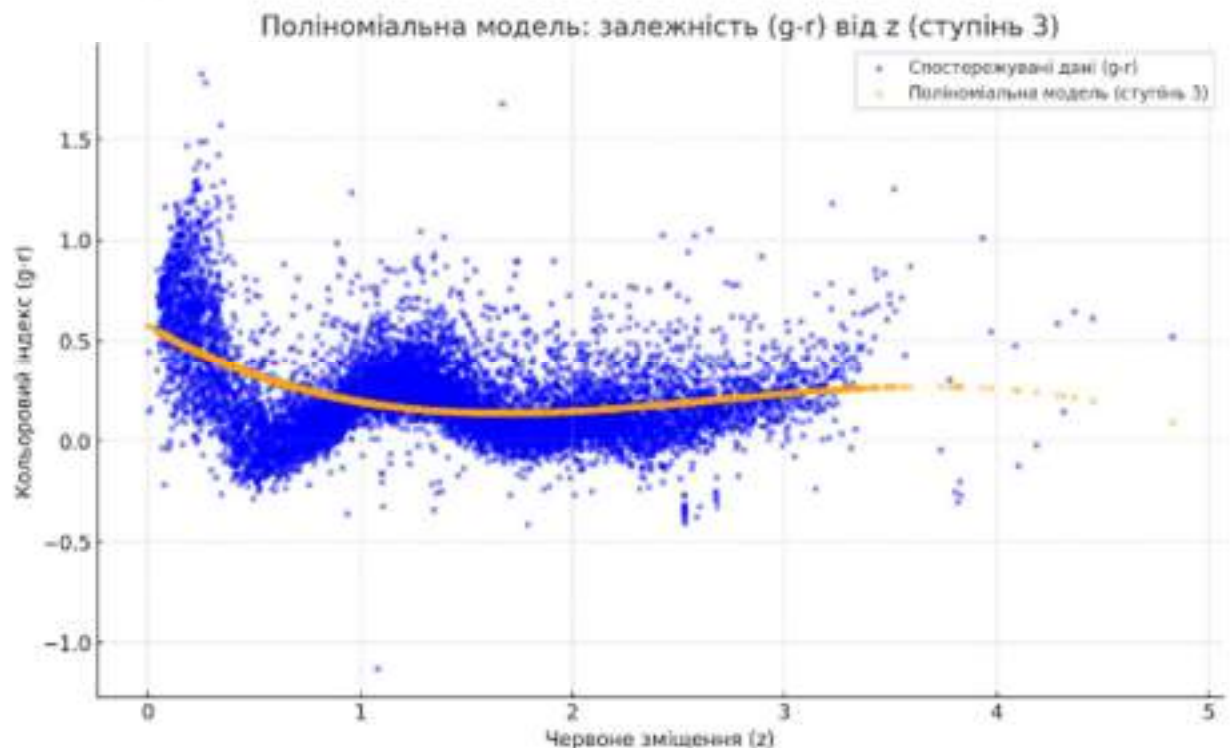


Рисунок 2.3. – Приклад моделювання залежності індексу $(g-r)$ від кольорового зміщення поліноміальною моделлю 3 ступеня

Використання фотометричних даних для оцінки червоного зміщення.

Одним із головних практичних застосувань моделей, побудованих на основі залежностей кольору від z , є оцінка фотометричних червоних зміщень (z_{phot}). Коли спектроскопічні спостереження недоступні або надто дорогі, фотометричні z дозволяють отримати наближені оцінки відстаней до квазарів та проаналізувати їх розподіл у просторі й часі.

Процедура оцінки фотометричного червоного зміщення

1. Застосування моделі. Для об'єкта з відомими кольоровими індексами (наприклад, $u-g$, $g-r$, $r-i$, $i-z$) підставляємо їх у побудовану модель (лінійну, поліноміальну чи машинно-навчальну). Модель повертає оцінку z_{phot} .
2. Врахування похибок. При оцінці z_{phot} потрібно враховувати невизначеності у вимірюванні зоряних величин. Стандартний підхід — передати цю невизначеність у модель як вагу або використати методи, що оцінюють

розподіл ймовірностей для z_{phot} . Так можна отримати не лише оцінку z_{phot} , а й інтервал довіри, наприклад, σ_z .

3. Валідація методу. Для перевірки точності методу використовують контрольну вибірку об'єктів, для яких відомі спектроскопічні z_{spec} . Порівнюючи z_{phot} з z_{spec} , можна обчислити середню похибку (базове зміщення), середньоквадратичне відхилення (RMS), частку "викидів" (outliers fraction) та інші метрики.

Переваги та обмеження. Переваги:

Дає змогу оцінити z для великої кількості об'єктів без дорогих спектроскопічних спостережень. Дозволяє суттєво розширити вибірку для статистичних досліджень великомасштабної структури Всесвіту, еволюції активних ядер галактик тощо.

Обмеження:

Менша точність порівняно зі спектроскопічними вимірами. В деяких випадках похибка в z_{phot} може бути значною. Дегенерації (випадки, коли різні поєднання кольорів можуть відповідати майже однаковому z) та систематичні зсуви у величинах, спричинені пилом, змінністю квазарів чи внутрішньогалактичними ефектами.

Перспективи розвитку. Покращення моделей: Використання складніших моделей машинного навчання (глибоких нейронних мереж, гаусівських процесів, випадкових лісів) може підвищити точність і стабільність оцінок. Додаткові дані: Інтеграція даних з інших оглядів (WISE, GALEX) та наступних поколінь телескопів (LSST, Euclid, JWST) дозволить зменшити невизначеності та розв'язати низку дегенераційних проблем.

Таким чином, оцінка фотометричних z базується на емпіричних залежностях кольорів від червоного зміщення та ретельному моделюванні цих залежностей. Хоча метод поки не може повністю замінити спектроскопію, він є надзвичайно корисним для попереднього відбору, статистичних досліджень та підготовки масштабних оглядів майбутнього покоління.

РОЗДІЛ III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Аналіз фотометричних характеристик вибраних квазарів

Розподіл зоряних величин та кольорових індексів

У цьому підрозділі представлені результати аналізу розподілу зоряних величин та кольорових індексів для вибраної вибірки з 10000 квазарів із бази даних **SDSS-III**. Після ретельного відбору та обробки даних (див. розділ 2) було отримано високоякісні фотометричні параметри для подальшого аналізу. Скориговані зоряні величини: Зоряні величини квазарів у фільтрах **u**, **g**, **r**, **i**, **z** були скориговані за міжзоряне поглинання згідно з моделлю [37] яка враховує вплив міжзоряного пилу на поглинання світла у різних діапазонах довжин хвиль. На рисунках 3.1–3.5 представлені гістограми розподілу зоряних величин у кожному з фільтрів:

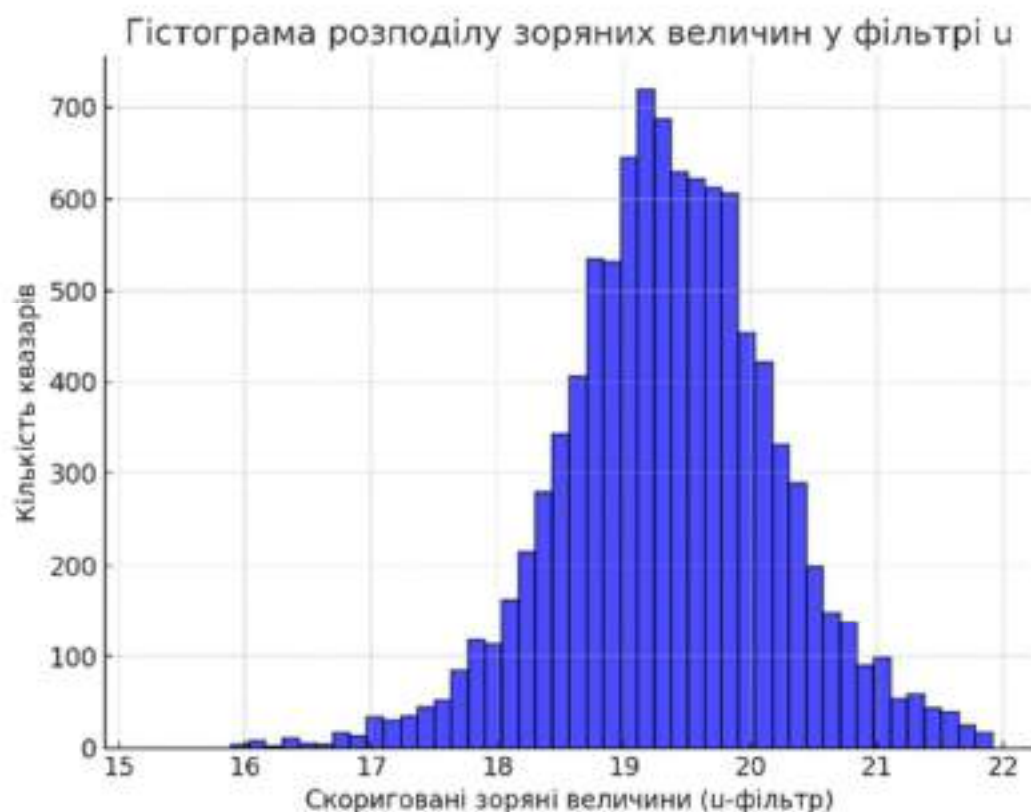


Рисунок 3.1. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі **u**.

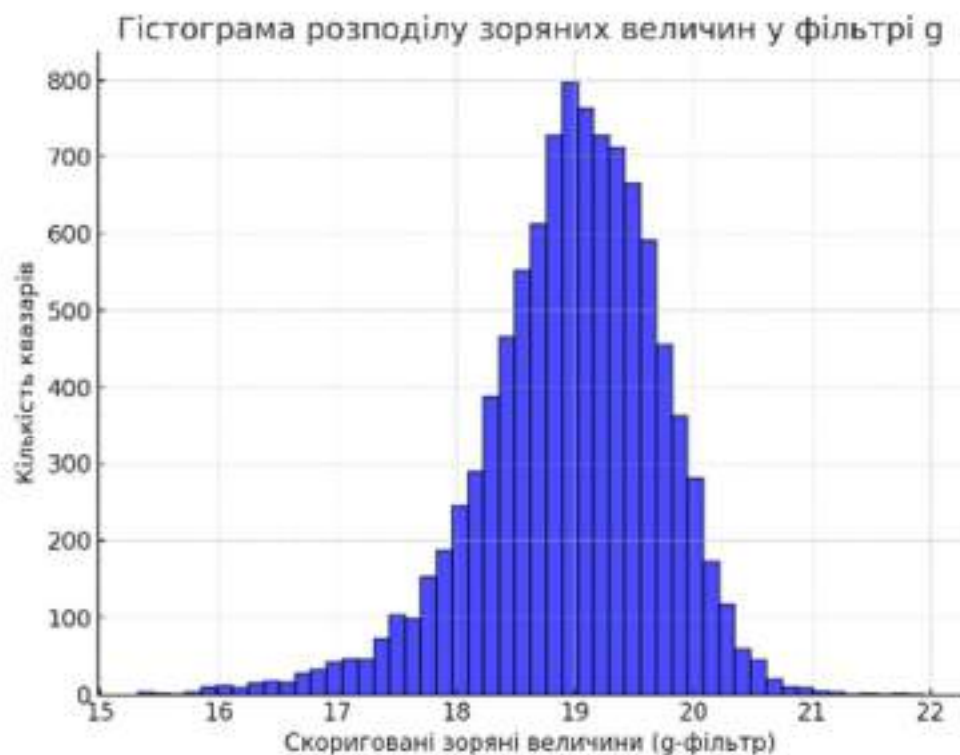


Рисунок 3.2. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі g.

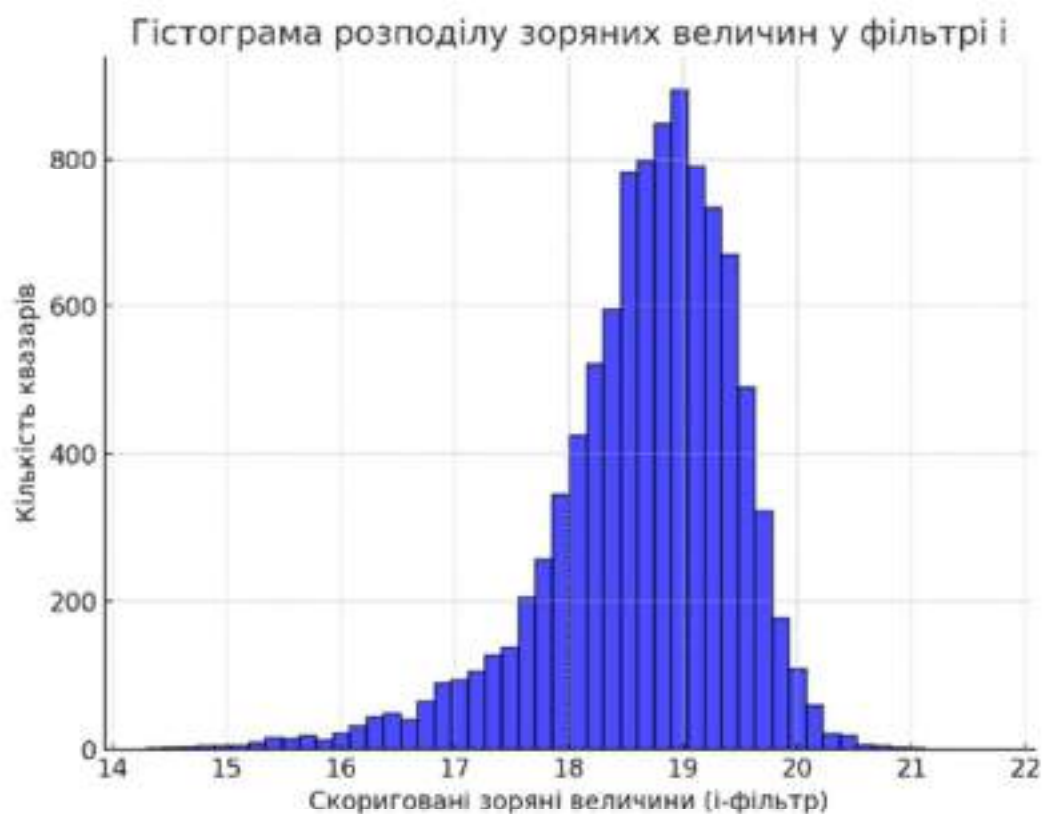


Рисунок 3.3. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі i.

