

**Міністерство освіти і науки України**  
**Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**  
**Фізичний факультет**

**Кафедра астрономії та космічної інформатики**

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри астрономії та  
космічної інформатики  
проф. Юрій ШКУРАТОВ

16.05.2025 р.



Оцінка « добре »

Голова ЕК

проф. Олександра ІВАНОВА

22.05.2025 р.



**Кирилов Сергій Дмитрович**

**«Трансформаційні коефіцієнти між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1»**

Кваліфікаційна робота на здобуття  
освітньо-кваліфікаційного рівня  
«Магістр» спеціальність  
104 – «фізика та астрономія»  
освітньо-наукова програма

*«астрономія та космічна інформатика»*



(підпис студента)

Науковий керівник – професор кафедри  
астрономії та космічної інформатики  
В. Г. Шевченко



(підпис керівника)



Рецензент – старший  
науковий співробіт. НДІ астрономії,  
кандидат ф.-м.н. В. Г. Чорний

**Харків 2025**

## АНОТАЦІЯ

**Кирилов С.Д. Трансформаційні коефіцієнти між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1**

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю Е5 «Фізика та астрономія». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2025.

Дипломна робота стосується отримання надійних трансформаційних коефіцієнтів для переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1. У роботі виконано відбір даних з фотометричних каталогів зір-стандартів Ландольта та Pan-STARRS DR1 та сформовано вибірку з 170 зір-стандартів різних спектральних класів, для яких визначені зоряні величини у фотометричних системах Джонсона-Козінса (*BVR* смуги) з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8 та Pan-STARRS DR1 (*griz* смуги). Визначено коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1 для трьох смуг *BVR*. Виконано порівняльний аналіз значень коефіцієнтів переходу отриманих в даній роботі з літературними даними та показано, що вони є надійними у межах використаних діапазонів зоряних величин і показників кольору. Визначені трансформаційні співвідношення можуть бути ефективно використані для переведення зоряних величин між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS.

**Ключові слова:** зоряна величина, фотометрична система Джонсона-Козінса, фотометрична система Pan-STARRS, показник кольору.

## Abstract

**Kyrylov S.D. Transformation coefficients between the Johnson-Cousins and Pan-STARRS DR1 photometric systems**

Thesis for the degree of Higher Education "magister" in specialty E5 "Physics and astronomy". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025.

The thesis deals with obtaining reliable transformation coefficients for the transition between the Johnson-Cosins and Pan-STARRS DR1 photometric systems. In the work, data were selected from the photometric catalogs of Landolt and Pan-STARRS DR1 standard stars and a sample of 170 standard stars of different spectral classes was formed, for which the magnitudes in the Johnson-Cosins photometric systems (*BVR* bands) were determined taking into account the instrumental system of the AZT-8 telescope and Pan-STARRS DR1 (*griz* bands). The transition coefficients between the Johnson-Cosins and Pan-STARRS DR1 photometric systems were determined for the three *BVR* bands. A comparative analysis of the values of the transition coefficients obtained in this work with literature data was performed and it was shown that they are reliable within the used ranges of magnitudes and color indices. The determined transformation relations can be effectively used to convert stellar magnitudes between the Johnson-Cosins and Pan-STARRS photometric systems.

**Keywords:** stellar magnitude, Johnson-Cosins photometric system, Pan-STARRS photometric system, color index.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                         | 4  |
| РОЗДІЛ 1. Широкосмугові фотометричні системи.....                                                                  | 6  |
| 1.1. Фотометрична система Джонсона-Козінса .....                                                                   | 6  |
| 1.2. Фотометрична система SDSS .....                                                                               | 10 |
| 1.3. Фотометрична система Pan-STARRS DR1 .....                                                                     | 14 |
| РОЗДІЛ 2. Методика дослідження фотометричних систем.....                                                           | 18 |
| 2.1. Відбір зір стандартів, що задають фотометричну систему .....                                                  | 18 |
| 2.2. Використання електронного атласу Aladin для відбору стандартних<br>зір, що задають фотометричну систему ..... | 21 |
| 2.3. Телескоп АЗТ-8 та його фотометрична система .....                                                             | 24 |
| РОЗДІЛ 3. Коефіцієнти переходу між фотометричними системами<br>Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1.....             | 28 |
| 3.1 Набір зір-стандартів для реалізації фотометричних систем<br>Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1 .....           | 28 |
| 3.2 Визначення коефіцієнтів переходу між фотометричними системами<br>Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1 .....      | 31 |
| 3.3 Порівняльний аналіз значень коефіцієнтів переходу отриманих в даній<br>роботі з літературними даними .....     | 38 |
| Висновки.....                                                                                                      | 42 |
| Список використаної літератури.....                                                                                | 43 |
| Додаток 1.....                                                                                                     | 45 |

## ВСТУП

Необхідність у стандартній фотометричній системі було започатковано ще у 1922 р. на першому з'їзді МАС, коли було прийнято Міжнародну систему зоряних величин, засновану на спостереженнях 96 зір Північного полярного ряду (близьк від 2.08 до 17.43 зор. вел.), які утворили Міжнародну систему фотометричних стандартів. З того часу з'явилося багато різних фотометричних систем, але основними на сьогоднішній час є фотометричні системи Джонсона-Козінса *UBVRI* та Слоанівська *u'g'r'i'z'* [5]. Система Джонсона-Козінса застосовується в астрономії вже достатньо довгий час і калібрується фотометричними стандартами з ділянок Ландольта [2, 11, 12]. Насьогодні отримано багато вторинних фотометричних стандартів у цій системі, в тому числі і в НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна. Крім того Американською асоціацією змінних зір виконано повний огляд північної частини небесної сфери (AAVSO-APAS) у смугах *B* та *V* і отримано каталог вторинних фотометричних стандартів для зір до 15 зор. вел. [9]. Слоанівська фотометрична система була запропонована і реалізована для широкомасштабного огляду майже всього неба для вивчення розподілу галактик (SDSS). З невеликими модифікаціями вона також була використана у огляді Pan-STARRS DR1, що дало змогу отримати каталог вторинних фотометричних стандартів для всього неба до 21 зор. величини [7, 14]. Є відповідні формули переходу між цими системами, але вони не завжди задовольняють точності спостережень та не враховують особливості інструментальної системи телескопу.

Крім того, однією з особливостей спостережень за рухомими об'єктами є постійно змінюване поле спостереження. Кожен астероїд має власний рух і у випадку об'єктів, що рухаються швидко, за одну ніч може спостерігатися кілька різних полів. Через цю особливість калібрування інструментальних зоряних величин за допомогою фотометричних стандартів суттєво складніше порівняно зі спостереженнями за полями нерухомих зірок, а встановлення якісного набору вторинних фотометричних стандартів піддається впливу додаткових факторів, пов'язаних зі зміною погодних умов. Стає очевидним, що у випадку фотометрії

малих тіл у фотометричній системі *BVRI* необхідні стандартні зорі на спостережних полях, щоб звести до мінімуму зміну за рахунок додаткових факторів. Тому основною метою цієї роботи є отримання надійного зв'язку між каталогом всього неба Pan-STARRS DR1 і стандартним каталогом *BVRI* системи Джонсона-Козінса з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8, що реалізована в НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Об'єкт дослідження: фотометрична система *BVRI* Джонсона-Козінса.

Предмет дослідження: Коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1.

Для вирішення цієї мети ставилось декілька основних завдань:

1. Провести огляд наукової літератури щодо фотометричних систем Джонсона-Козінса, Слоанівської та Pan-STARRS DR1.
2. Опанувати методику дослідження фотометричних систем.
3. Отримати коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1 з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8.
4. Виконати порівняльний аналіз значень коефіцієнтів переходу отриманих в даній роботі з літературними даними.

Актуальність дипломної роботи полягає в тому, що визначення коефіцієнтів переходу між системами дозволить використовувати значення зоряних величин з каталогу Pan-STARRS DR1 для отримання значень зоряних величин у системах Джонсона-Козінса з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8 при спостереженнях малих тіл Сонячної системи.