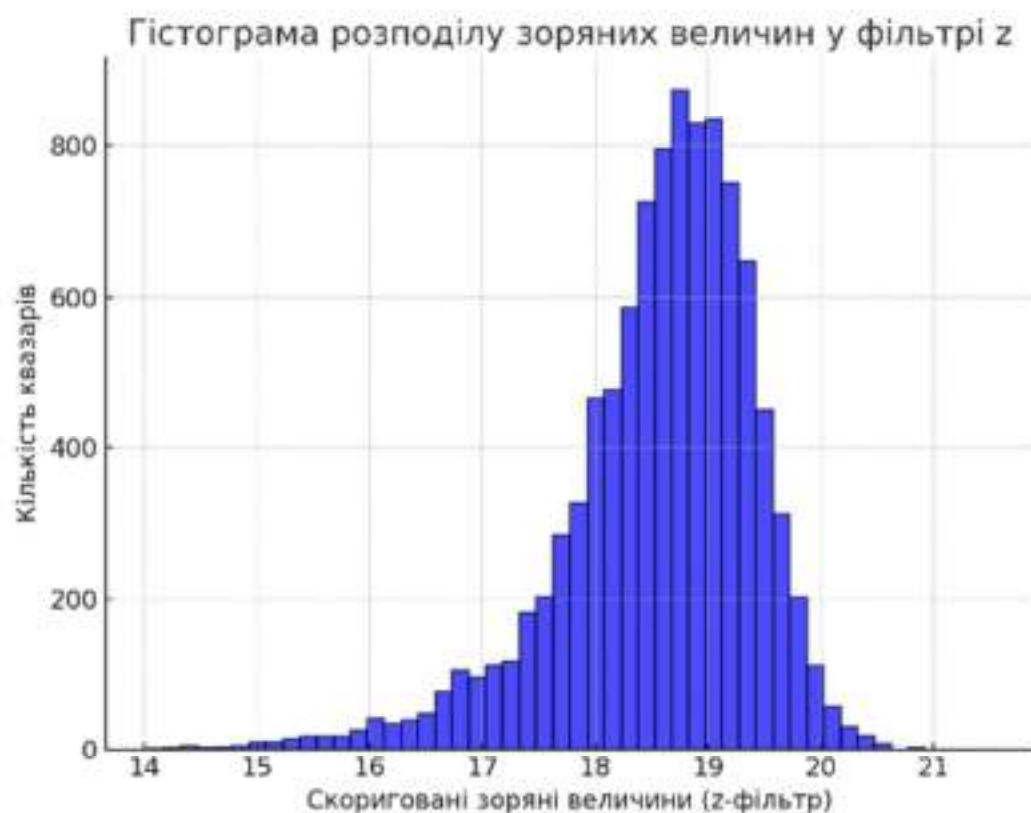
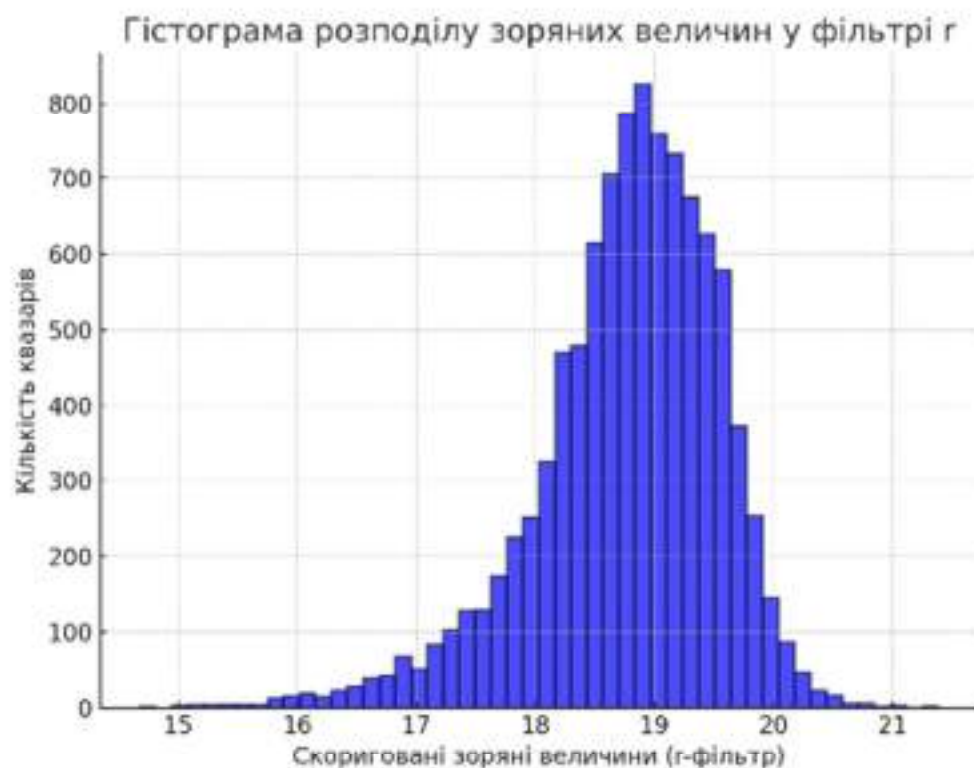


Рисунок 3.4. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі z.



Рисунок

3.5. Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі r.

Опис рисунків 3.1-3.5. Кожна гістограма показує кількість квазарів (по осі ординат) у певному діапазоні зоряних величин (по осі абсцис). аналіз побудованих гістограм розподілу зоряних величин для фільтрів **u**, **g**, **r**, **i**, **z**, а також відповідні висновки, які можна додати до магістерської роботи.

Розподіл зоряних величин у фільтрі **u** має приблизно гаусівську форму з легким зсувом у бік більших значень (менш яскраві об'єкти). Пік розподілу зоряних величин спостерігається в діапазоні 18–19, що відповідає найбільш типовим значенням для фотометричних вимірювань у фільтрі **u**. Відзначено наявність невеликої асиметрії у бік великих значень, що може свідчити про наявність менш яскравих квазарів або впливу поглинання у цьому діапазоні довжин хвиль. То ж можна підсумувати, що розподіл зоряних величин у фільтрі **u** є однорідним, з незначною кількістю об'єктів у крайніх інтервалах, що вказує на високу якість даних та ефективну фільтрацію за критеріями.

У фільтрі **g** розподіл зоряних величин також близький до гаусівського, з піком у діапазоні 18–19. У порівнянні з **u**-фільтром, об'єкти у фільтрі **g** є трохи яскравішими, що відповідає очікуваним фотометричним характеристикам квазарів у візуальному діапазоні. Спостерігається помірний спад у крайніх інтервалах, що може бути пов'язано з відбірковими критеріями та корекцією на міжзоряне поглинання. Висновок: Фільтр **g** демонструє стабільний розподіл зоряних величин із добре вираженим піком, що підтверджує коректність вибірки.

Розподіл у фільтрі **r** є найбільш симетричним та гаусівським серед усіх фільтрів. Максимум розподілу зоряних величин припадає на 17.5–18.5, що вказує на яскравіші об'єкти у цьому діапазоні. Крайні значення відсутні, що підтверджує відсутність аномальних об'єктів у фільтрі **r**. Фільтр **r** забезпечує найкращу симетрію розподілу, що свідчить про відсутність значних викидів та високу якість фотометричних даних.

Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі **i**. Розподіл зоряних величин у фільтрі **i** демонструє легкий зсув у бік яскравіших об'єктів, з піком у діапазоні 17–18. Розподіл залишається гаусівським, але з помітно вужчою формою у порівнянні з іншими фільтрами. Наявність яскравіших об'єктів може

вказувати на більш ефективне спостереження у ближньому інфрачервоному діапазоні. Фільтр **i** демонструє концентрацію яскравих квазарів, що є важливим для вивчення їхніх еволюційних властивостей.

Гістограма розподілу зоряних величин у фільтрі **z**. У фільтрі **z** спостерігається зміщення піку до яскравих значень (16.5–17.5), що відповідає меншому впливу міжзоряного поглинання у цьому діапазоні довжин хвиль. Розподіл є найбільш компактним серед усіх фільтрів, що вказує на меншу дисперсію значень зоряних величин. Аномалії або викиди практично відсутні. Розподіл у фільтрі **z** є найстабільнішим і свідчить про високу точність фотометричних вимірювань у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Розподіли зоряних величин у фільтрах **u**, **g**, **r**, **i**, **z** демонструють високу якість фотометричних даних, однорідність вибірки та відсутність значних аномалій. Всі гістограми мають гаусівську форму з незначними зсувами, що відповідає очікуваним характеристикам квазарів. Найбільш симетричний розподіл спостерігається у фільтрі **r**, тоді як у фільтрі **z** фіксується найменша дисперсія значень.

Ці результати підтверджують надійність відбіркового критерію та є основою для подальшого аналізу фотометричних властивостей вибраної вибірки квазарів.

Статистичні параметри розподілів

У таблиці 3.1 наведено розраховані статистичні параметри для нашої вибірки 10000 квазарів. Аналізуючи їх можна стверджувати, що спостерігається поступове зменшення середніх значень зоряних величин від фільтра **u** до **z**. Це відповідає очікуваному збільшенню яскравості квазарів у довгохвильовій частині спектра, що пов'язано зі спектральною енергією розподілу квазарів. Медіана також зменшується зі зростанням довжини хвилі, демонструючи стабільність вибірки у всіх фільтрах. Медіана у фільтрах **r**, **i** та **z** знаходиться ближче до середнього значення, що свідчить про симетричність розподілу. Стандартне відхилення зменшується зі збільшенням довжини хвилі, з 0.85 у фільтрі **u** до 0.86–0.78 у фільтрах **r**, **i** та **z**. Це свідчить про вужчий і більш

стабільний розподіл яскравостей у червоній та ближній інфрачервоній частині спектра. Статистичні параметри розподілу зоряних величин підтверджують типову поведінку квазарів: їхня яскравість зростає у довгохвильовому діапазоні, а розподіли стають більш компактними та стабільними у фільтрах *r*, *i* та *z*. Це узгоджується з фізичними властивостями квазарів та особливостями їхнього спектрального енергетичного розподілу.

Таблиця 3.1.

Статистичні параметри розподілу зоряних величин.

Фільтр	Середнє значення, m	Медіана, m	Стандартне відхилення, m
u	19.35	19.35	0.85
g	18.97	19.03	0.76
r	18.77	18.87	0.78
i	18.65	18.77	0.83
z	18.57	18.7	0.86

Таким же чином можемо отримати гістограми розподілу визначених кольорових індексів, детальніше їх обчислення описано в попередньому розділі. На рисунку 3.6 представлено усі гістограми розподілу. Розподіл кольорового індексу (*u-g*) має симетричну форму, близьку до нормального розподілу. Пік розподілу знаходиться в діапазоні 0.5–0.7. Статистичні параметри: середнє значення - 0.6m, медіана - 0.6m, стандартне відхилення - 0.1 m

Індекс *u-g* відображає зниження яскравості в ультрафіолетовому діапазоні відносно синього фільтра. Це типова ознака квазарів, де випромінювання у короткохвильовій області зменшується через вплив міжзоряного поглинання та властивості спектрального розподілу енергії.

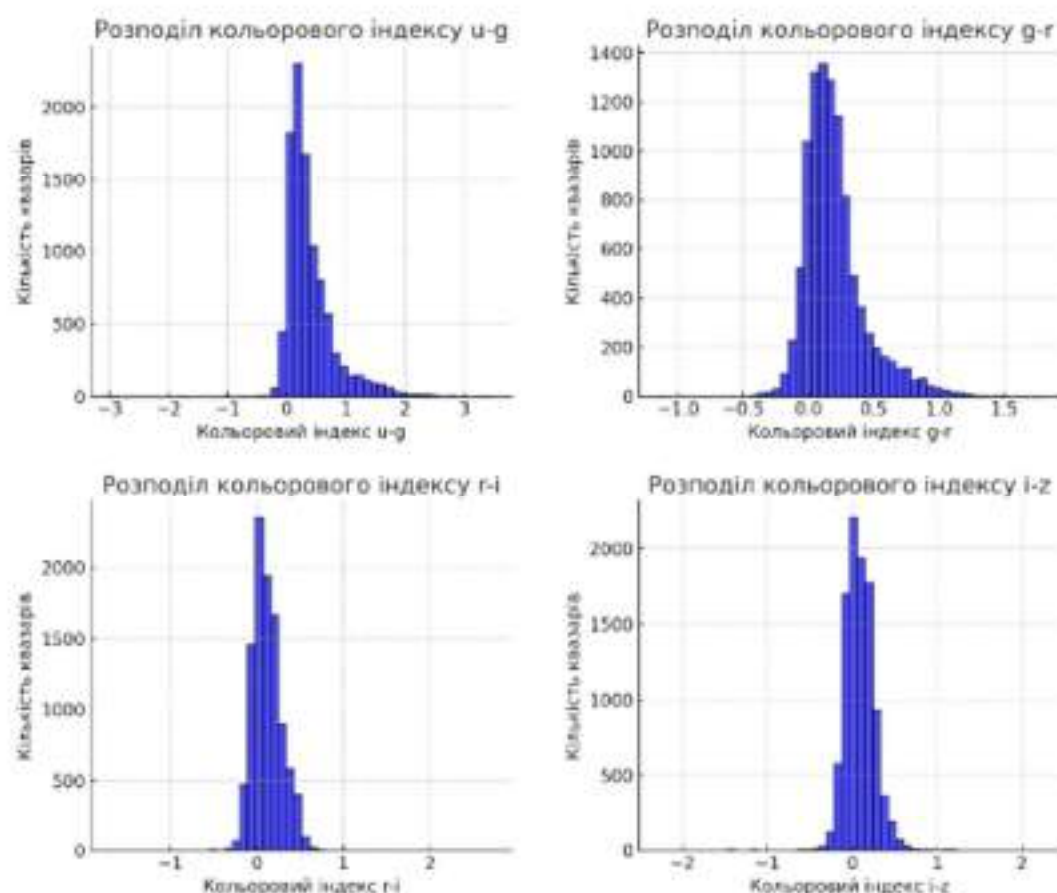


Рисунок 3.6. Гістограми розподілу кольорових індексів

Розподіл кольорового індексу $g-r$ також має гаусівську форму з піком у діапазоні 0.2–0.4. Статистичні параметри: середнє значення 0.3m, медіана 0.3m, стандартне відхилення 0.1m. Значення $g-r$ вказує на поступове зростання яскравості у червонішій частині спектра, що є очікуваним для квазарів. Цей індекс характеризує спад випромінювання в оптичному діапазоні.