## РОЗДІЛ 1. Широкосмугові фотометричні системи

Фотометрична система визначає набір оптичних смугових фільтрів для використання в спостереженнях, які можна відкалібрувати за низкою первинних стандартних зір, щоб забезпечити порівнянність записів між різними спостереженнями. Вибір фотометричної системи може істотно вплинути на результати вимірювань, включно з деякими з найвідоміших астрономічних спостережень останніх років. Багато зусиль, спостережних і теоретичних, витрачається на перетворення, візуальної зоряної величини і кольору зорі в її повний абсолютний потік і ефективну температуру пов'язану з температурою поверхні для того, щоб визначити масу, склад і вік зорі. Для цього використовуються емпіричні співвідношення, отримані для зір з відомими світностями і виміряними радіусами, а також теоретичні розрахунки модельної атмосфери. Інтегральні зоряні величини і кольори зоряних скупчень також становлять великий інтерес, оскільки їх можна використовувати для визначення віку і складу зір, що входять до них. Аналогічно, інтегральні зоряні величини і кольори галактик можна аналізувати, щоб визначити природу і співвідношення їхніх зір і газу, а також вивчати еволюцію галактик. Такий синтез популяцій є потужним інструментом у вивченні як далекого Всесвіту, так і місцевої системи. Спільним для усіх цих спроб є необхідність переведення вимірювань у стандартну шкалу фізичного потоку шляхом вилучення поглинання атмосферою Землі і калібрування чутливості фотометричного обладнання в різних діапазонах хвиль [2].

### 1.1 Фотометрична система Джонсона-Козінса

Фотометрична система Джонсона-Козінса, також відома як система UBVRI, є стандартною системою для вимірювання яскравості зір у різних діапазонах довжин хвиль. Вона складається з п'яти фільтрів: U (ультрафіолетовий), B (синій), V (візуальний), R (червоний) та I (інфрачервоний) [2, 5]. Для визначення зоряної величини об'єкта у певному фільтрі використовується базове рівняння фотометрії  $m = -2.5 \lg F + C$ , де  $m$

зоряна величина у відповідному фотометричному фільтрі,  $F$  потік випромінювання у цьому фільтрі, а  $C$  константа калібрування, яка залежить від системи вимірювання та умов спостереження [2, 11]. Ця система була розроблена на основі оригінальної системи UBV, введеної Гарольдом Джонсоном у 1950-х роках, і пізніше розширена за рахунок додавання червоних та інфрачервоних фільтрів завдяки роботам Крона та Козінса. Система Джонсона-Козінса широко використовується в астрономії для класифікації зір за їх кольорами та температурою. Вона дозволяє астрономам визначати фізичні характеристики зір, такі як температура, маса та вік, шляхом вимірювання їх яскравості у різних спектральних діапазонах [2, 9]. Показники кольору, такі як  $B-V$ , обчислюються як різниця між величинами, виміряними через відповідні фільтри, і використовуються для оцінки температури зорі. Для їх розрахунку використовують формулу різниці зоряних величин у двох смугах:  $CI=m_1-m_2$ , де  $m_1$  і  $m_2$  зоряні величини об'єкта у відповідних фотометричних фільтрах. У розгорнутому вигляді для конкретних фільтрів це буде мати вигляд:  $(B-V)=B-V$ ,  $(U-B)=U-B$ ,  $(V-R)=V-R$ ,  $(R-I)=R-I$  [12]. З часом система Джонсона-Козінса стала основою для багатьох інших фотометричних систем і залишається важливим інструментом в астрономічних дослідженнях. Вона використовується для калібрування даних, отриманих на різних телескопах та фотометрах, забезпечуючи стандартизовані вимірювання яскравості зір на різних обсерваторіях по всьому світу [2]. Обчислення в фотометричній системі Джонсона-Козінса здійснюється шляхом вимірювання світлового потоку зір через серію фільтрів, що відповідають певним діапазонам довжин хвиль. Процес обчислення відбувається шляхом спостереження через фільтри [1, 2]:

$U$  (ультрафіолетовий): Діапазон довжин хвиль приблизно 300-400 нм.

$B$  (синій): Діапазон довжин хвиль приблизно 400-500 нм.

$V$  (візуальний): Діапазон довжин хвиль приблизно 500-600 нм.

$R$  (червоний): Діапазон довжин хвиль приблизно 600-700 нм.

$I$  (інфрачервоний): Діапазон довжин хвиль приблизно 700-900 нм.

На Рис. 1.1 показані криві пропускання фільтрів системи Джонсона – Козінса відносно потоків зір різних спектральних класів, а в Таблиці 1.1 представлені ефективні довжини хвиль та напівширини пропускання цієї системи.

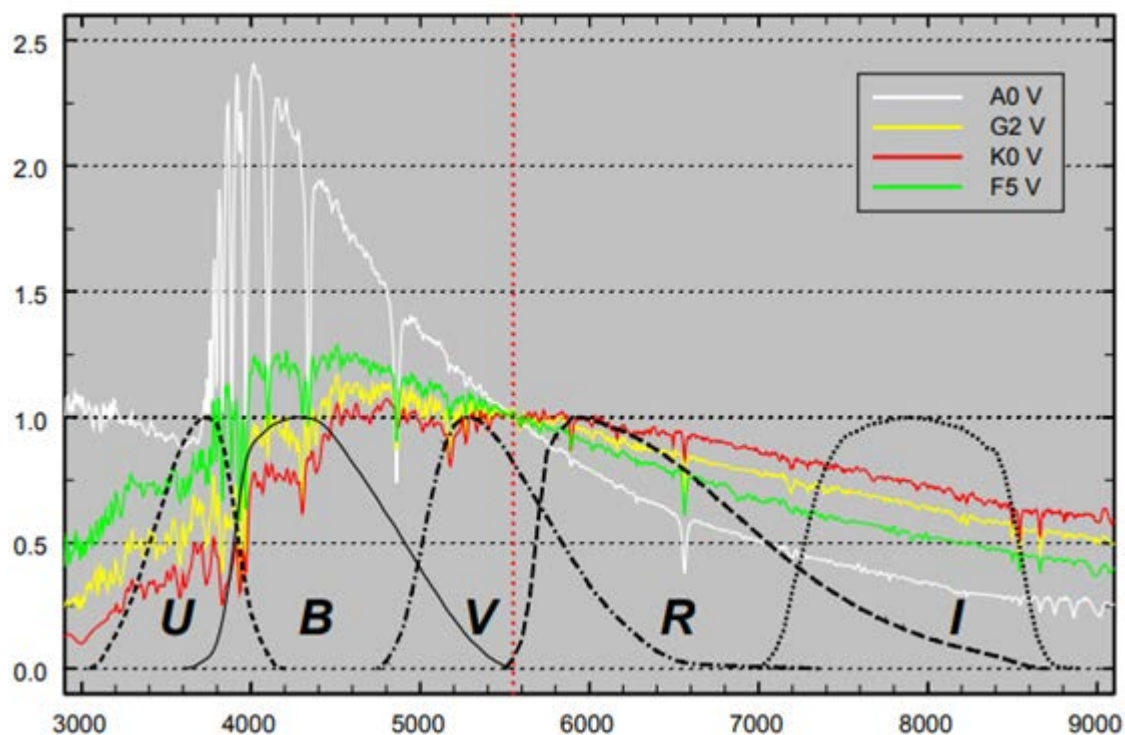


Рисунок 1.1. Графік кривих пропускання фільтрів, системи Johnson-Cousins [2].

Кожен фільтр пропускає лише певний спектральний діапазон світла, фотометричний детектор вимірює інтенсивність світла, що пройшло через кожен фільтр. Це дає змогу обчислити зоряну величину зірки в кожному діапазоні. Показник кольору  $B-V$  обчислюється як різниця між зоряними величинами в синьому ( $B$ ) та візуальному ( $V$ ) діапазонах. Інші показники кольору, такі як  $U-B$  або  $V-R$ , обчислюються аналогічно. Показники кольору дозволяють визначити фізичні характеристики зірки, такі як її спектральний й клас, температура, радіус та вік. Наприклад: низький  $B-V$  індекс (ближчий до нуля або негативний) вказує на гарячу зорю раннього спектрального класу. Високий  $B-V$  індекс вказує на холоднішу зорю пізніх спектральних класів [11]. Спостереження калібруються за полями зі стандартними зірками з відомими зоряними величинами, щоб забезпечити точність вимірювань та стандартизацію даних між різними обсерваторіями. Первинним каталогом стандартних зір є

площадки Ландольта [11, 12]. Їх зоряні величини в різних діапазонах ( $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ ) достатньо добре виміряні та служать основою для порівняння. Використовуючи ці стандарти така калібровка дозволяє астрономам отримувати дані, що є ключовими для астрономічних досліджень. Під час спостережень вимірюється блиск стандартних зір щоб скоригувати похибки інструментальних вимірювань, обумовлених відмінностями у пропусканні фільтрів. Це також дозволяє врахувати ефекти атмосфери, чутливість інструментів та інші фактори, які можуть впливати на точність вимірювань.

Таблиця 1.1. Довжини хвиль та півширина смуг пропускання фільтрів системи Johnson-Cousins, SDSS та деяких інших [1, 2, 5, 10]

| UBVRI                  |                 |      | Washington             |                 |      | SDSS                   |                 |      | Hipparcos              |                 |      | WFPC2                  |                 |      |
|------------------------|-----------------|------|------------------------|-----------------|------|------------------------|-----------------|------|------------------------|-----------------|------|------------------------|-----------------|------|
| $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |      | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |      | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |      | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |      | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |      |
| $U$                    | 3663            | 650  | $C$                    | 3982            | 1070 | $u'$                   | 3596            | 570  | $H_P$                  | 5170            | 2300 | F336                   | 3448            | 340  |
| $B$                    | 4361            | 890  | $M$                    | 5075            | 970  | $g'$                   | 4639            | 1280 | $B_T$                  | 4217            | 670  | F439                   | 4300            | 720  |
| $V$                    | 5448            | 840  | $T_1$                  | 6389            | 770  | $r'$                   | 6122            | 1150 | $V_T$                  | 5272            | 1000 | F555                   | 5323            | 1550 |
| $R$                    | 6407            | 1580 | $T_2$                  | 8051            | 1420 | $i'$                   | 7439            | 1230 |                        |                 |      | F675                   | 6667            | 1230 |
| $I$                    | 7980            | 1540 |                        |                 |      | $z'$                   | 8896            | 1070 |                        |                 |      | F814                   | 7872            | 1460 |

Зазвичай, обчислюються поправки, які застосовуються до даних, отриманих для зір поля, щоб забезпечити, що всі вимірювання відповідають стандартній шкалі. Під час спостережень світло зір проходить через земну атмосферу, яка може поглинати або розсіювати частину світла. Калібрування з використанням стандартних зір допомагає компенсувати ці атмосферні ефекти, забезпечуючи точність фотометричних вимірювань. Стандартизовані вимірювання дозволяють порівнювати дані, отримані з різних обсерваторій, що є критично важливим для глобальних астрономічних досліджень.

Використовуючи первинний і вторинний стандарти  $VRI$  Козінса, Ландольт [5] у 1983 р. визначив фотометричні стандарти  $UBVRI$  навколо екватора, що дало змогу використовувати ці стандарти як у північній, так і у південній півкулі для точної фотометрії. У 1993 р. Ландольт розширив свої фотометричні

стандарти для роботи з CCD- зображеннями, сформувавши масив з понад 15 000 стандартних зір [12].

Таким чином, використання стандартних зірок для калібрування є основою для отримання точних та надійних фотометричних даних. Фотометрична система Джонсона-Козінса пройшла значну еволюцію з моменту її створення в середині 20-го століття та стала основою для багатьох великих оглядових проєктів, таких як Sloan Digital Sky Survey (SDSS), які використовують схожі принципи фотометрії, але з більшим набором фільтрів.

## 1.2 Фотометрична система SDSS

Фотометрична система SDSS (Sloan Digital Sky Survey), — це широкосмугова система, що реалізується набором стандартних світлофільтрів, призначених для вимірювання яскравості астрономічних об'єктів у певних діапазонах довжин хвиль [5]. Вона була розроблена в рамках проєкту Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Проєкт було ініційовано та фінансовано Альфредом П. Слоуном (Alfred P. Sloan Foundation), а розробку системи здійснювала міжнародна команда астрономів та інженерів. Основними організаціями, що брали участь у розробці та реалізації проєкту були: Прінстонський університет (Princeton University), Чиказький університет (University of Chicago), Інститут перспективних досліджень (Institute for Advanced Study), Університет Джона Гопкінса (Johns Hopkins University), Обсерваторія Апач-Пойнт (Apache Point Observatory). Розробка системи була тісно пов'язана з інноваціями в галузі астрономічної фотометрії та технологій зйомки неба [8, 9].

Система SDSS складається з п'яти основних смуг:  $u'$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$  та  $z'$ , які охоплюють ультрафіолетовий, видимий та ближній інфрачервоний діапазони спектра. Ці смуги використовуються для фільтрації та вимірювання світла, що випромінюються астрономічними об'єктами:  $u'$ - (ultraviolet), вимірюється ультрафіолетовий діапазон приблизно 300-400 нм.  $g'$ - (green), вимірюється зелена частина видимого спектра приблизно 400-550 нм.  $r'$ - (red), охоплює червону частину видимого спектра приблизно 550-700 нм.  $i'$ - (infrared), охоплює ближній інфрачервоний діапазон приблизно 700-850 нм.  $z'$ - (infrared),

охоплює довші довжини хвиль у ближньому інфрачервоному спектрі приблизно 850-1000 нм. Кожен з цих фільтрів пропускає світло в заданому діапазоні довжин хвиль, що дозволяє отримувати багато спектральних даних [8]. У даній системі показники кольору визначаються як різниця зоряних величин у різних фільтрах цієї системи. Основні показники кольору, які використовуються для класифікації зір, включають:  $(g - r) = m_g - m_r$ ,  $(r - i) = m_r - m_i$ ,  $(i - z) = m_i - m_z$ . Де  $m_g$ ,  $m_r$ ,  $m_i$ ,  $m_z$  — зоряні величини у відповідних фільтрах. Показники кольору в SDSS дозволяють ефективно класифікувати зорі за їх температурою та спектральним класом, а також оцінювати міжзоряне поглинання та фотометричні червоні зсуви [8]. В таблиці 1.2 представлено порівняння ефективних довжин хвиль та напівширини пропускання цієї системи з деякими іншими. Міжзоряне поглинання впливає на спостережувані зоряні величини, оскільки пил і газ у Галактиці розсіюють і поглинають світло, особливо у короткохвильовій частині спектра. У фотометричній системі SDSS корекція за міжзоряне поглинання враховується шляхом застосування поправок до виміряних зоряних величин у кожному фільтрі, як і у випадку системи UBVRI:  $A_\lambda = R_\lambda * E(B - V)$ , де:  $A_\lambda$  — поглинання у відповідному фільтрі,  $R_\lambda$  — коефіцієнт поглинання для фільтра,  $E(B - V)$  — ступінь міжзоряного поглинання.

Для системи SDSS використовуються коефіцієнти  $R_g$ ,  $R_r$ ,  $R_i$ ,  $R_z$ , які визначають, наскільки кожен фільтр піддається впливу міжзоряного поглинання [8]. Корекція за міжзоряне поглинання є важливою для точного визначення фізичних характеристик зір і галактик. Принцип роботи системи полягає у фільтрації світла від об'єкта через ці фільтри та подальшому вимірюванні його інтенсивності. Отримані дані дозволяють будувати спектральний розподіл енергії об'єкта, що є ключовим для визначення його фізичних характеристик, таких як температура, металічність та почервоніння.