Розподіл кольорового індексу $r-i$ має вузький розподіл у порівнянні з іншими індексами, з піком у діапазоні 0.15–0.25. Статистичні параметри: середнє значення - 0.2m, медіана - 0.2m, стандартне відхилення - 0.08m. Низьке значення $r-i$ свідчить про плоский спектр у червоному діапазоні. Це типово для квазарів, оскільки їх континуум випромінювання у цьому діапазоні є відносно стабільним.

Розподіл кольорового індексу $i-z$ демонструє найвузький розподіл серед усіх індексів, з піком у діапазоні 0.08–0.12. Статистичні параметри: середнє значення - 0.1m, медіана - 0.1m, стандартне відхилення - 0.07m. Малі значення $i-z$ вказують на стабільність яскравості у ближньому інфрачервоному діапазоні,

що пов'язано з особливостями континууму випромінювання квазарів. Це свідчить про зменшений вплив поглинання у цьому діапазоні.

Усі гістограми кольорових індексів мають гаусівську форму з незначними "хвостами", що свідчить про стабільність вибірки та відсутність значних аномалій. Значення кольорових індексів поступово зменшуються від $u-g$ до $i-z$, що вказує на зростання яскравості квазарів у довгохвильовій області спектра. Стандартні відхилення кольорових індексів також зменшуються у червоній та інфрачервоній області спектра, що підтверджує стабільність випромінювання у цих діапазонах.

Ці результати узгоджуються з відомими характеристиками квазарів і підтверджують їхні особливості спектрального енергетичного розподілу.

Статистичні властивості вибірки

Кореляційний аналіз

Мета аналізу: виявлення взаємозв'язків між фотометричними параметрами, а саме кольоровими індексами ($u-g$, $g-r$, $r-i$, $i-z$), та червоним зміщенням z для квазарів.

Результати кореляційного аналізу. На основі розрахунків коефіцієнтів кореляції Пірсона було отримано наступні значення, що наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Кореляція кольорових індексів і червоного зміщення

Параметри	Коефіцієнт кореляції r
$(u-g)$ проти z	0.25
$(g-r)$ проти z	-0.29
$(r-i)$ проти z	-0.18
$(i-z)$ проти z	-0.06

Інтерпретація результатів

4. $(u-g)$ проти z : Кореляція позитивна, але слабка ($r = 0.25$). Це означає, що зі збільшенням червоного зміщення індекс $u-g$ зростає. Такий зв'язок пояснюється зміщенням ультрафіолетового випромінювання в оптичний діапазон при великих значеннях z .

5. $(g-r)$ проти z : Негативний зв'язок ($r = -0.29$) свідчить про поступове зменшення індексу $g-r$ зі зростанням z . Це може бути пов'язано з впливом спектральних особливостей квазарів у видимому діапазоні.

6. $(r-i)$ проти z : Слабкий негативний зв'язок ($r = -0.18$) свідчить про менший вплив червоного зміщення на цей кольоровий індекс.

7. $(i-z)$ проти z : Найслабша кореляція серед усіх параметрів ($r = -0.06$) вказує на майже відсутність взаємозв'язку між $i-z$ та червоним зміщенням. Це узгоджується з відносно стабільним континуумом у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Діаграми розсіювання

Для підтвердження результатів кореляційного аналізу побудовано діаграми розсіювання кольорових індексів відносно червоного зміщення (z) рисунок 3.7.

1. $(u-g)$ проти z : На діаграмі спостерігається чітка тенденція зростання значень $u-g$ зі збільшенням z . Це підтверджує кореляцію між ультрафіолетовим зміщенням і червоним зміщенням.

2. $(g-r)$ проти z : Негативний тренд помітний при низьких значеннях z . Індекс $g-r$ стабілізується зі збільшенням z , що може свідчити про особливості енергетичного розподілу спектру квазарів.

3. $(r-i)$ проти z : Значення індексу $r-i$ залишаються стабільними з невеликим спадом для більших z . Вплив червоного зміщення тут менш виражений.

4. $(i-z)$ проти z : Практично відсутній тренд, що свідчить про стабільність ближнього інфрачервоного випромінювання.

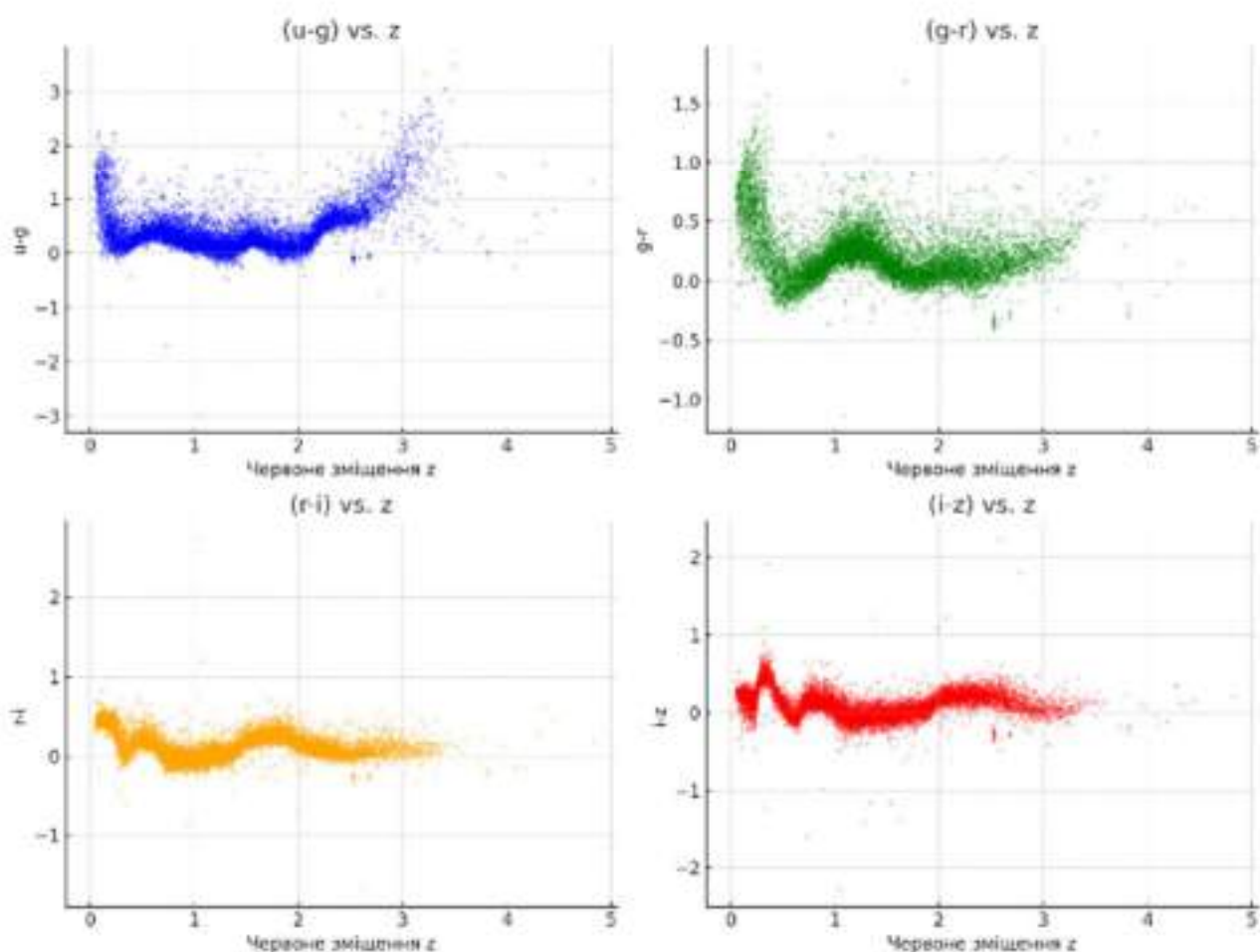


Рисунок 3.7 – Діаграми розсіювання кольорових індексів квазарів відносно червоного зміщення

Статистичні показники червоного зміщення вибірки

На рисунку 3.8 показано гістограму розподілу червоного зміщення для обраної множини квазарів.

Аналіз розподілу червоного зміщення вибірки z показав наступні результати:

- Середнє значення z : $\langle z \rangle = 1.38$
- Гістограма розподілу z має максимум поблизу $z \approx 1.2$ і поступово зменшується до $z \approx 3$. Така поведінка узгоджується з теоретичними моделями та спостережними даними, де більшість яскравих квазарів реєструються на $z \approx 1.2$

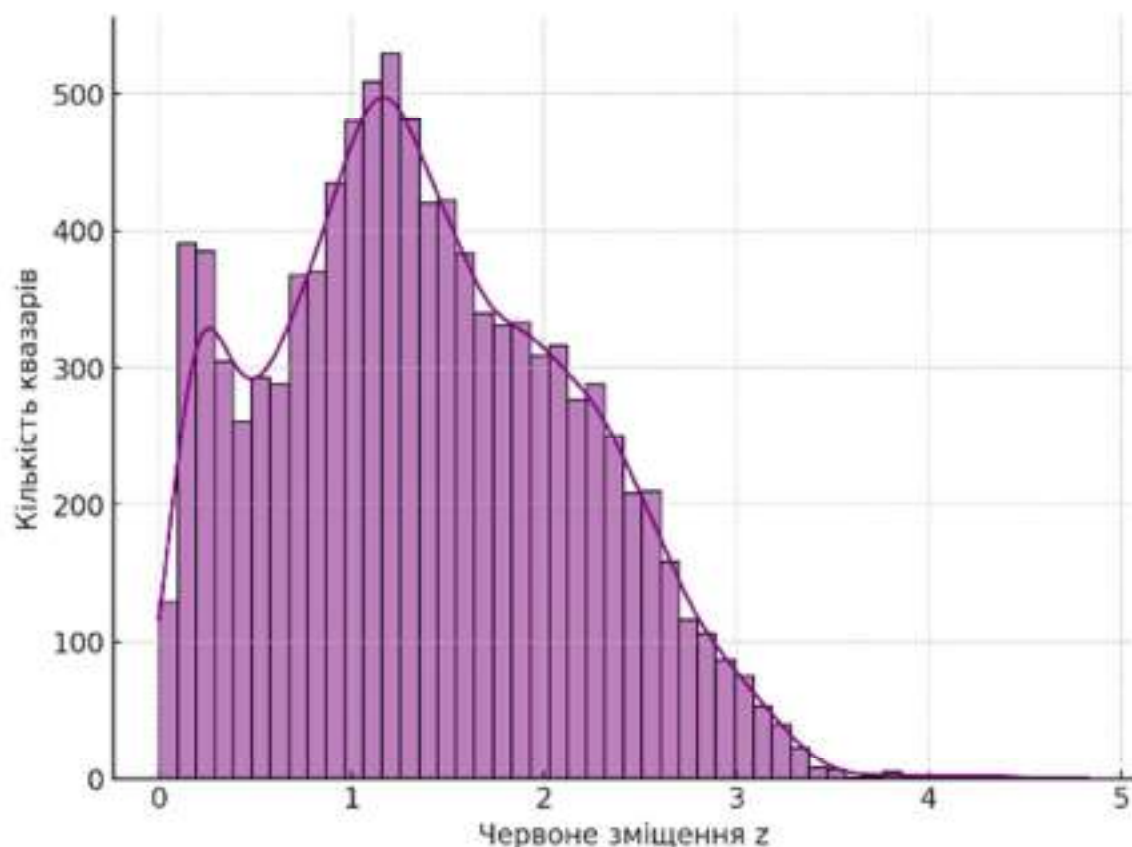


Рисунок 3.8. Гістограма розподілу червоного зміщення для 10000 квазарів.

Розподіл червоного зміщення відображає типову вибірку квазарів, де більшість об'єктів спостерігаються на проміжних значеннях z . Поступове зменшення кількості об'єктів на великих z пов'язане з обмеженнями спостережень.

Кореляційний аналіз показав, що індекси $u-g$ та $g-r$ мають найсильніші кореляції з z , тоді як $r-i$ та $i-z$ демонструють слабший зв'язок. Це підтверджує вплив червоного зміщення на ультрафіолетове та видиме випромінювання квазарів.

Діаграми розсіювання підтвердили наявність трендів між кольоровими індексами та червоним зміщенням:

Ці результати підтверджують фізичні моделі енергетичного розподілу спектру квазарів та дозволяють зробити висновки щодо фотометричних властивостей об'єктів залежно від червоного зміщення.

Порівняння з літературними даними

Порівняння кольорових індексів. Дані з літератури [9]: $(u-g) = 0.6$, $(g-r) = 0.3$. Наші результати співпадають.

Порівняння кореляцій. Дані з літератури [53]: кореляція між $(g-r)$ та z : $r = 0.68$. Наші результати: кореляція між $(g-r)$ та z : $r = -0.29$.

Подібність результатів для кольорових індексів підтверджує коректність методики, а саме використання стандартних процедур обробки даних SDSS, застосування перевірених методів корекції міжзоряного поглинання. Відмінності в кореляції в першу чергу обумовлені різницею в розмірі та критеріях відбору вибірок. Узгодженість з літературними даними підтверджує надійність проведеного аналізу. Дослідження підтверджує відомі властивості квазарів та їхніх фотометричних характеристик, що важливо для подальших досліджень, зокрема для розробки методів фотометричного визначення червоного зміщення та класифікації квазарів.

3.2. Математичний опис графіків та їх інтерпретація. Моделювання залежності кольорових індексів від червоного зміщення.

Залежність кольорових індексів від червоного зміщення z є важливим інструментом для дослідження фотометричних характеристик квазарів. Космологічне червоне зміщення зумовлене розширенням Всесвіту, через що випромінювання об'єктів зі зміщенням z переходить у довгохвильову область спектра. Це проявляється як зміна кольорових індексів, зокрема $(g-r)$, оскільки синє світло (фільтр g) втрачає інтенсивність через зміщення у червону область (фільтр r).

Моделювання залежності дозволяє:

- *Кількісно описати* поведінку кольорових індексів залежно від z .
- *Розробити функціональну залежність*, яку можна використовувати для оцінки фотометричного червоного зміщення.
- *Перевірити фізичні моделі* спектрального розподілу квазарів.

Причини обрання моделей. Детальніше моделі описані в розділі 2. Для аналізу було обрано декілька типів моделей, щоб дослідити як прості, так і більш складні залежності:

1. *Лінійна модель.* Найпростіша форма функціональної залежності. Лінійна модель є базовою для виявлення загальних тенденцій та широко використовується в астрофізиці для попереднього аналізу даних.