Таблиця 1.2. Порівняльні характеристики фільтрів системи Джонсона-Козінса, Sloan Digital Sky Survey та телескопа Габбла [5, 10]

| UBVRI    |                        |                 | SDSS      |                        |                 | WFPC2 |                        |                 |
|----------|------------------------|-----------------|-----------|------------------------|-----------------|-------|------------------------|-----------------|
|          | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |           | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |       | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\Delta\lambda$ |
| <i>U</i> | 3663                   | 650             | <i>u'</i> | 3596                   | 570             | F336  | 3448                   | 340             |
| <i>B</i> | 4361                   | 890             | <i>g'</i> | 4639                   | 1280            | F439  | 4300                   | 720             |
| <i>V</i> | 5448                   | 840             | <i>r'</i> | 6122                   | 1150            | F555  | 5323                   | 1550            |
| <i>R</i> | 6407                   | 1580            | <i>i'</i> | 7439                   | 1230            | F675  | 6667                   | 1230            |
| <i>I</i> | 7980                   | 1540            | <i>z'</i> | 8896                   | 1070            | F814  | 7872                   | 1460            |

Важливою особливістю системи SDSS є те, що фільтри мають чітко визначені діапазони пропускання без значного перекриття між ними. Це забезпечує точніші та надійніші фотометричні вимірювання порівняно з іншими системами, де фільтри можуть мати значне перекриття. Калібрування системи здійснюється за допомогою стандартних зірок з відомими характеристиками, що дозволяє мінімізувати систематичні похибки та забезпечити високу точність вимірювань [8]. Завдяки цим особливостям, фотометрична система SDSS стала стандартом у багатьох астрономічних дослідженнях, забезпечуючи однорідність та порівнянність даних, отриманих різними дослідниками та обсерваторіями. На Рис. 1.2 показані криві пропускання фільтрів системи SDSS.

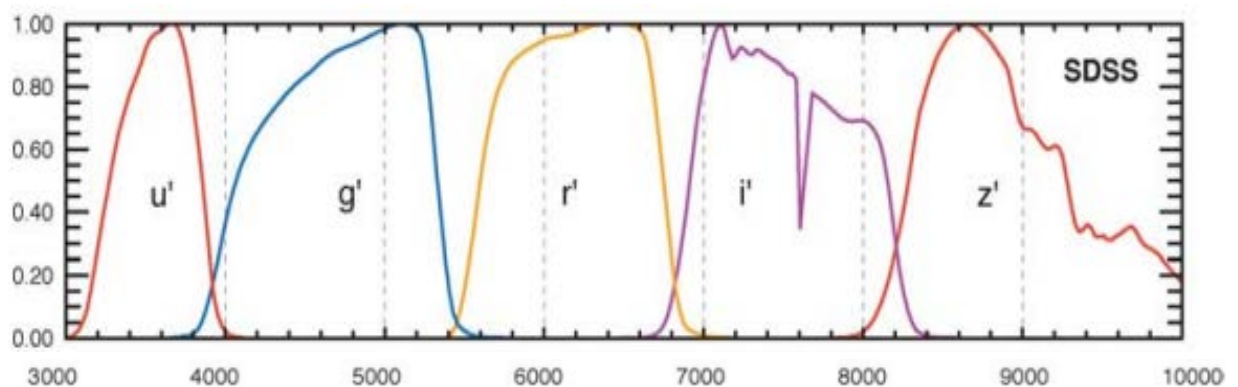


Рисунок 1.2. Графік кривих пропускання фільтрів, системи Sloan Digital Sky Survey [5]

Оскільки різні фотометричні системи мають власні набори фільтрів і характеристики, для порівняння та об'єднання даних необхідно використовувати перехідні рівняння. Вони дозволяють конвертувати зоряні величини між системами SDSS та Johnson-Cousins, що важливо для калібрування та аналізу спостережень. В Таблиці 1.3 приведені формули перетворення SDSS в *UBVRI* [8].

Таблиця 1.3. Формули перетворення SDSS в Johnson-Cousins [8]

For stars with  $(B - V) \leq +1.5$ :

|             |     |                             |                              |
|-------------|-----|-----------------------------|------------------------------|
| $g'$        | $=$ | $V + 0.56 (B - V) - 0.12$   |                              |
| $r'$        | $=$ | $V - 0.49 (B - V) + 0.11$   |                              |
| $r'$        | $=$ | $V - 0.84 (V - R_C) + 0.13$ |                              |
| $(u' - g')$ | $=$ | $1.38 (U - B) + 1.14$       |                              |
| $(g' - r')$ | $=$ | $1.05 (B - V) - 0.23$       |                              |
| $(r' - i')$ | $=$ | $0.98 (R_C - I_C) - 0.23$   | for $(R_C - I_C) < +1.15$    |
| $(r' - i')$ | $=$ | $1.40 (R_C - I_C) - 0.72$   | for $(R_C - I_C) \geq +1.15$ |
| $(r' - z')$ | $=$ | $1.59 (R_C - I_C) - 0.40$   | for $(R_C - I_C) < +1.65$    |
| $(r' - z')$ | $=$ | $2.64 (R_C - I_C) - 2.16$   | for $(R_C - I_C) \geq +1.65$ |

Коефіцієнти  $k_x(z)$  для перетворень залежать від показника кольору об'єкта. Оскільки ефекти почервоніння можуть суттєво впливати на фотометричні спостереження, більш точні оцінки потребують використання корекцій та моделей спектральної еволюції, таких як PEGASE або GALAXEV. Такі рівняння допомагають коректно інтерпретувати фотометричні дані з різних оглядів неба та забезпечують узгодженість між різними наборами спостережень [5, 9]. На Рис. 1.3 представлено порівняння кривих пропускання фільтрів, системи Sloan Digital Sky Survey та системи Johnson-Cousins.

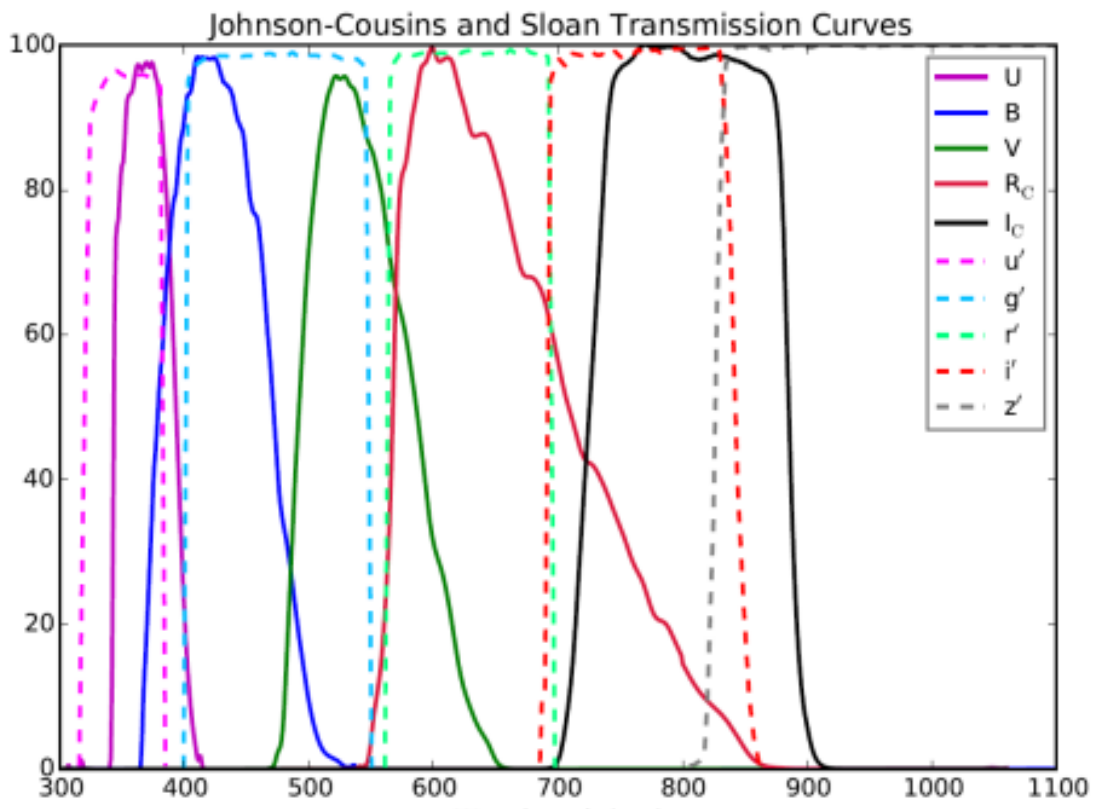


Рисунок 1.3. Графік порівняння кривих пропускання фільтрів, системи Sloan Digital Sky Survey та системи Johnson-Cousins [6]

### 1.3 Фотометрична система Pan-STARRS DR1

Фотометрична система Pan-STARRS DR1 (Data Release 1) є частиною проекту Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) [7, 14]. Ця система була створена для проведення ширококутних оглядів неба з використанням телескопа PS1, розташованого на Гавайях. Історія створення фотометричної системи Pan-STARRS тісно пов'язана з розвитком проекту, спрямованого на проведення ширококутних оглядів неба з високою чутливістю [14]. Проект Pan-STARRS був ініційований Інститутом астрономії Гавайського університету з метою створення системи для виявлення та відстеження небезпечних об'єктів, таких як астероїди, що можуть загрожувати Землі. Одним із основних завдань було створення телескопа з великим полем зору та високою чутливістю. Телескоп PS1 (Pan-STARRS1) став першим інструментом проекту, який було встановлено на вершині вулкану Халеакала на острові Мауї, Гаваї [7]. У 2016 році був випущений перший набір даних (Data Release 1, DR1), який містив інформацію про мільярди об'єктів на небі. DR1 став найбільшим

астрономічним каталогом на той час, доступним для наукової спільноти. Проект продовжує розвиватися, використовуючи отримані дані для дослідження різних астрономічних явищ, включаючи змінні зірки, галактики, наднові та інші об'єкти [7]. Ведеться робота над вдосконаленням технологій обробки та аналізу даних для покращення якості та точності спостережень.

Фотометрична система використовує п'ять широкосмугових фільтрів:  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$  та  $y$ . Ці фільтри мають такі центральні довжини хвиль:  $g$  - 481 нм;  $r$  - 617 нм;  $i$  - 752 нм;  $z$  - 866 нм;  $y$  - 962 нм. Кожен фільтр охоплює певний діапазон довжин хвиль, що дозволяє отримувати детальні зображення неба в різних спектральних діапазонах. Це сприяє вивченню різноманітних астрономічних об'єктів та явищ, таких як змінні зорі, галактики та об'єкти Сонячної системи. Фотометрична система охоплює широкий спектр довжин хвиль від видимого світла до ближнього інфрачервоного. Pan-STARRS DR1 має високу чутливість і здатна виявляти об'єкти з дуже низькою яскравістю, що дозволяє фіксувати слабкі галактики, зірки та інші небесні об'єкти [10, 14]. На Рис. 1.4 показані криві пропускання фільтрів системи Pan-STARRS DR1 та спектральна чутливість ПЗЗ камери.

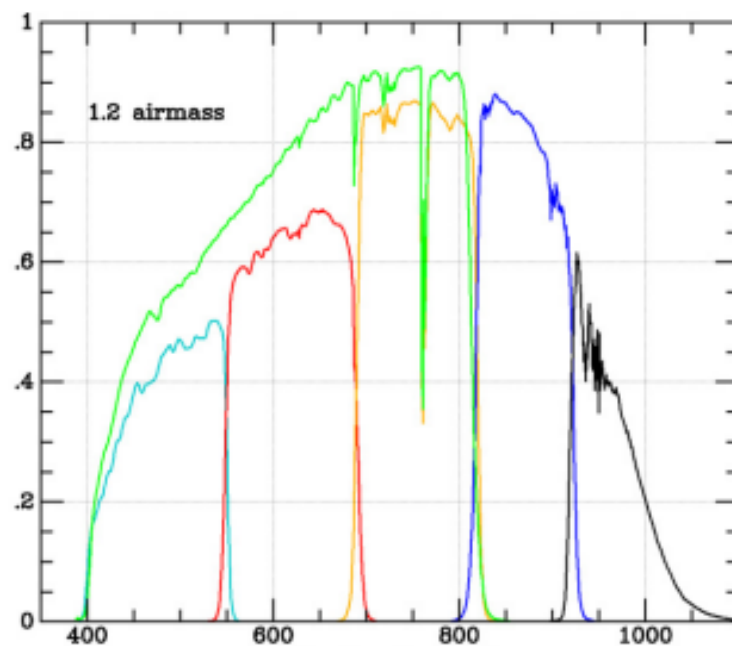


Рисунок 1.4. Графік кривих пропускання фільтрів, системи Pan-STARRS DR1 [10, 14].

Основні цілі проекту включають вивчення змінних об'єктів, відкриття нових астероїдів і комет, а також створення високоякісних фотометричних оглядів неба [7]. В Таблиці 1.4 представлені довжини хвиль пропускання фільтрів системи Pan-STARRS.

Таблиця 1.4. Довжини хвиль пропускання фільтрів системи Pan-STARRS [10]

| Filter      | $\langle A \rangle$ | $\lambda_{\text{eff}}$ | $\lambda_B$ | $\lambda_R$ |
|-------------|---------------------|------------------------|-------------|-------------|
| <i>g</i> P1 | 0.1212              | 481                    | 414         | 551         |
| <i>r</i> P1 | 0.1463              | 617                    | 550         | 689         |
| <i>i</i> P1 | 0.1435              | 752                    | 690         | 819         |
| <i>z</i> P1 | 0.0980              | 866                    | 818         | 922         |
| <i>y</i> P1 | 0.0393              | 962                    | 918         | 1001        |

Телескоп: PS1 має апертуру 1.8 метра і використовує цифрову камеру з надзвичайно великим полем зору близько 7 квадратних градусів. PS1 здійснює систематичні огляди неба, збираючи зображення з великою роздільною здатністю. CCD-камера складається з 1.4 мільярда пікселів, що дозволяє фіксувати детальні зображення небесних об'єктів [7]. Зібрані зображення проходять обробку для корекції атмосферних спотворень, видалення шуму та калібрування. На Рис. 1.5 представлено порівняння кривих пропускання фільтрів BVRI та Pan-STARRS1. Отримані зоряні величини у фотометричній системі Pan-STARRS можна трансформувати в інші фотометричні системи такі як SDSS, UBVRI використовуючи перехідні формули. Як приклад такої трансформації можна привести роботи [9, 10, 13]. Більш детальна інформація з порівнянням наших визначень приведена у розділі 3.

Отримані дані зберігаються в архіві Pan-STARRS1 і доступні для наукової спільноти. Завдяки цьому процесу Pan-STARRS забезпечує постійне оновлення інформації про стан Всесвіту, допомагаючи астрономам виявляти нові об'єкти, досліджувати космічні явища та спостерігати за змінними зірками, галактиками, астероїдами та іншими небесними тілами [7].

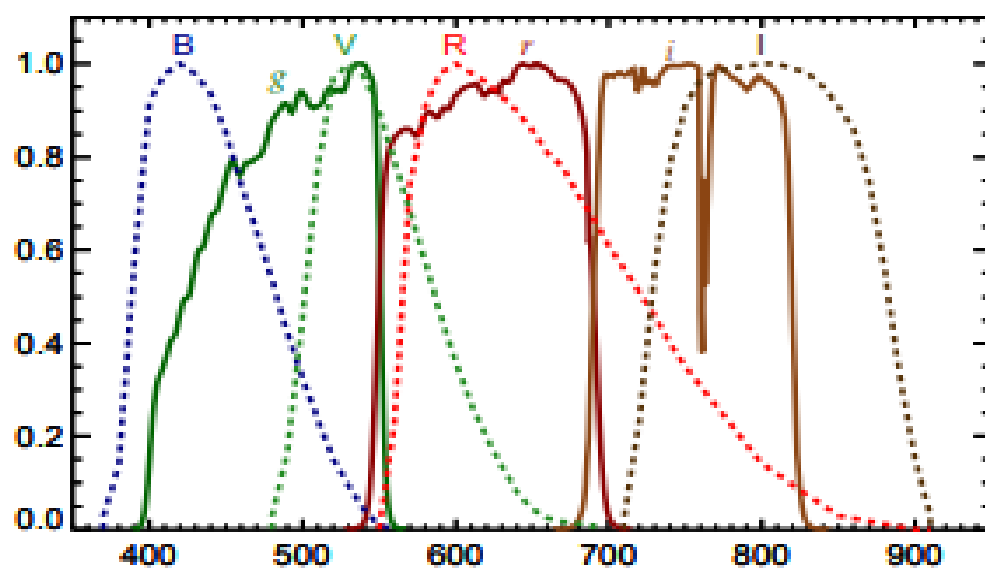


Рисунок 1.5. Порівняння кривих пропускання фільтрів *BVRI* та Pan-STARRS1

## РОЗДІЛ 2. Методика дослідження фотометричних систем

Методика дослідження фотометричних систем є ключовою для аналізу зір, галактик та інших астрономічних об'єктів. Фотометричні системи — це набір стандартних фільтрів, які використовуються для вимірювання інтенсивності випромінювання об'єкта в певних діапазонах спектру таких як, UBVRI, SDSS та інші. Основні етапи дослідження являються: калібрування інструментів, що включає визначення коефіцієнтів передачі для фотометричної системи, використовуючи стандартні зорі, та спостереження об'єктів, що здійснюється за допомогою телескопів, обладнаних CCD-камерами або іншими детекторами. Редукція даних полягає у виправленні зображень та видаленні шуму. Переведення у стандартну систему, порівняння отриманих даних із стандартними зорями для переведення значень в універсальні одиниці.