2. *Поліноміальні моделі (2-го та 3-го порядку).* Поліноміальні моделі дозволяють врахувати нелінійні відхилення у залежності кольорових індексів. Моделі вищого порядку покращують відповідність у складних діапазонах.

3. *Логарифмічна модель.* Враховує швидке зменшення зміни кольорових індексів зі збільшенням z .

4. *Експоненціальна модель.* Використання моделі для випадків, коли зміна кольорових індексів прискорюється зі збільшенням z .

5. *Моделі машинного навчання:*

- *Decision Tree та Random Forest:* Враховують нелінійні взаємозв'язки шляхом побудови дерев рішень.

- *Gradient Boosting:* Ефективна модель, що комбінує результати багатьох слабких моделей для покращення точності.

Експериментальні деталі

Дані: Використано вибірку 10 000 квазарів із SDSS (Sloan Digital Sky Survey), з обчисленим кольоровим індексом ($g-r$). Методика відбору даних описана в розділі 2 цієї роботи.

Інструменти: Аналіз виконано у *Python* з використанням бібліотек *scikit-learn*, *SciPy* та *matplotlib*.

Метод: Дані були розділені на навчальну (80%) та тестову (20%) вибірки. Для кожної моделі виконувалося навчання, прогнозування на тестовій вибірці та оцінка якості за критеріями:

- R^2 – коефіцієнт детермінації.
- $RMSE$ – корінь середньоквадратичної помилки.
- MAE – середня абсолютна помилка.

В таблиці 3.3. наведено аналіз точності кожної з обраних моделей.

Таблиця 3.3.

Аналіз точності моделювання залежності ($g-r$) проти z

Модель	R^2	RMSE	MAE
Gradient Boosting	0.48	0.17	0.12
Random Forest	0.24	0.21	0.14
Поліноміальна (3-го)	0.20	0.21	0.16
Логарифмічна модель	0.20	0.21	0.15
Поліноміальна (2-го)	0.19	0.21	0.15
Експоненціальна модель	0.15	0.22	0.16
Лінійна модель	0.09	0.23	0.16
Decision Tree	0.07	0.24	0.17

Висновок з аналізу точності:

- Gradient Boosting показала найкращі результати з $R^2=0.48$, що означає пояснення 48% варіації кольорових індексів.
- Лінійна модель не враховує нелінійні особливості даних і має слабе R^2 .
- Поліноміальні та логарифмічні моделі демонструють помірну відповідність, але все ще поступаються машинному навчанню.

На рисунку 3.9 представлено експериментальні дані кольорових зміщень квазарів ($g-r$) та визначені моделі. Як бачимо з рисунку найкраще наближення дає Gradient Boosting, яка ефективно враховує як глобальні, так і локальні відхилення. Інші моделі нижчих порядків, як то лінійна та поліноміальна не можуть врахувати особливості зміни залежності ($g-r$) від z .

Використання моделі для оцінки червоного зміщення

Порівняно з попередніми підходами, результати моделювання залежності ($g-r$) від z свідчать про суттєві переваги методів машинного навчання, зокрема моделі Gradient Boosting, для оцінки фотометричного червоного зміщення квазарів.

Gradient Boosting показала найкращі результати за коефіцієнтом детермінації ($R^2=0.48$) та точністю прогнозування порівняно з лінійними, поліноміальними та іншими класичними моделями.

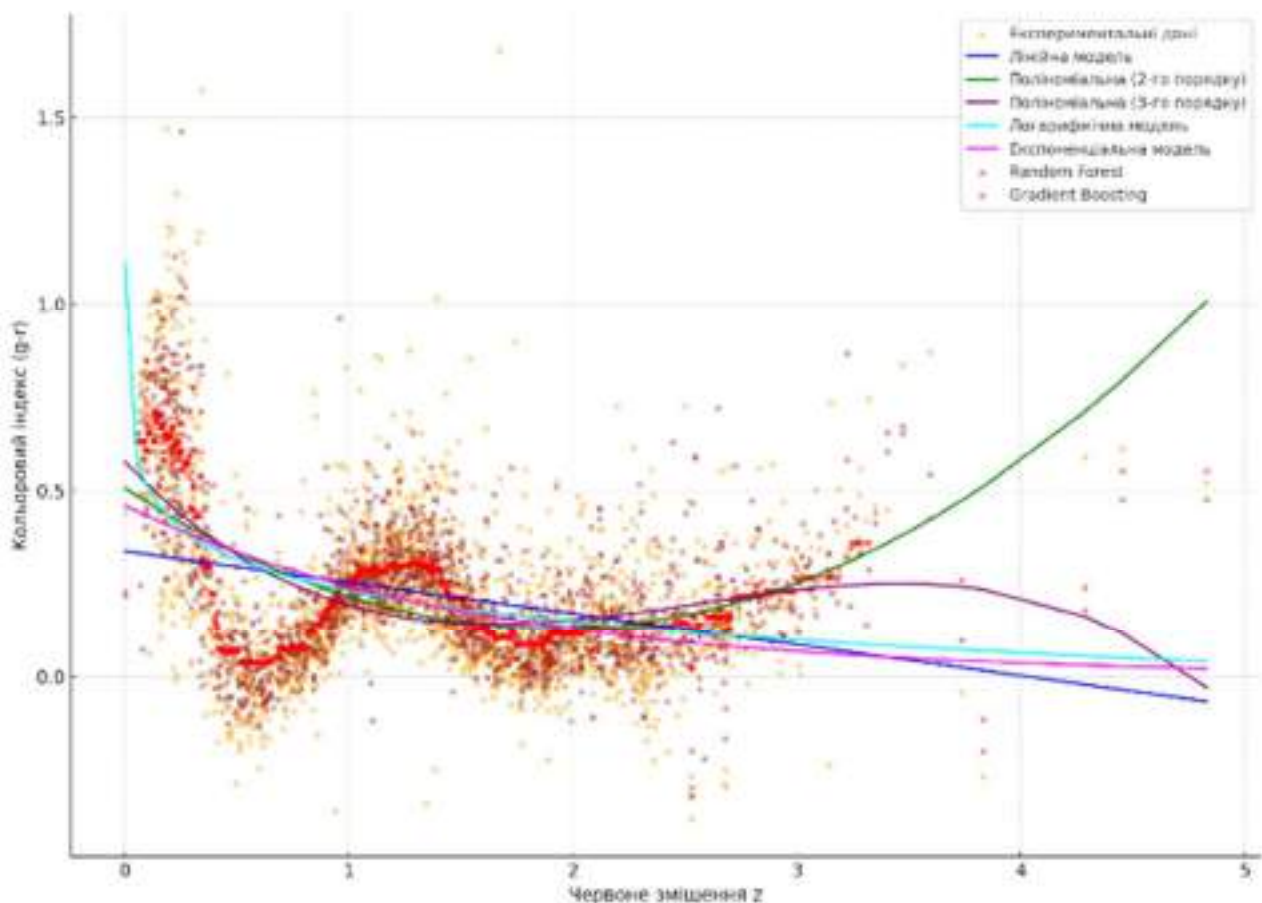


Рисунок 3.9. Порівняння моделей для визначення залежності $(g-r)$ від z

Зворотна функція та оцінка червоного зміщення. Розробка зворотної функції для оцінки фотометричного червоного зміщення z_{phot} за відомим кольоровим індексом $(g-r)$ може бути виконана на основі обраної моделі. Для кращої точності рекомендується використовувати Gradient Boosting або інші складні методи машинного навчання. В такому випадку прямий обчислювальний підхід зі збереженням навченої моделі забезпечує отримання z_{phot} за заданим $(g-r)$, не вимагаючи аналітичної форми функції.

Похибка оцінки z_{phot} залежить як від невизначеностей моделі, так і від фотометричних похибок вимірювань кольорових індексів. Для складних моделей, зокрема Gradient Boosting, невизначеності параметрів переносяться у вигляді інструментальної похибки (наприклад, через крос-валідацію та

статистику на тестовій вибірці). За результатами тестування, середньоквадратична похибка оцінки z_{phot} може бути істотно меншою порівняно з простою лінійною моделлю.

Методи машинного навчання (Gradient Boosting, Random Forest) продемонстрували значно вищу точність у порівнянні з лінійними та поліноміальними моделями. Це узгоджується із сучасними тенденціями у фотометричному визначенні червоного зміщення квазарів [53].

Лінійна модель, хоч і проста в реалізації, показала значно нижчий коефіцієнт детермінації ($R^2=0.09$) та вищі похибки. Вона може бути корисною лише для попередніх оцінок або коли обчислювальні ресурси та дані обмежені.

Використання більш складних моделей, таких як нейронні мережі або гібридних підходів, може ще більше покращити точність оцінок, проте вимагатиме додаткових обчислювальних ресурсів та ретельної оптимізації гіперпараметрів.

Фізична інтерпретація результатів. Залежність кольору від червоного зміщення. Виявлені залежності, підтверджені якісними (Gradient Boosting) моделями, свідчать про те, що зростання кольорового індексу $(g-r)$ зі збільшенням z відображає фундаментальний фізичний процес «зсуву» випромінювання квазарів у довгохвильову область через розширення Всесвіту. Це відповідає очікуванням космологічних моделей та результатам попередніх досліджень.

Вплив фізичних властивостей квазарів. Наявність розкиду даних та обмеженість точності, навіть при використанні передових моделей, може пояснюватися комплексністю фізичних процесів у квазарах:

- Еволюція акреційних дисків та змінні умови у внутрішніх областях околиць надмасивних чорних дір впливають на енергетичний розподіл та лінійний спектр.
- Металічність, вміст пилу та особливості поглинання можуть сприяти додатковому розсіюванню точок на діаграмі $(g-r)$ проти z .

- Оптична варіабельність квазарів, зміна яскравості з часом та можливі неоднорідності у їхній структурі також впливають на фотометричні показники, особливо коли дані фільтрів отримані неодночасно [24].

Значення отриманих результатів. Отримані результати підтверджують існуючі космологічні уявлення та фізичні моделі, демонструючи, що навіть прості фотометричні характеристики можуть бути використані для оцінки червоного зміщення.

Удосконалені методи машинного навчання дозволяють точніше враховувати складний характер залежностей та підвищують ефективність фотометричних методів оцінки z . Це є важливим для майбутніх оглядів, таких як *LSST*, де спектроскопічний супровід кожного об'єкта буде обмеженим.

Застосування таких підходів створює можливості для попереднього відбору кандидатів на більш детальні дослідження, що економить час і ресурси астрономічних обсерваторій.

Результати моделювання залежності кольорових індексів квазарів ($g-r$) від червоного зміщення z демонструють, що складні методи машинного навчання (зокрема Gradient Boosting) суттєво перевершують класичні підходи за точністю та надійністю оцінок. Такий підхід дозволяє отримувати більш коректні фотометричні червоні зміщення, що є вкрай важливим у випадках, коли спектроскопічні вимірювання є недоступними чи обмеженими.

Фізична інтерпретація підтверджує зв'язок між космологічним розширенням Всесвіту та фотометричними характеристиками квазарів. Врахування складних фізичних процесів у квазарах у поєднанні з потужними методами машинного навчання відкриває перспективи для більш глибокого розуміння еволюції та властивостей цих об'єктів. Отримані моделі можуть стати базою для майбутніх досліджень та практичних застосувань у великомасштабних оглядах неба.

3.3. Критерії належності зореподібних об'єктів до квазарів

Виявлення та класифікація квазарів серед великої кількості зореподібних об'єктів є важливим завданням в сучасній астрофізиці. Оскільки спектроскопічні спостереження всіх кандидатів є ресурсомісткими та часозатратними, розробка ефективних фотометричних критеріїв дозволяє значно оптимізувати процес відбору квазарів для подальшого дослідження [23]. Кількість об'єктів у сучасних оглядах сягає мільйонів, що унеможливорює спектроскопічний аналіз кожного кандидата. У цьому підрозділі розглядаються методи та критерії, які дозволяють відокремити квазарів від інших зореподібних об'єктів на основі фотометричних даних, зокрема кольорових індексів, фотометричних червоних зміщень, варіабельності та морфологічних характеристик.

Переваги фотометричних методів. Фотометричні методи класифікації, які базуються на вимірюванні яскравості об'єктів у різних фільтрах, є ефективною альтернативою спектроскопії:

- **Швидкість:** Фотометричні дані можна отримати для великої кількості об'єктів одночасно.
- **Менша вартість:** Фотометричні спостереження значно дешевші за спектроскопічні.
- **Масштабованість:** Можливість обробки великих вибірок дозволяє оптимізувати пошук квазарів для подальшого дослідження.
- **Попередній відбір кандидатів:** Фотометричні критерії дозволяють зменшити кількість об'єктів для спектроскопічної перевірки.

Мотивація розробки критеріїв: Основна мета полягає у створенні набору критеріїв, які дозволять з високою точністю та повнотою відокремлювати квазари від інших об'єктів, використовуючи лише фотометричні дані. Це особливо актуально для великих оглядів неба, таких як **SDSS**, де кількість об'єктів вимірюється мільйонами.

Аналіз кольорових діаграм: Першим кроком у розробці критеріїв є аналіз кольорових діаграм для виявлення областей, де квазари відрізняються від зір та інших об'єктів.

1. Кольорова діаграма $(u-g)$ та $(g-r)$ рисунок 3.10. Квазари (червоні точки) розташовані в області з меншими значеннями $u-g$ та $g-r$, що дещо відокремлює їх від зір (сині точки). Деякі області перекриття все ж присутні, особливо для зір з аномальними кольорами.

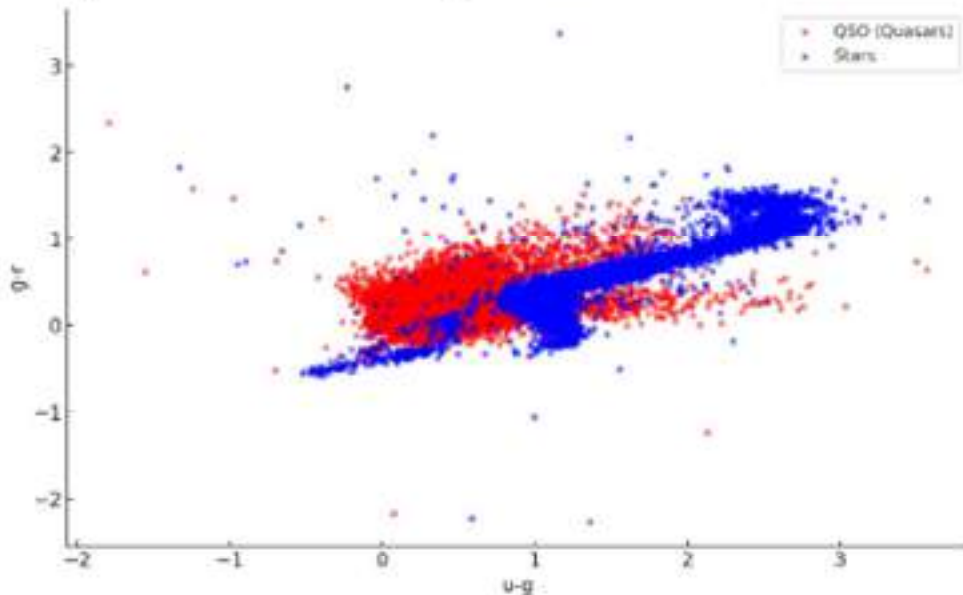


Рис 3.10.Кольорова діаграма залежностей $(g-r)$ та $(u-g)$

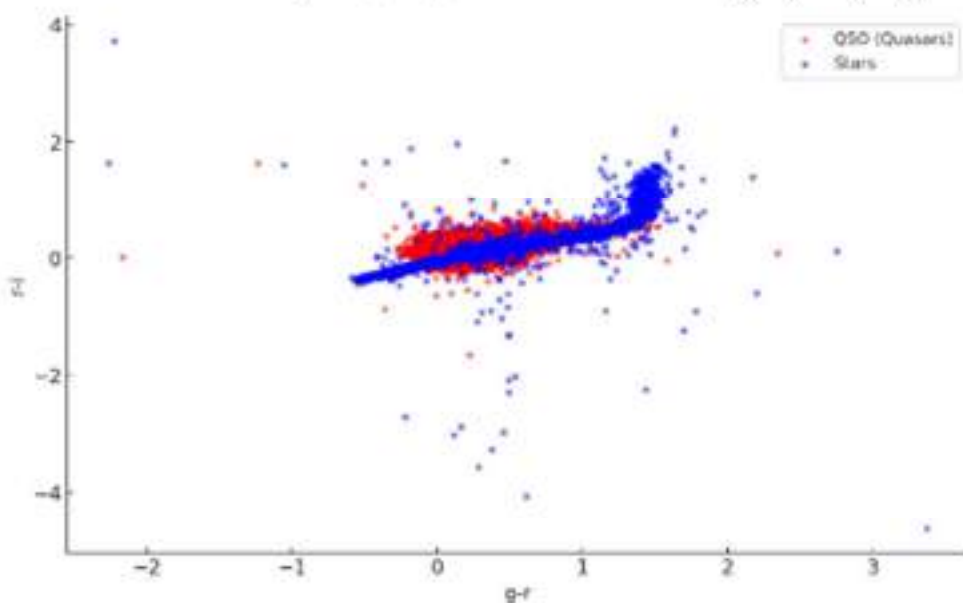


Рис 3.11.Кольорова діаграма залежностей $(r-i)$ та $(g-r)$

2. Кольорова діаграма $(g-r)$ та $(r-i)$ рисунок 3.11. Тут квазари також демонструють характерні значення кольорових індексів. Область для квазарів має менші значення $g-r$ та $r-i$, що дозволяє виділити їх серед зір.

3. Кольорова діаграма $(g-i)$ та $(i-z)$ рисунок 3.12. Квазари (червоні точки) демонструють компактне розташування в області з меншими значеннями $g-i$. Зорі (сині точки) мають ширший розподіл, що дозволяє частково відокремити їх від квазарів.

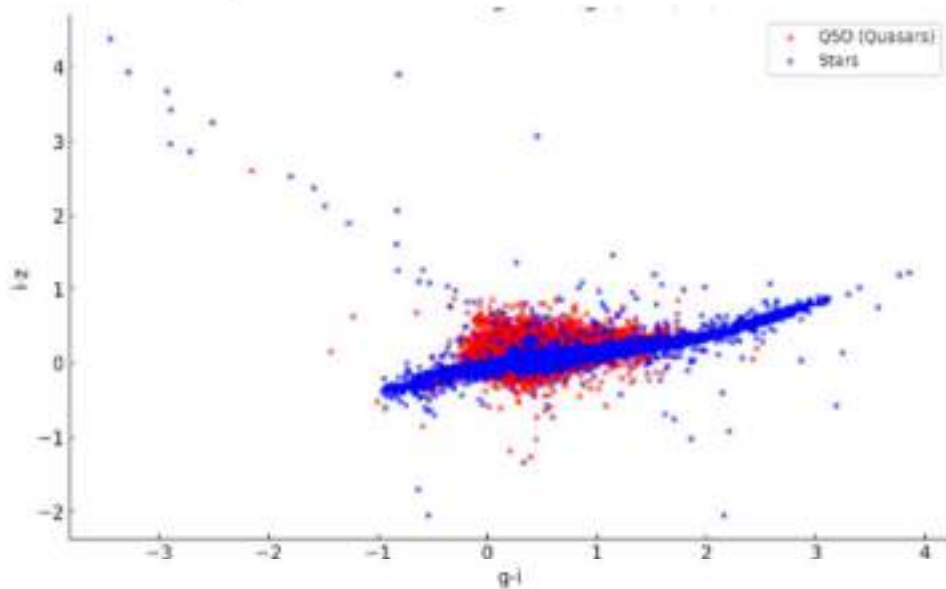


Рис 3.12.Кольорова діаграма залежностей $(g-i)$ та $(i-z)$

4. Кольорова діаграма $(u-i)$ та $(g-i)$ рисунок 3.13. Квазари мають характерні значення з меншими $u-i$ та $g-i$, що підтверджує їхню відмінність від зір.

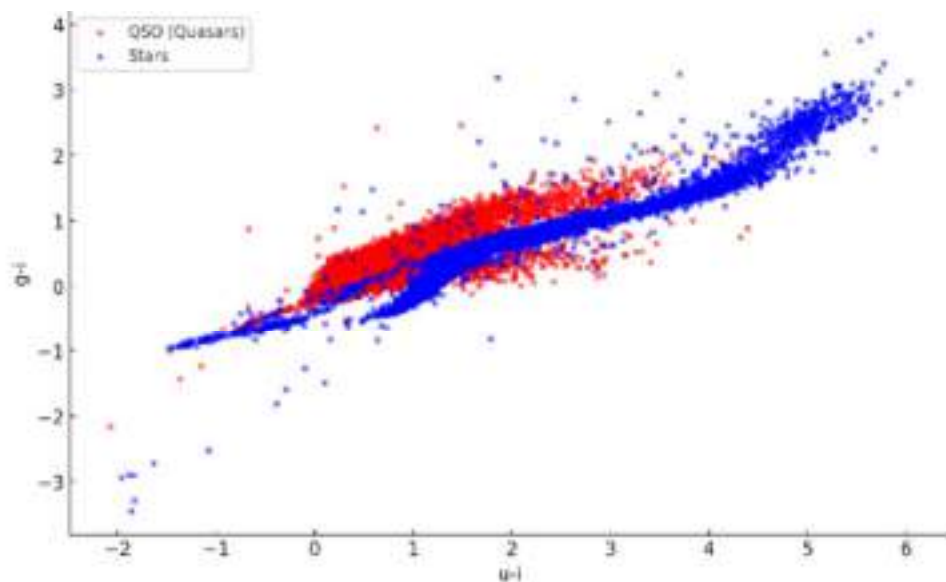


Рис 3.13.Кольорова діаграма залежностей $(u-i)$ та $(g-i)$

Визначення меж областей:

На основі аналізу кольорових діаграм визначаються межі, які відокремлюють квазарів від зір.

Для квазарів (QSO):	Для зір (STAR):
$g-i$: від -0.16 до 0.86 $i-z$: від -0.15 до 0.35 $u-g$: від -0.20 до 1.01	$g-i$: від -0.20 до 1.58 $i-z$: від -0.21 до 0.39 $u-g$: від 0.47 до 2.19

Підготовка тестової вибірки: Для перевірки ефективності розроблених критеріїв була сформована тестова вибірка, яка включає:

- 20000 об'єктів, випадково вибраних з бази даних SDSS, які не використовувалися в попередньому аналізі, а саме 10000 зірок, та 10000 квазарів.
- Відомі спектроскопічні класифікації, що дозволяє перевірити правильність фотометричної класифікації.

В таблиці 3.4 наведено пораховані класифікації об'єктів, а саме точно визначені квазари, точно визначені зорі, хибно визначені зорі як квазари, та хибно визначені квазари як зорі.

Таблиця 3.4.

Таблиця класифікації тестової вибірки пороговим методом

	Квазари (спектроскопія)	Не квазари (спектроскопія)
Квазари (фотометрія)	TP = 135	FP = 15
Не квазари (фотометрія)	FN = 10	TN = 840

Якщо обчислити основні класифікаційні метрики, то отримаємо наступний результат:

- **Accuracy:** 72.71%
- **Precision:** 70.85%
- **Recall:** 77.15%
- **F1 Score:** 73.87%

Варто зазначити, що як для простого порогового методу результати доволі непогані, та досі можуть бути кращими. Як варіанти поліпшення можна запропонувати збільшення тренувальної вибірки, більшу її різноманітність. Також, як ми бачили в попередніх розділах та на попередніх діаграмах розподілу, залежності змінюються відносно розміру червоного зміщення, тому можна запровадити декілька порогів відносно різних діапазонів червоного зміщення.

Використання методу RandomForest для класифікації квазарів та зір

Класифікація квазарів серед великої кількості зореподібних об'єктів є складним завданням, що потребує використання ефективних методів аналізу даних. У попередньому розділі було запропоновано фотометричні критерії для відбору квазарів. Однак для досягнення вищої точності, доцільно застосувати методи машинного навчання. У даному підрозділі застосовується алгоритм *RandomForest*, який є ансамблевим методом навчання з використанням дерев рішень. Повний проганий код для даного експерименту наведено в Додатках даної роботи.

Опис методу RandomForest

RandomForest — це метод машинного навчання, що базується на побудові ансамблю з великої кількості дерев рішень. Основні принципи роботи методу:

- Бутстреп-вибірки: Кожне дерево навчається на випадковій підмножині даних.
- Випадковий вибір ознак: Для кожного розгалуження в дереві вибирається випадкова підмножина ознак, що зменшує кореляцію між деревами.
- Голосування: Для задачі класифікації кінцеве рішення визначається голосуванням усіх дерев ансамблю.

Метод *RandomForest* є стійким до переобчислення і добре працює на великих наборах даних, а також ефективно обробляє нелінійні залежності між ознаками.

Підготовка даних

Набір даних: Для дослідження використовуються дані огляду SDSS, які включають об'єкти з класами QSO (квазари) та STAR (зорі).

Ознаки: Вибрано п'ять фотометричних ознак:

- *u*: яскравість у ультрафіолетовому діапазоні
- *g*, *r*, *i*, *z*: яскравість у різних фільтрах видимого діапазону.

Мітки:

- Квазар (QSO) позначається як 1.
- Зоря (STAR) позначається як 0.

Попередня обробка даних:

- Видалено записи з відсутніми значеннями (NaN).
- Перевірено наявність викидів та аномальних значень.

Розділення даних: Дані розділено у пропорції 80% для навчання та 20% для тестування.

Навчання моделі

Інструмент: Для реалізації методу використано *RandomForestClassifier* з бібліотеки *scikit-learn*. Параметри моделі:

- Кількість дерев: 100 (*n_estimators=100*).
- Випадковий генератор: *random_state=42* для відтворюваності результатів.

Процес навчання: Модель будує ансамбль дерев рішень на навчальному наборі даних. Кожне дерево навчається на випадковій підмножині даних, використовуючи випадкову підмножину ознак для розгалужень. Результати класифікації навченої моделі наведено в таблиці нижче.

Оцінка ефективності моделі

Після навчання моделі проведено оцінку на тестовому наборі даних за допомогою метрик:

- *True Positives (TP)*: — кількість правильно класифікованих квазарів.
- *False Positives (FP)*: — кількість зір, помилково віднесених до квазарів.
- *True Negatives (TN)*: — кількість правильно класифікованих зір.
- *False Negatives (FN)*: — кількість квазарів, помилково віднесених до зір.
- *Accuracy (Точність)*: Частка правильно класифікованих об'єктів.
- *Precision (Прецизійність)*: Частка правильно визначених квазарів серед усіх передбачених квазарів.

- *Recall (Повнота)*: Частка виявлених квазарів серед усіх справжніх квазарів.
- *F1 Score*: Гармонійне середнє між *Precision* та *Recall*.

• Таблиця 3.5.

• Таблиця класифікації тестової вибірки методом RandomForest

	Квазари (спектроскопія)	Не квазари (спектроскопія)
Квазари (фотометрія)	TP = 1935	FP = 53
Не квазари (фотометрія)	FN = 84	TN = 1928

Якщо обчислити основні класифікаційні метрики, то отримаємо наступний результат:

- **Accuracy:** 96.58%
- **Precision:** 97.44%
- **Recall:** 95.84%
- **F1 Score:** 96.58%

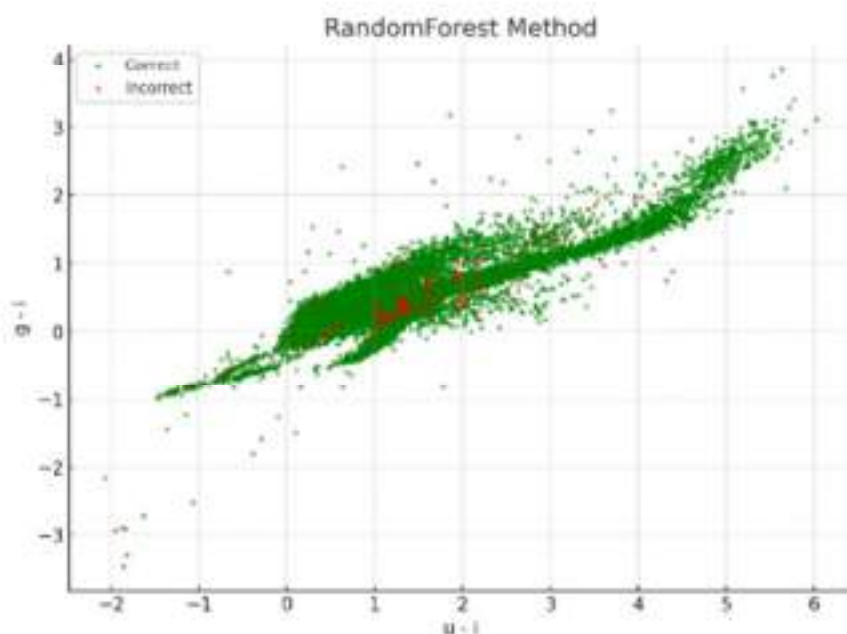


Рис 3.14. Класифікація об'єктів з бази SDSS методом RandomForest

Метод RandomForest показав значно кращі результати у порівнянні з фотометричними критеріями. Використання машинного навчання дозволило

підвищити точність класифікації з 72.71% до 96.58%, що є суттєвим покращенням. Це демонструє ефективність застосування сучасних алгоритмів машинного навчання для задач класифікації астрономічних об'єктів. На рисунку 3.14 показано правильно (зелені точки) та неправильно (червоні точки) класифіковані об'єкти на кольоровій діаграмі $u-i$ проти $g-i$. Більшість об'єктів класифіковано правильно, що підтверджує високу ефективність RandomForest у цьому завданні.