### 2.1 Відбір зір стандартів, що задають фотометричну систему

Зорі-стандарты виконують роль еталонів для вимірювання світлових характеристик інших небесних об'єктів. Для цього важливо вибирати зорі з відомими та стабільними фотометричними властивостями, такими як спектральний тип, яскравість, показники кольору, розташування на небі і стабільність блиску. Вибір правильних зір стандартів дозволяє отримати точні й надійні результати в астрономічних вимірюваннях [5]. Стабільність блиску зір-стандартів є критично важливою для точного калібрування фотометричних систем. Зорі-стандарты повинні мати постійну яскравість, щоб забезпечити надійні та відтворювані результати спостережень. Вега ( $\alpha$  Ліри) тривалий час використовувалася як еталонна зоря для калібрування фотометричних систем, оскільки її блиск вважався постійним. Однак, дослідження показали, що Вега може бути слабкою змінною зорею типу  $\delta$  Щита, з амплітудою змінності близько  $\pm 0.03$  зоряної величини. Це ставить під сумнів її використання як абсолютного стандарту. Зорі-стандарты повинні демонструвати мінімальні або відсутні зміни яскравості з часом. Зорі, схильні до пульсацій або інших внутрішніх змін, можуть спричиняти варіації у блиску, що негативно впливає

на калібрування. Подвійні або кратні зоряні системи можуть мати змінний сумарний блиск через орбітальні рухи компонентів. Вибір зір-стандартів для фотометричних систем повинен базуватися на ретельному аналізі їхньої стабільності блиску [2, 5, 11]. Використання зір із підтвердженою змінністю, навіть незначною, може призвести до систематичних похибок у фотометричних вимірюваннях. У фотометричних системах для калібрування використовуються зорі-стандарти, які мають добре визначені фотометричні характеристики. До таких зір належать: Сіріус ( $\alpha$  Великого Пса): найяскравіша зоря нічного неба, спектральний клас A1V, використовується як стандарт у деяких фотометричних системах; Альтаір ( $\alpha$  Орла), біла зоря спектрального класу A7V, одна з найяскравіших зір північної півкулі; Канопус ( $\alpha$  Кіля), друга за яскравістю зоря нічного неба, використовується як стандарт у південній півкулі; Полярна зоря ( $\alpha$  Малої Ведмедиці): жовтий надгігант, служить стандартом завдяки своїй відносній стабільності та положенню близько до північного небесного полюса. Використання цих зір як стандартів дозволяє забезпечити точність та узгодженість фотометричних вимірювань у різних астрономічних дослідженнях [2, 7]. Зорі з різними температурами мають відмінні спектральні енергетичні розподіли. Для калібрування необхідно охоплювати широкий температурний діапазон. У системі не повинно бути переваги для певного типу зір, щоб уникнути систематичних похибок. Зазвичай, для цього використовуються гарячі зорі (клас O, B) з температурами вище 10000 K, сонцеподібні зорі (клас G, F) з температурами близько 5000–6000 K та холодні зорі (клас K, M) з температурами нижче 4000 K. Температурний та спектральний діапазон зір-стандартів є ключовими параметрами для забезпечення точності та універсальності фотометричних систем [2, 5]. Спектральні класи зір-стандартів визначаються їхніми спектральними характеристиками та лініями поглинання. Фотометрична система повинна бути здатною враховувати ці спектральні особливості. Вибір зір-стандартів, що охоплюють цей спектральний та температурний діапазон, забезпечує надійне калібрування фотометричних систем для різноманітних астрономічних досліджень [1, 2, 5] Яскравість зірок,

або їхня світність, є також однією з основних характеристик, що визначають їхню видиму величину та класифікацію. У фотометричних системах зорі-стандарти обираються з урахуванням їхньої яскравості, щоб забезпечити точне калібрування інструментів [11, 14]. Розташування зірок-стандартів на небі є важливим фактором для їх вибору у фотометричних системах. Вони повинні бути добре розподілені по небесній сфері, щоб забезпечити зручність спостережень і калібрування для різних широт і сезонів. Основними критеріями є: географічне розташування спостерігача (зорі-стандарти обираються таким чином, щоб бути доступними як для північної, так і для південної півкулі). Важливо, щоб зорі-стандарти мали достатню висоту над горизонтом під час спостережень, що зменшує вплив атмосферного поглинання. Довготривалі спостереження зір-стандартів у фотометричних системах є критично важливими для забезпечення точності та надійності астрономічних вимірювань. Регулярний моніторинг цих зір дозволяє виявляти та враховувати можливі зміни їхніх характеристик, що можуть вплинути на калібрування інструментів [9, 11]. Деякі зорі, які раніше вважалися стабільними, можуть демонструвати слабку змінність блиску. Довготривалі спостереження допомагають ідентифікувати такі зміни та коригувати фотометричні дані відповідно. У якості прикладу у Таблиці 2.1 показано точність визначення зоряних величин та показників кольору для стандартних зір з каталогів Ландольта [12].

Таблиця 1.2. Точність визначення зоряних величин та показників кольору для стандартних зір [12]

|            | Mean Errors of a Single Observation | Mean Errors of the Mean |
|------------|-------------------------------------|-------------------------|
| <i>V</i>   | $0.0144 \pm 0.0011$                 | $0.0036 \pm 0.0004$     |
| <i>B-V</i> | $0.0191 \pm 0.0022$                 | $0.0051 \pm 0.0008$     |
| <i>U-B</i> | $0.0492 \pm 0.0085$                 | $0.0143 \pm 0.0036$     |
| <i>V-R</i> | $0.0115 \pm 0.0008$                 | $0.0029 \pm 0.0003$     |
| <i>R-I</i> | $0.0166 \pm 0.0013$                 | $0.0040 \pm 0.0003$     |
| <i>V-I</i> | $0.0207 \pm 0.0015$                 | $0.0050 \pm 0.0004$     |

Таким чином, використання стандартних зірок для калібрування є основою для отримання точних та надійних фотометричних даних. Основними проблемами і викликами є визначення температури для зір у багатих пилом регіонах, де міжзоряне поглинання змінює показники кольору, та дефіцит холодних зір у каталозі стандартів через їх низьку яскравість [7, 9]. Вибір зір-стандартів для фотометричних систем повинен базуватися на ретельному аналізі їхньої стабільності блиску. Використання зір із підтвердженою змінністю, навіть незначною, може призвести до систематичних похибок у фотометричних вимірюваннях [5].