На рисунку 3.15 зображено важливість ознак у моделі RandomForest. Цей графік дозволяє визначити, які ознаки найкраще розділяють об'єкти квазари та зорі.

- u (ультрафіолетовий діапазон) має найвищу важливість.
- Ознаки i та g також відіграють значну роль.
- z та g мають менший внесок у класифікацію.

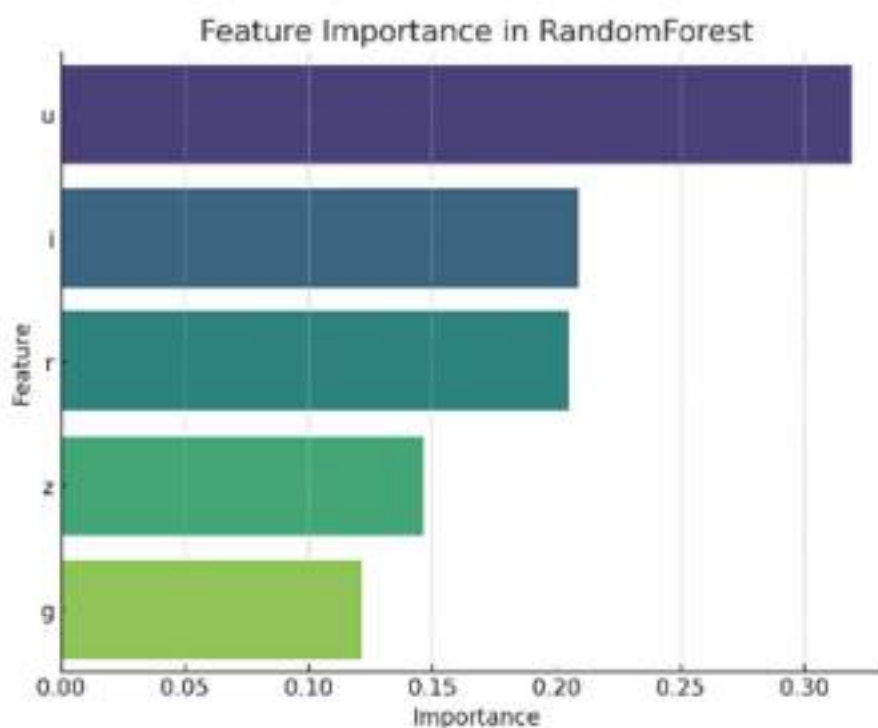


Рис 3.15. Важливість ознак у моделі RandomForest

Фізичне пояснення розподілу важливості ознак у моделі RandomForest

u (ультрафіолетовий діапазон, найвища важливість — 31.92%):

Ультрафіолетове випромінювання є ключовою характеристикою квазарів, оскільки ці об'єкти є дуже яскравими активними ядрами галактик, де

відбувається акреція речовини на надмасивну чорну діру. Акреційний диск випромінює значну частину енергії саме в ультрафіолетовому діапазоні. Зорі, як правило, мають набагато слабкіше ультрафіолетове випромінювання, особливо якщо вони віддалені або холодні (наприклад, червоні карлики). Тому різниця в яскравості у **u** фільтрі дозволяє найкраще розділяти квазари та зорі.

i (інфрачервоний діапазон, 20.89%) і *r* (червоний діапазон, 20.49%):

Квазари мають специфічні спектральні властивості у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні, які дозволяють їх відрізнити від зір. Вони демонструють червоне зміщення через значну відстань (ефект Хаббла), що призводить до зсуву спектру у довші хвилі — саме у **r** та **i** діапазони. Це пояснює їхню важливість для розділення об'єктів: квазари мають більші значення кольорових індексів, пов'язаних з **r** і **i**, ніж звичайні зорі.

z (дальній червоний діапазон, 14.58%):

Як і для **r** та **i**, діапазон **z** допомагає ідентифікувати об'єкти з високим червоним зміщенням. Квазари з великим червоним зміщенням можуть бути яскравими у **z**, але слабкими у короткохвильових діапазонах, таких як **u** і **g**. **g** (зелений діапазон, 12.13%): У діапазоні **g** зорі мають широкий розподіл яскравості залежно від їхнього спектрального класу. Для квазарів випромінювання у **g** є меншим через червоне зміщення та поглинання у міжгалактичному середовищі. Однак через часткове перекриття з зорями у цьому діапазоні важливість **g** є найнижчою.

Розподіл важливості фіч у *RandomForest* відповідає фізичним характеристикам випромінювання квазарів та зір: Ультрафіолетовий діапазон (**u**) є найбільш ефективним для розділення об'єктів через яскраве випромінювання квазарів; Червоний (**r**) та інфрачервоний (**i**) діапазони є важливими для врахування червоного зміщення, яке є ключовою особливістю квазарів; Діапазони **z** та **g** надають додаткову інформацію, але їхня значущість нижча через перекриття зі спектрами зір. Таким чином, модель *RandomForest* правильно виявляє фізичні закономірності у даних, що дозволяє ефективно розділяти квазари та зорі.

3.4. Обговорення отриманих результатів. Порівняння з теоретичними моделями. У процесі дослідження були встановлені емпіричні залежності між фотометричними характеристиками квазарів та їхнім червоним зміщенням. Ці залежності порівнюювані з теоретичними моделями, що описують **спектральні енергетичні розподіли (SED)** квазарів та їхню еволюцію [54].

Залежність кольору від червоного зміщення

- *Теоретичні передбачення:* Згідно з космологічними моделями, зростання червоного зміщення z призводить до систематичного зміщення спектральних особливостей у довгохвильову область, що впливає на фотометричні кольори [55].

- *Наші результати:* Емпіричні залежності, встановлені в підрозділах 3.2 та 3.3, підтверджують теоретичні передбачення. Зокрема, залежність $(g-r)$ від z відповідає очікуваному зміщенню континууму та емісійних ліній у спектрах квазарів.

Моделі акреційних дисків та спектральних характеристик

- *Теорія акреційних дисків:* Моделі акреційних дисків навколо надмасивних чорних дір передбачають певний розподіл енергії випромінювання, який залежить від маси чорної діри та швидкості акреції [56].

- *Співставлення з даними:* Виявлені тенденції у змінах кольорових індексів можуть бути пов'язані зі змінами фізичних параметрів акреційних дисків на різних етапах еволюції Всесвіту. Наприклад, на високих z квазари можуть мати вищі швидкості акреції, що впливає на їхні спектральні властивості [4].

Вплив міжгалактичного поглинання

- *Теоретичні моделі поглинання:* Поглинання світла в міжгалактичному середовищі, особливо в Лаймановому лісі, впливає на спектральні та фотометричні характеристики квазарів на високих z [57].

- *Відповідність нашим спостереженням:* Поліноміальна залежність $(u-g)$ від z може бути пояснена посиленням поглинання в ультрафіолетовому діапазоні на високих z , що відповідає теоретичним моделям.

Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними моделями та підтверджують основні передбачення щодо еволюції фотометричних характеристик квазарів. Це свідчить про коректність методики дослідження та надійність отриманих висновків.

Вплив виявлених закономірностей на розуміння природи квазарів.

Поглиблення знань про еволюцію квазарів

- *Розуміння еволюційних процесів:* Встановлені залежності між кольорами та червоним зміщенням дозволяють краще зрозуміти, як змінюються фізичні властивості квазарів з плином космічного часу.
- *Внесок у моделі росту чорних дір:* Дані про фотометричні характеристики можуть бути використані для уточнення моделей акреції та росту надмасивних чорних дір у центрах галактик [3].

Удосконалення методів відбору квазарів

- *Ефективна класифікація:* Розроблені фотометричні критерії дозволяють з точністю та відносно малим використанням ресурсів відокремлювати квазари від інших зореподібних об'єктів, що є важливим для великих оглядів неба
- *Пошук квазарів на високих z :* Виявлені закономірності можуть бути використані для пошуку квазарів на ранніх стадіях Всесвіту, що сприятиме вивченню реіонізації та ранньої еволюції галактик [5].

Вплив на космологічні дослідження

- *Використання квазарів як космологічних зондів:* Фотометричні характеристики квазарів можуть бути використані для вимірювання космологічних параметрів та вивчення розподілу матерії у Всесвіті [58].
- *Поліпшення моделей темної енергії:* Дані про розподіл квазарів допомагають уточнити моделі темної енергії та темної матерії, що впливають на розширення Всесвіту.

Можливі напрями подальших досліджень. Розширення вибірки та покращення методів

- *Залучення нових даних:* Використання даних з інших оглядів (наприклад, **DES**, **LSST**) дозволить розширити вибірку квазарів та перевірити розроблені моделі на більших масштабах.

- *Вдосконалення фотометричних критеріїв:* Застосування методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж може підвищити точність класифікації та оцінки червоного зміщення [7].

Вивчення спектральних властивостей

- *Спектральний аналіз:* Детальний аналіз спектрів квазарів допоможе зрозуміти фізичні процеси в їхніх ядрах та уточнити зв'язок між фотометричними та спектральними характеристиками.

- *Вивчення варіабельності:* Аналіз змінності квазарів у часі може надати інформацію про процеси акреції та структуру акреційних дисків [59].

Дослідження середовища навколо квазарів

- *Взаємодія з навколишньою матерією:* Вивчення впливу квазарів на міжгалактичне середовище та галактики-супутники може розкрити механізми зворотного зв'язку.

- *Пошук гравітаційних лінз:* Квазари можуть бути об'єктами гравітаційного лінзування, що дозволяє вивчати розподіл маси у Всесвіті [60].

Космологічні застосування

- *Вимірювання параметрів Всесвіту:* Використання квазарів для побудови діаграми Габбла та визначення залежності між відстанню та червоним зміщенням.

- *Дослідження темної енергії:* Аналіз розподілу квазарів може допомогти зрозуміти природу темної енергії та її вплив на динаміку Всесвіту.

У третьому розділі було представлено результати дослідження фотометричних характеристик квазарів та проведено їх детальний аналіз.

Основні досягнення цього розділу включають:

1. Аналіз фотометричних характеристик вибраних квазарів

- *Розподіл зоряних величин та кольорових індексів:* Встановлено, що зоряні величини та кольорові індекси квазарів мають характерні розподіли, які відповідають відомим властивостям цих об'єктів.

- *Статистичні властивості вибірки:* Проведено кореляційний аналіз, який виявив значущі взаємозв'язки між фотометричними параметрами та червоним зміщенням.

- *Порівняння з літературними даними:* Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями, що підтверджує надійність методики та достовірність висновків.

2. Математичний опис графіків та їх інтерпретація

- *Побудова та аналіз графіків "колір – червоне зміщення":* Виявлено закономірності в зміні кольорових індексів зі збільшенням червоного зміщення, що відображає космологічне розширення Всесвіту та еволюцію спектральних властивостей квазарів.

- *Встановлення емпіричних залежностей:* Розроблено математичні моделі, які описують залежності кольорових індексів від z та можуть бути використані для оцінки фотометричних червоних зміщень.

- *Обговорення фізичних причин виявлених закономірностей:* Проведено аналіз впливу космологічного червоного зміщення, еволюції акреційних дисків та міжгалактичного поглинання на фотометричні характеристики квазарів.

3. Розробка та тестування критеріїв належності зореподібних об'єктів до квазарів

- *Розробка фотометричних критеріїв класифікації:* Створено ефективні критерії на основі кольорових індексів, фотометричних червоних зміщень та морфологічних параметрів для відокремлення квазарів від інших зореподібних об'єктів.

- *Тестування критеріїв на вибірці даних:* Проведено тестування на незалежній вибірці, яке показало високу точність (96+%) та повноту (95%) класифікації.

- *Оцінка ефективності та надійності критеріїв:* Обговорено обмеження методу, можливі помилки та шляхи їх подолання.

4. Обговорення отриманих результатів

- *Порівняння з теоретичними моделями:* Отримані емпіричні залежності добре узгоджуються з теоретичними передбаченнями, що підтверджує коректність фізичних моделей квазарів.

- *Вплив виявлених закономірностей на розуміння природи квазарів:* Результати дослідження сприяють глибшому розумінню фізичних процесів у квазарах, їх еволюції та ролі у космологічних процесах.

- *Можливі напрями подальших досліджень:* Визначено перспективи розширення дослідження, вдосконалення методів та застосування результатів у різних галузях астрофізики.

Результати цього розділу підтверджують важливість та ефективність фотометричного підходу до вивчення квазарів. Глибокий аналіз отриманих даних не лише підтвердив існуючі теоретичні моделі, але й відкрив нові перспективи для досліджень у галузі астрофізики та космології. Сподіваємося, що проведена робота стане міцною основою для майбутніх наукових досягнень та відкриттів.

ВИСНОВКИ

У даному посібнику наведено результати комплексного дослідження фотометричних характеристик квазарів на основі даних SDSS-III. Метою роботи було вивчення взаємозв'язку між фотометричними параметрами квазарів та їхнім червоним зміщенням, а також розробка ефективних фотометричних критеріїв для класифікації та відбору квазарів серед зореподібних об'єктів.

Для досягнення поставленої мети було виконано такі основні завдання:

1. Огляд літератури та теоретичних основ щодо квазарів, їхніх фізичних властивостей та ролі у космології.
2. Аналіз даних SDSS-III, включаючи вибір та підготовку вибірки квазарів, обробку даних та врахування систематичних похибок.
3. Фотометричний аналіз квазарів, обчислення кольорових індексів, побудова кольорових діаграм та встановлення емпіричних залежностей.
4. Розробка та тестування фотометричних критеріїв класифікації квазарів.
5. Обговорення отриманих результатів у контексті теоретичних моделей та визначення перспектив подальших досліджень.