## **2.2 Використання електронного атласу Aladin для відбору стандартних зір що задають фотометричну систему.**

Aladin — це інтерактивний атлас неба, розроблений Центром астрономічних даних у Страсбурзі. Він дозволяє користувачам візуалізувати оцифровані астрономічні зображення, накладати дані з астрономічних каталогів та баз даних, а також інтерактивно отримувати інформацію з бази даних SIMBAD, сервісу VizieR та інших архівів для всіх відомих астрономічних об'єктів у полі зору [4, 6] Aladin надає доступ до понад 20 000 колекцій даних, включаючи DSS, SDSS, PanSTARRS, Skymapper, Gaia, SIMBAD, NED, VizieR та інші. Програма підтримує масштабування, панорамування, обертання, накладання, багатовіконний режим, різні проєкції та координатні системи FK4, FK5, ICRS, GAL, SGAL, ECL. Вона також підтримує більшість астрономічних форматів зображень, таблиць та інших даних. Aladin підтримує стандарти VO, такі як JSAMP, TAP, CS, SSA, SIA, що забезпечує інтеграцію з іншими інструментами та сервісами [16, 17]. Його можна розширювати за допомогою власних Java-плагінів, якщо потрібний алгоритм ще не реалізований у базовій версії. Aladin доступний у двох версіях: Aladin Desktop: повнофункціональний додаток, який потребує встановлення на комп'ютер. Він забезпечує широкий спектр інструментів для професійних астрономів та дослідників. Aladin Lite: полегшена версія, яка працює безпосередньо в браузері без потреби в установці. Вона призначена для простої візуалізації області неба та легко

вбудовується на будь-яку вебсторінку [19]. З моменту свого створення у 1999 році, Aladin став широко використовуваним інструментом у спільноті Віртуальної обсерваторії, здатним вирішувати завдання з пошуку, доступу та вивчення розподілених наборів даних, а також візуалізації багатохвильових даних. Його можливості роблять його потужним інструментом для дослідження та інтеграції даних, а також сприяють науковим відкриттям [4, 18]. Aladin пропонує багатий функціонал, що може бути складним для нових користувачів. Інтерфейс може здатися громіздким, особливо на малих екранах, через велику кількість доступних опцій та інформації. Для доступу до більшості астрономічних баз даних та каталогів необхідне стабільне інтернет-з'єднання, що може бути обмеженням у випадку нестабільного або повільного інтернету. Іноколи виникають проблеми з сумісністю Aladin з іншими програмами або сервісами, що може ускладнити інтеграцію та використання в комплексних робочих процесах [17]. Aladin вимагає наявності встановленої Java Runtime Environment (JRE) для коректної роботи, що може бути додатковим кроком для користувачів, не знайомих з цією технологією. Врахування цих аспектів може допомогти користувачам ефективніше використовувати Aladin Sky Atlas та мінімізувати можливі труднощі. Aladin Sky Atlas є одним із найзручніших інструментів для роботи з астрономічними даними, і його можливості роблять процес відбору стандартних зір ефективним і точним [4]. Для пошуку і візуалізації області неба задаються координати області неба, яку хочете дослідити, або назву об'єкта. Aladin дозволяє візуалізувати вибрану область неба за допомогою оглядів, таких як SDSS та PanSTARRS, щоб визначити зорі, які можуть бути кандидатами на стандартні. Також він дозволяє накладати дані з цих та інших каталогів, які містять інформацію про яскравість, кольорові індекси, паралакс, власний рух та спектральні класи зір. Він допоможе отримати детальну інформацію про кожну зорю з бази даних SIMBAD, включаючи металічність, змінність, радіальну швидкість тощо. Також в нього є функція накладання таблиць яка дозволяє фільтрувати зорі за певними критеріями. Яскравість (Magnitude): Вибір зір із певним діапазоном зоряних

величин. Фільтрування за параметрами B-V, G-BP, G-RP для визначення температури зір. Вибір зір із надійними паралаксами для забезпечення точності відстаней і уникнення об'єктів із надто великим власним рухом. Є можливість виключити змінні зорі, фільтруючи об'єкти за змінністю. Aladin дозволяє накладати карти міжзоряного поглинання на область спостереження. На рисунку 2.1 зображено інтерактивний зоряний атлас неба Aladin.

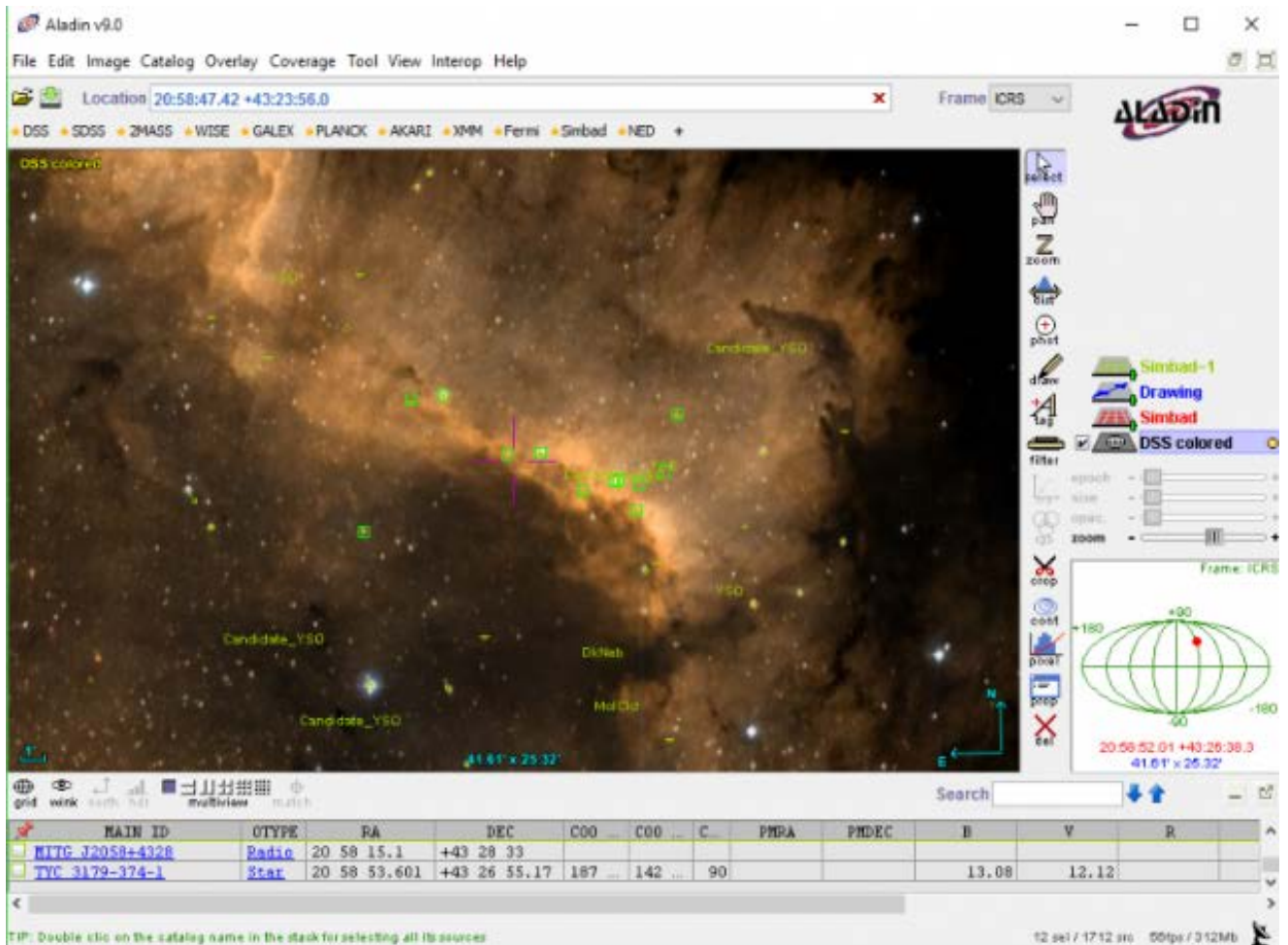


Рисунок 2.1 Інтерактивний зоряний атлас неба Aladin [17]

Після вибору зір за допомогою відповідного фільтрування Aladin дозволяє експортувати їх у файл CSV або VO-таблицю для подальшого аналізу або використання в інших програмах. Використовуючи інформацію з каталогів можна перевірити, чи є зорі стабільними. Зоряний атлас Aladin – потужний інструмент для аналізу та візуалізації астрономічних даних. Завдяки широкому набору функцій, інтеграції з базами даних та зручному інтерфейсу, він є незамінним для досліджень глибокого космосу. Aladin надає можливість

вченим і аматорам легко знаходити, порівнювати та аналізувати об'єкти Всесвіту. Сприяючи новим відкриттям у сучасній астрономії [18].