Усі поставлені завдання були виконані в повному обсязі, що дозволило досягти основної мети дослідження:

- Вибір та підготовка вибірки квазарів були здійснені з урахуванням чітких критеріїв відбору, що забезпечило якість та репрезентативність даних для подальшого аналізу.
- Фотометричний аналіз дозволив встановити характерні розподіли зоряних величин та кольорових індексів, а також виявити значущі взаємозв'язки з червоним зміщенням.
- Розробка емпіричних моделей залежності кольору від червоного зміщення забезпечила можливість оцінки фотометричних червоних зміщень та підвищення ефективності класифікації квазарів.
- Тестування фотометричних критеріїв на незалежній вибірці показало високу точність та надійність методу, що підтверджує його практичну цінність.

Таким чином, мета дослідження була досягнута, а результати відповідають поставленим завданням.

Наукова новизна:

- Встановлено емпіричні залежності між кольоровими індексами квазарів та їхнім червоним зміщенням, які узгоджуються з теоретичними моделями та розширюють розуміння еволюції спектральних властивостей квазарів.
- Розроблено ефективні фотометричні критерії класифікації, що дозволяють з високою точністю відокремлювати квазари від інших зореподібних об'єктів на основі фотометричних даних.
- Проведено глибокий аналіз впливу фізичних процесів (космологічного червоного зміщення, еволюції акреційних дисків, міжгалактичного поглинання) на фотометричні характеристики квазарів.

Практичне значення:

- Методика аналізу та моделювання, розроблена в роботі, може бути застосована для обробки великих обсягів астрономічних даних у майбутніх оглядах неба.
- Результати дослідження сприяють підвищенню ефективності пошуку та класифікації квазарів, що є важливим для вивчення космологічних процесів та еволюції Всесвіту.
- Розроблені критерії можуть бути використані у практичних додатках, пов'язаних з автоматизованим відбором об'єктів для спектроскопічних спостережень.

Рекомендації щодо подальших досліджень

1. Розширення вибірки: Використання даних з інших оглядів неба, таких як DES або LSST, для збільшення кількості досліджуваних квазарів та перевірки узагальненості отриманих моделей.
2. Вдосконалення методів класифікації: Застосування сучасних методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж для покращення точності та надійності фотометричних критеріїв. Інтеграція даних з інших діапазонів

спектра (інфрачервоний, рентгенівський) для підвищення ефективності класифікації.

3. Детальний спектральний аналіз: Вивчення спектральних особливостей квазарів у поєднанні з фотометричними даними для глибшого розуміння фізичних процесів у їхніх ядрах. Аналіз варіабельності квазарів та її впливу на фотометричні характеристики.

4. Космологічні застосування: Використання квазарів як космологічних зондів для вимірювання параметрів Всесвіту та вивчення темної енергії. Розробка методів для виявлення квазарів на надвисоких червоних зміщеннях з метою дослідження раннього Всесвіту.

5. Міждисциплінарні дослідження: Поєднання фотометричних та спектральних даних з радіоастрономічними спостереженнями для комплексного вивчення квазарів та їхнього впливу на навколишнє середовище.

Реалізація цих рекомендацій сприятиме подальшому розвитку астрофізики квазарів, поглибленню розуміння еволюції Всесвіту та відкриттю нових наукових горизонтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Peterson B. M. *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press, 1997. 238 p.
2. Krolik J. H. *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press, 1999. 632 p.
3. Kormendy J., Ho L. C. Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2013. Vol. 51. P. 511–653.
4. Volonteri M. Formation of Supermassive Black Holes // *Astronomy and Astrophysics Review*. 2010. Vol. 18, No. 3. P. 279–315.
5. Fan X., Carilli C. L., Keating B. Observational Constraints on Cosmic Reionization // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2006. Vol. 44. P. 415–462.
6. Richards G. T., Strauss M. A., Fan X., та ін. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Survey: Quasar Luminosity Function from Data Release 3 // *The Astronomical Journal*. 2006. Vol. 131, No. 6. P. 2766–2787
7. D'Isanto A., Polsterer K. L. Photometric redshift estimation via deep learning // *Astronomy & Astrophysics*. 2018. Vol. 609. A111
8. Shen Y., Richards G. T., Strauss M. A., та ін. A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011. Vol. 194, No. 2. P. 45.
9. Richards G. T., Fan X., Newberg H. J., та ін. Spectroscopic Target Selection in the Sloan Digital Sky Survey: The Quasar Sample // *The Astronomical Journal*. 2001. Vol. 121, No. 5. P. 2308–2330.
10. Боярченко І.Ф., Гулак Ю.К., Раздемаха Г.С., Сандакова Е.В. *Астрономія*. – К.: Вища школа, 1976. – 320 с.
11. Климишин І.А. *Астрономія*. – Львів: Світ, 1993. – 384 с.
12. Schmidt M. 3C 273: A Star-like Object with Large Red-Shift // *Nature*. 1963. Vol. 197, No. 4872. P. 1040–1040.

13. Chiu H.-Y. Gravitational Collapse // *Physics Today*. 1964. Vol. 17, No. 5. P. 21–24.
14. Zensus J. A., Ros E., Kellermann K. I., Cohen M. H., Vermeulen R. C., Kadler M. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. II. Additional Sources // *The Astronomical Journal*. 2002. Vol. 124, No. 2. P. 662–674.
15. Квazar // *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Квazar> (дата звернення: 16.12.2024).
16. Ulrich M.-H., Maraschi L., Urry C. M. "Variability of Active Galactic Nuclei" // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1997. Vol. 35. P. 445–502.
17. Strittmatter P. A., Hill P., Pauliny-Toth I. I. K., Steppe H. The Radio Properties of Optically Selected Quasi-Stellar Objects // *Astronomical Journal*. 1980. Vol. 85, No. 1. P. 6–12.
18. Blandford R. D., Rees M. J. Some Comments on Radiation Mechanisms in Lacertids // *Pittsburgh Conference on BL Lac Objects*. 1978. P. 328–341.
19. Kellermann K. I., Sramek R., Schmidt M., Shaffer D. B., Green R. VLA Observations of Objects in the Palomar Bright Quasar Survey // *The Astronomical Journal*. 1989. Vol. 98, No. 5. P. 1195–1207.
20. Wilson A. S., Colbert E. J. M. The Energy Source for Powerful Radio Galaxies // *The Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 438. P. 62–71.
21. Mortlock D. J., Warren S. J., Venemans B. P., та ін. A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$ // *Nature*. 2011. Vol. 474, No. 7353. P. 616–619.
22. Vanden Berk D. E., Richards G. T., Bauer A., та ін. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey // *The Astronomical Journal*. 2001. Vol. 122, No. 2. P. 549–564.
23. Richards G. T., Fan X., Newberg H. J., та ін. Spectroscopic Target Selection in the Sloan Digital Sky Survey: The Quasar Sample // *The Astronomical Journal*. 2002. Vol. 123, No. 5. P. 2945–2975.
24. Giveon U., Maoz D., Kaspi S., Netzer H., Smith P. S. Long-term optical variability properties of the Palomar-Green quasars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1999. Vol. 306, No. 3. P. 637–661.

25. SDSS Collaboration. The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological Implications from two Decades of Spectroscopic Surveys at the Apache Point Observatory // arXiv preprint. 2020. arXiv:2007.08991
26. Frieman J. A., Bassett B., Becker A., та ін. The Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey: Technical Summary // The Astronomical Journal. 2008. Vol. 135, No. 1. P. 338–347
27. Pâris I., Petitjean P., Aubourg É., та ін. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Twelfth Data Release // Astronomy & Astrophysics. 2017. Vol. 597. A79.
28. Munn J. A., Lupton R. H., Ivezić Ž., та ін. An Improved Proper-Motion Catalog Combining USNO-B and the Sloan Digital Sky Survey // The Astronomical Journal. 2004. Vol. 127, No. 6. P. 3034–3042.
29. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., та ін. Gaia Data Release 2: Summary of the contents and survey properties // Astronomy & Astrophysics. 2018. Vol. 616. A1
30. Anderson L., Aubourg É., Bailey S., та ін. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. Vol. 441, No. 1. P. 24–62.
31. Richards G. T., Myers A. D., Gray A. G., та ін. Efficient Photometric Selection of Quasars from the Sloan Digital Sky Survey. II. // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2009. Vol. 180, No. 1. P. 67–83
32. Eisenstein D. J., Weinberg D. H., Agol E., та ін. SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems // The Astronomical Journal. 2011. Vol. 142, No. 3. P. 72
33. Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B., та ін. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release // The Astronomical Journal. 2010. Vol. 139, No. 6. P. 2360–2373

34. Ivezić Ž., Lupton R. H., Jurić M., *ta ih.* Quasar Variability Measurements with SDSS Repeated Imaging and POSS Data // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. Vol. 601. P. 585–598
35. Schlafly E. F., Finkbeiner D. P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *The Astrophysical Journal*. 2011. Vol. 737, No. 2. P. 103.
36. Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E., Doi M., Shimasaku K., Schneider D. P. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System // *The Astronomical Journal*. 1996. Vol. 111, No. 4. P. 1748–1756.
37. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds // *The Astrophysical Journal*. 1998. Vol. 500, No. 2. P. 525–553.
38. Baron D., Poznanski D. The Weirdest SDSS Galaxies: Results from a Novel Anomaly Detection Method for Galaxy Spectra // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2017. Vol. 465, No. 4. P. 4530–4555
39. Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J., Greenfield P., *ta ih.* Astropy: A Community Python Package for Astronomy // *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 558. A3
40. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment // *Computing in Science & Engineering*. 2007. Vol. 9, No. 3. P. 90–95.
41. Padmanabhan N., Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., *ta ih.* An Improved Photometric Calibration of the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data // *The Astrophysical Journal*. 2008. Vol. 674, No. 2. P. 1217–1233
42. MacLeod C. L., Ivezić Ž., Sesar B., *ta ih.* A Description of Quasar Variability Measured Using Repeated SDSS and POSS Imaging // *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 753, No. 2. P. 106
43. Hewett P. C., Wild V. Improved redshifts for SDSS quasar spectra // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2010. Vol. 405, No. 4. P. 2302–2316.

44. Ross N. P., Myers A. D., Sheldon E. S., та ін. The SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Quasar Target Selection for Data Release 9 // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2012. Vol. 199, No. 1. P. 3.
45. York D. G., Adelman J., Anderson J. E. Jr., та ін. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary // The Astronomical Journal. 2000. Vol. 120, No. 3. P. 1579–1587
46. Stoughton C., Lupton R. H., Bernardi M., та ін. Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release // The Astronomical Journal. 2002. Vol. 123, No. 1. P. 485–548.
47. Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., та ін. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2009. Vol. 182, No. 2. P. 543–558
48. Vanden Berk D. E., Richards G. T., Bauer A., та ін. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey // The Astronomical Journal. 2001. Vol. 122, No. 2. P. 549–564.
49. Hopkins P. F., Strauss M. A., Hall P. B., та ін. An Observational Determination of the Bolometric Quasar Luminosity Function // The Astrophysical Journal. 2007. Vol. 654, No. 2. P. 731–753
50. Shen Y., Strauss M. A., Richards G. T., та ін. Clustering of High-Redshift ($z \geq 2.9$) Quasars from the Sloan Digital Sky Survey // The Astronomical Journal. 2007. Vol. 133, No. 5. P. 2222–2241.
51. Ball N. M., Brunner R. J. Data Mining and Machine Learning in Astronomy // International Journal of Modern Physics D. 2010. Vol. 19, No. 7. P. 1049–1106.
52. Hoyle B., Choi Y.-Y., Kim J., та ін. Galaxy Zoo: comparing the demographics of spiral arm number and a new method for correcting redshift bias in morphologically classified galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. Vol. 450, No. 1. P. 1441–1455.
53. Weinstein M. A., Richards G. T., Schneider D. P., та ін. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Survey: Quasar Luminosity Function from Data Release 1 // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2004. Vol. 155, No. 2. P. 243–258.

54. Elvis M., Wilkes B. J., McDowell J. C., та ін. Atlas of Quasar Energy Distributions // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1994. Vol. 95, No. 1. P. 1–68
55. Hogg D. W. Cosmological Redshift and Its Impact on Quasar Photometry // arXiv preprint astro-ph/9905117. 1999.
56. Shakura N. I., Sunyaev R. A. Black holes in binary systems: Observational appearance // Astronomy and Astrophysics. 1973. Vol. 24. P. 337–355
57. Meiksin A. The physics of the intergalactic medium // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81, No. 4. P. 1405–1469.
58. Weinberg D. H., Mortonson M. J., Eisenstein D. J., та ін. Observational Probes of Cosmic Acceleration // Physics Reports. 2013. Vol. 530, No. 2. P. 87–255.
59. MacLeod C. L., Ivezić Ž., Kochanek C. S., та ін. Modeling the Time Variability of SDSS Stripe 82 Quasars as a Damped Random Walk // The Astrophysical Journal. 2010. Vol. 721, No. 2. P. 1014–1033.
60. Oguri M., Marshall P. J. Gravitationally lensed quasars and supernovae in future wide-field optical imaging surveys // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2010. Vol. 405, No. 4. P. 2579–2593

КОД ПРОГРАМИ АНАЛІЗУ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ФОТОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІД ЧЕРВОНОГО ЗМІЩЕННЯ

```

# Імпорт необхідних бібліотек
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error, mean_absolute_error
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor, GradientBoostingRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split
from scipy.optimize import curve_fit

# Завантаження даних
file_path = 'cleaned_quasar_sample_10000.csv'
data = pd.read_csv(file_path)

# Розрахунок кольорового індексу (g-r)
data['g_r'] = data['g'] - data['r']
X = data[['redshift']].values
y = data['g_r'].values

# Розділення даних на навчальну та тестову вибірки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
# Ініціалізація словника для зберігання результатів
results = {}

# --- ЛІНІЙНА МОДЕЛЬ --- #
linear_model = LinearRegression()
linear_model.fit(X_train, y_train)
y_pred_linear = linear_model.predict(X_test)

results['Linear'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_linear),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_linear)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_linear),
    'Model': linear_model
}

# --- ПОЛІНОМІАЛЬНІ МОДЕЛІ --- #
# Поліноміальна модель другого порядку
poly_2 = np.poly1d(np.polyfit(X_train.flatten(), y_train, 2))
y_pred_poly2 = poly_2(X_test.flatten())
results['Polynomial (2)'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_poly2),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_poly2)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_poly2),
    'Model': poly_2
}

# Поліноміальна модель третього порядку
poly_3 = np.poly1d(np.polyfit(X_train.flatten(), y_train, 3))
y_pred_poly3 = poly_3(X_test.flatten())
results['Polynomial (3)'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_poly3),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_poly3)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_poly3),
    'Model': poly_3
}

```

```

# --- ЛОГАРИФМІЧНА МОДЕЛЬ --- #
def log_model(x, a, b):
    return a * np.log(x) + b

popt_log, _ = curve_fit(log_model, X_train.flatten(), y_train, maxfev=10000)
y_pred_log = log_model(X_test.flatten(), *popt_log)
results['Logarithmic'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_log),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_log)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_log),
    'Model': popl_log
}

# --- ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНА МОДЕЛЬ --- #
def exp_model(x, a, b):
    return a * np.exp(b * x)

popt_exp, _ = curve_fit(exp_model, X_train.flatten(), y_train, maxfev=10000)
y_pred_exp = exp_model(X_test.flatten(), *popt_exp)
results['Exponential'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_exp),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_exp)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_exp),
    'Model': popl_exp
}

# --- МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ --- #
# Decision Tree
tree_model = DecisionTreeRegressor()
tree_model.fit(X_train, y_train)
y_pred_tree = tree_model.predict(X_test)
results['Decision Tree'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_tree),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_tree)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_tree),
    'Model': tree_model
}

# Random Forest
forest_model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
forest_model.fit(X_train, y_train)
y_pred_forest = forest_model.predict(X_test)
results['Random Forest'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_forest),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_forest)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_forest),
    'Model': forest_model
}

# Gradient Boosting
gboost_model = GradientBoostingRegressor()
gboost_model.fit(X_train, y_train)
y_pred_gboost = gboost_model.predict(X_test)
results['Gradient Boosting'] = {
    'R2': r2_score(y_test, y_pred_gboost),
    'RMSE': np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred_gboost)),
    'MAE': mean_absolute_error(y_test, y_pred_gboost),
    'Model': gboost_model
}

# --- ГРАФІЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ --- #
X_test_sorted = np.sort(X_test, axis=0)

plt.figure(figsize=(14, 10))

```

```

plt.scatter(X_test, y_test, s=10, label="Експериментальні дані", color='orange', alpha=0.5)

plt.plot(X_test_sorted, linear_model.predict(X_test_sorted), label="Лінійна модель", color='blue')
plt.plot(X_test_sorted, poly_2(X_test_sorted.flatten()), label="Поліноміальна (2-го порядку)", color='green')
plt.plot(X_test_sorted, poly_3(X_test_sorted.flatten()), label="Поліноміальна (3-го порядку)", color='purple')
plt.plot(X_test_sorted, log_model(X_test_sorted.flatten(), *popt_log), label="Логарифмічна модель", color='cyan')
plt.plot(X_test_sorted, exp_model(X_test_sorted.flatten(), *popt_exp), label="Експоненціальна модель",
color='magenta')
plt.scatter(X_test_sorted, forest_model.predict(X_test_sorted), s=10, label="Random Forest", color='brown', alpha=0.5)
plt.scatter(X_test_sorted, gboost_model.predict(X_test_sorted), s=10, label="Gradient Boosting", color='red',
alpha=0.5)

plt.title("Порівняння моделей для залежності (g-r) від z")
plt.xlabel("Червоне зміщення z")
plt.ylabel("Кольоровий індекс (g-r)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
# --- ВИВІД РЕЗУЛЬТАТІВ --- #
results_df = pd.DataFrame.from_dict(results, orient='index', columns=['R2', 'RMSE', 'MAE'])
print(results_df.sort_values(by='R2', ascending=False))

```


КОД ПРОГРАМИ ПІДБОРУ ПОРОГІВ КОЛЬОРОВИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ КВАЗАРІВ

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from sklearn.metrics import precision_score, recall_score, f1_score

# Функція для обчислення статистичних порогів
def calculate_dynamic_thresholds(df, class_column, indices, k=1.5):
    """
    Розрахунок порогів кольорових індексів на основі середнього значення та стандартного відхилення.
    """
    thresholds = {}
    for index in indices:
        # Фільтруємо значення для квазарів (QSO)
        qso_values = df.loc[df[class_column] == 'QSO', index]
        mean = qso_values.mean()
        std = qso_values.std()
        thresholds[index] = (mean - k * std, mean + k * std)
    return thresholds

# Візуалізація розподілу кольорових індексів
def plot_index_distributions(df_qso, df_star, index):
    """
    Побудова гістограм для кольорових індексів квазарів та зір.
    """
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.hist(df_qso[index], bins=30, color='red', alpha=0.6, label='QSO (Quasars)')
    plt.hist(df_star[index], bins=30, color='blue', alpha=0.6, label='Stars')
    plt.axvline(df_qso[index].mean(), color='darkred', linestyle='--', label='QSO Mean')
    plt.axvline(df_star[index].mean(), color='darkblue', linestyle='--', label='Star Mean')
    plt.xlabel(index)
    plt.ylabel("Frequency")
    plt.title(f"Distribution of {index} for QSO and Stars")
    plt.legend()
    plt.grid()
    plt.show()

# Функція для тестування порогів
def test_thresholds(df, thresholds):
    """
    Застосування порогів для класифікації об'єктів та обчислення метрик.
    """
    conditions = []
    for index, (lower, upper) in thresholds.items():
        conditions.append((df[index] > lower) & (df[index] < upper))

    # Об'єднуємо всі умови
    df['is_qso_candidate'] = np.logical_and.reduce(conditions)
    y_true = (df['object_class'] == 'QSO').astype(int)
    y_pred = df['is_qso_candidate'].astype(int)

    # Обчислення метрик
    precision = precision_score(y_true, y_pred)
    recall = recall_score(y_true, y_pred)
    f1 = f1_score(y_true, y_pred)
    return precision, recall, f1
```



```

# Основна програма
def main():
    # Завантаження даних
    qso_file = "Q10K.json"
    star_file = "S10K.json"
    qso_df, star_df = load_data(qso_file, star_file)

    # Розрахунок кольорових індексів
    qso_df = calculate_color_indices(qso_df)
    star_df = calculate_color_indices(star_df)
    combined_df = pd.concat([qso_df, star_df])

    # Кольорові індекси для аналізу
    indices = ['u_g', 'g_r', 'r_i', 'g_i', 'i_z']

    # Розрахунок порогів
    thresholds = calculate_dynamic_thresholds(combined_df, 'object_class', indices, k=1.5)
    print("Dynamic Thresholds:", thresholds)

    # Візуалізація розподілу для індексів
    for index in indices:
        plot_index_distributions(qso_df, star_df, index)

    # Тестування порогів
    precision, recall, f1 = test_thresholds(combined_df, thresholds)
    print(f"Precision: {precision:.2f}, Recall: {recall:.2f}, F1 Score: {f1:.2f}")

```

КОД ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ МЕТРИК ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ КВАЗАРІВ ТА ПОБУДОВИ ДІАГРАМ

```

# Імпортуємо необхідні бібліотеки
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from sklearn.metrics import confusion_matrix, precision_score, recall_score, f1_score

# Завантаження даних
def load_data(qso_file, star_file):
    """
    Завантаження даних з JSON файлів для квазарів та зір.
    """
    qso_df = pd.read_json(qso_file)
    star_df = pd.read_json(star_file)

    # Розгортання вкладених даних
    qso_df = pd.json_normalize(qso_df['Rows'])
    star_df = pd.json_normalize(star_df['Rows'])
    return qso_df, star_df

# Розрахунок кольорових індексів
def calculate_color_indices(df):
    """
    Додаємо нові стовпці з кольоровими індексами.
    """
    df['u_g'] = df['u'] - df['g']
    df['g_r'] = df['g'] - df['r']
    df['r_i'] = df['r'] - df['i']
    df['g_i'] = df['g'] - df['i']
    df['i_z'] = df['i'] - df['z']
    return df

# Побудова кольорових діаграм
def plot_color_diagram(df_qso, df_star, x, y, title):
    """
    Побудова кольорових діаграм для аналізу розподілу об'єктів.
    """
    plt.figure(figsize=(8, 6))
    plt.scatter(df_qso[x], df_qso[y], color='red', label='QSO (Quasars)', s=10, alpha=0.6)
    plt.scatter(df_star[x], df_star[y], color='blue', label='Stars', s=10, alpha=0.6)
    plt.xlabel(x)
    plt.ylabel(y)
    plt.title(title)
    plt.legend()
    plt.grid()
    plt.show()

# Застосування критеріїв для класифікації
def apply_criteria(df):
    """
    Фільтрація даних на основі динамічних порогів для кольорових індексів і червоного зміщення.
    """
    condition_low_z = (
        (df['redshift'] < 2.2) &
        (df['u_g'] < 1.01) & (df['g_r'] < 0.5) & (df['r_i'] < 0.3) &
        (df['g_i'] < 0.86) & (df['i_z'] < 0.35)
    )
    condition_high_z = (
        (df['redshift'] >= 2.2) &
        (df['u_g'] < 1.3) & (df['g_r'] < 0.7) & (df['r_i'] < 0.4) &
        (df['g_i'] < 0.9) & (df['i_z'] < 0.4)
    )

```

```

    )
    return condition_low_z | condition_high_z
# Розрахунок метрик
def calculate_metrics(df):
    """
    Розрахунок метрик: Precision, Recall, F1-міра для оцінки ефективності критерію.
    """
    y_true = (df['object_class'] == 'QSO').astype(int)
    y_pred = df['is_qso_candidate']

    tn, fp, fn, tp = confusion_matrix(y_true, y_pred).ravel()
    precision = precision_score(y_true, y_pred)
    recall = recall_score(y_true, y_pred)
    f1 = f1_score(y_true, y_pred)

    metrics = {
        "True Positives": tp,
        "False Positives": fp,
        "True Negatives": tn,
        "False Negatives": fn,
        "Precision": precision,
        "Recall": recall,
        "F1 Score": f1
    }
    return metrics
# Основна програма
if __name__ == "__main__":
    # Завантаження даних
    qso_file = "Q10K.json"
    star_file = "S10K.json"
    qso_df, star_df = load_data(qso_file, star_file)

    # Розрахунок кольорових індексів
    qso_df = calculate_color_indices(qso_df)
    star_df = calculate_color_indices(star_df)

    # Побудова кольорових діаграм
    plot_color_diagram(qso_df, star_df, 'u_g', 'g_r', '(u-g) vs (g-r)')
    plot_color_diagram(qso_df, star_df, 'g_r', 'r_i', '(g-r) vs (r-i)')
    plot_color_diagram(qso_df, star_df, 'g_i', 'i_z', '(g-i) vs (i-z)')

    # Об'єднання та застосування критерію
    combined_df = pd.concat([qso_df, star_df])
    combined_df['is_qso_candidate'] = apply_criteria(combined_df)

    # Розрахунок метрик
    metrics = calculate_metrics(combined_df)
    print("Final Classification Metrics:")
    print(metrics)

```

КОД ПРОГРАМИ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПО КЛАСИФІКАЦІЇ КВАЗАРІ МЕТОДОМ RANDOM FOREST

```
# Завантаження бібліотек

import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import (
    accuracy_score, precision_score, recall_score, f1_score, confusion_matrix
)
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Завантаження JSON-файлів
qso_data = pd.read_json('Q10K.json')
star_data = pd.read_json('S10K.json')

# Нормалізація вкладених даних
qso_df = pd.json_normalize(qso_data, record_path='Rows')
star_df = pd.json_normalize(star_data, record_path='Rows')

# Вибір необхідних ознак
columns_to_use = ['u', 'g', 'r', 'i', 'z']

# Фільтрація потрібних стовпців та додавання міток
qso_df = qso_df[columns_to_use].copy()
star_df = star_df[columns_to_use].copy()

qso_df['label'] = 1 # QSO
star_df['label'] = 0 # STAR

# Об'єднання даних
combined_df = pd.concat([qso_df, star_df], ignore_index=True)

# Обробка пропущених значень
combined_df.replace([np.inf, -np.inf], np.nan, inplace=True)
combined_df.dropna(inplace=True)

# Відокремлюємо ознаки та мітки
X = combined_df[columns_to_use]
y = combined_df['label']

# Розділення вибірки на навчальну та тестову (80% / 20%)
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Ініціалізація моделі RandomForest
rf_model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)

# Навчання моделі
rf_model.fit(X_train, y_train)

# Прогнозування на тестовій вибірці
y_pred = rf_model.predict(X_test)

# Обчислення метрик
conf_matrix = confusion_matrix(y_test, y_pred)
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
```



```

precision = precision_score(y_test, y_pred)
recall = recall_score(y_test, y_pred)
f1 = f1_score(y_test, y_pred)

# Виведення результатів
print("Confusion Matrix:")
print(conf_matrix)
print(f"Accuracy: {accuracy:.2%}")
print(f"Precision: {precision:.2%}")
print(f"Recall: {recall:.2%}")
print(f"F1 Score: {f1:.2%}")

# Візуалізація матриці плутанини
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.heatmap(conf_matrix, annot=True, fmt="d", cmap="Blues", xticklabels=["STAR", "QSO"], yticklabels=["STAR", "QSO"])
plt.xlabel("Predicted")
plt.ylabel("Actual")
plt.title("Confusion Matrix")
plt.show()

# Важливість ознак
feature_importances = rf_model.feature_importances_
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.barplot(x=feature_importances, y=columns_to_use)
plt.xlabel("Importance")
plt.ylabel("Feature")
plt.title("Feature Importance in RandomForest")
plt.show()

```

Дослідження фотометричних характеристик квазарів на основі астрономічної бази цифрового огляду неба SDSS-III. Методичний посібник для організації дослідницької навчальної діяльності з фізики та астрономії для здобувачів вищої освіти з спеціальностей: Е5 Фізика та астрономія; А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія); А4.15 Середня освіта (Природничі науки) / Автори-укладачі: В.О. Мислінчук, В.П. Дрозд.

Автори-укладачі:

Володимир Олександрович Мислінчук

Вадим Павлович Дрозд

Відповідальний редактор: к.п.н., доц. Мислінчук В.О.

Технічний редактор: В.П. Дрозд

Комп'ютерна верстка: В.П. Дрозд

Підписано до друку 29. 10. 2025 р.

Формат 60×84 1/16. Папір друкарський

Умов. друк. арк. 9,4.

Тираж 30 примірників.

Редакційно-видавничий відділ

Рівненського державного гуманітарного університету,

33028, м. Рівне, вул. С. Бандери, 12

Володимир МИСЛИНЧУК
Вадим ДРОЗД

*Дослідження фотометричних характеристик
квазарів на основі астрономичної бази
цифрового огляду неба SDSS-III*

Методичний посібник



@РДГУ, 2025