### **2.3 Телескоп АЗТ-8 та його фотометрична система**

Чугуївська спостережна станція НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна також Обсерваторія Гракове, — астрономічна обсерваторія, розташована у районі села Іванівка, Чугуївський район, Харківська область, в безпосередній близькості від радіотелескопа УТР-2, підпорядкованого Радіоастрономічному інституту НАН України (рис. 2.2). У лабораторно-житловому корпусі спостережної станції знаходиться когерентно-оптична установка, включена до Реєстру наукового національного надбання України. Встановлена на спостережній станції в 1974 р., вона стала однією з перших у світі установок для усунення розмиття астрономічних зображень атмосферою методом спекл-інтерферометрії. Установка використовувалася для обробки фотографій поверхні Марса автоматичними міжпланетними станціями Марс-3, Марс-4, Марс-5 та обробки спостережень проходження Меркурія по диску Сонця. За час роботи, проведеної на установці, співробітники обсерваторії В.М. Дудінов, Д.Г. Станкевич, В.С. Цвєткова та Ю.Г. Шкуратов отримали Державну премію України в галузі науки та техніки [3, 20].

На території спостережної станції встановлено телескоп АЗТ-8. Його основні характеристики: азимутальний (АЗТ) телескоп із системою Ньютона та Кассегрена, діаметр головного дзеркала 70 см, фокусна відстань головного фокуса 2800 мм, фокуса Кассегрена 10500 мм. Поле зору залежить від встановлених приладів, і зазвичай становить 12-30 кутових хвилин [3]. Це основний телескоп НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Він використовується для фотометричних спостережень, визначення яскравості астрономічних об'єктів, астрометричних вимірювань, вивчення змінних зір, комет, астероїдів та інших космічних об'єктів, спостереження об'єктів із тимчасовими змінами блиску, таких як наднові, транзити екзопланет та спалахи гамма-сплесків. Телескоп АЗТ-8 широко

використовується для регулярного моніторингу змінних явищ і дослідження об'єктів, які потребують точного фотометричного аналізу. Його дані мають значення для розуміння еволюції зірок, динаміки Сонячної системи та інших космічних процесів. Він працює в основному в фотометричній системі Джонсона-Козінса у різних спектральних діапазонах [3].



Рисунок 2.2. Чугуївська спостережна станція НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна [19, 20]

У 2001 році на телескопі була встановлена ПЗЗ-камера IMG 1024S американської фірми FLI, що значно підвищило ефективність спостережень. Крім того, для поляриметричних спостережень застосовувалися електрофотометри на основі фотоелектронних помножувачів ФЕП-79, які працювали в режимі підрахунку фотонів. Ці прилади використовувалися для спостережень у фотометричній системі UBVRI Джонсона-Козінса. Телескоп АЗТ-8 оснащений фотометричною системою, яка забезпечує високу точність вимірювань. Зокрема, при використанні електрофотометра на основі фотоелектронного помножувача ФЕП-79 у режимі підрахунку фотонів, точність одиничного вимірювання блиску для зірки 11-ї зоряної величини становить

приблизно 1%, а для зірки 14-ї зоряної величини — близько 5%. Точність абсолютної фотометрії для зірок 11–13 зоряної величини складає приблизно 2–4% [3, 4]

У 2006 р. телескоп був оснащений ПЗЗ-камерою FLI 47-10. У цій камері використовується матриця  $1058 \times 1027$  пікселів з розміром пікселя  $13 \times 13$  мікрон та лінійним розміром матриці  $13.4 \times 13.4$  мм. При цьому, у використаній змінній системі Ньютона поле зору становить  $16.2 \times 16.2$  кут. хвилини з роздільною здатністю близько  $1''/\text{піксель}$ . Квантова ефективність ПЗЗ-матриці IMG 47-10 в діапазоні довжин хвиль 0.55–0.75 мкм складає 93 % – що дає можливість проводити високоякісні фотометричні спостереження більш слабких об'єктів (16-17 зор вел.). Матриця охолоджується елементами Пельтьє до температури  $-50 \pm 0.2^\circ\text{C}$  відносно температури навколишнього середовища. Нерівномірність чутливості матриці по полю не гірше 3% і враховується при спостереженні плоских полів [3, 4]. Всі ці прилади працювали в фотометричній системі Джонсона-Козінса.

Нажаль, територія станції була окупована росіянами в перші ж тижні російського вторгнення в Україну, на початку березня 2022 року, а звільнена українською армією під час Слобожанського контрнаступу у вересні 2022 року. Протягом шести місяців окупації на спостережній станції перебували російські солдати, які сильно пошкодили й пограбували станцію [15, 20] Російські солдати жили в будівлі обсерваторії, залишивши по собі купи мотлоху, написи на дверях, вкравши і розтрощивши багато речей. В підвалі вони, ймовірно, облаштували свій бункер і спали прямо на когерентно-оптичному процесорі зображень, — національному надбанні України. З майстерні винесли майже все обладнання. На горищі облаштували вогневі точки для снайперів, у дворі — бліндаж з ящиків та шаф. На стіні одноповерхового будинку («будиночок Акімова») намалювали мішень і стріляли по ній з вогнепальної зброї, сильно пошкодивши будинок.



Рисунок 2.3. Телескоп АЗТ-8. [3, 20]

Окупанти викрали електричні мотори, які забезпечували рух телескопа АЗТ-8 і відкривання купола телескопа Бейкер-Шмідта. З обох телескопів зняли дорогі ПЗЗ-камери й використали їх як мішені в тирі перед «будиночком Акімова». Розбили блоки керування рухом телескопа АЗТ-8, викрали метеорний патруль — установку з 5 відеокамер для постійного огляду неба в пошуках метеорів та комп'ютери, що використовувались для керування телескопами. Під час риття окопів окупанти перебили електричний кабель, що позбавило обсерваторію електрики. Після звільнення станції співробітники НДІ астрономії на зібрані кошти провели консервацію приміщень та обладнання, щоб захистити їх від погодних умов та вандалізму. Тривалий час територія станції залишалася замінованою, на ній знаходили нерозірвані снаряди та уламки ракет [20].

### **РОЗДІЛ 3. Коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1**

У сучасній астрономії широко застосовуються різні фотометричні системи, серед яких особливе місце займають системи Johnson-Cousins та Pan-STARRS1 (PS1). Однак, враховуючи різноманіття інструментів і методів спостережень, виникає необхідність у створенні надійних методик для переходу між цими системами. Розробка таких методів є важливим кроком до уніфікації астрономічних спостережень та вдосконалення моделювання астрофізичних процесів. Для перетворення фотометричних величин між системами Johnson-Cousins та Pan-STARRS1 DR1 використовуються певні коефіцієнти. Точність цих перетворень може залежати від спектральних характеристик об'єктів та умов спостереження. Для реалізації фотометричних систем Johnson-Cousins та Pan-STARRS DR1 використовуються набори стандартних зір, які забезпечують точність та узгодженість фотометричних вимірювань. Відмінності у фільтрах обумовлюють необхідність визначення коефіцієнтів переходу між цими системами для коректного порівняння та об'єднання даних з різних джерел. Визначення таких коефіцієнтів переходу базується на спостереженнях спільних зір у обох системах та побудові відповідних апроксимаційних поліномів, які враховують показники кольору зір. Цей процес дозволяє мінімізувати систематичні похибки та забезпечити узгодженість фотометричних даних між різними системами. Розуміння та застосування коефіцієнтів переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS1 є ключовим для сучасних астрономічних досліджень, дозволяючи інтегрувати дані з різних оглядів неба та забезпечувати їхню порівнюваність.

#### **3.1 Набір зір-стандартів для реалізації фотометричних систем Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1**

На сьогодні фотометричні системи Джонсона-Козінса та Pan-STARRS1 (PS1) є основними інструментами для вимірювання та калібрування зоряних величин у різних діапазонах електромагнітного спектру. Для забезпечення точності та узгодженості фотометричних спостережень у цих системах використовуються набори стандартних зір, які служать еталонами для

калібрування інструментів та перевірки отриманих даних. Для калібрування системи *UBVRI* використовуються стандартні зорі, визначені Арло Ландольтом на протязі більше 20 років [12]. Він створив каталог, що містить понад 15 000 зір, які спостерігалися протягом 224 ночей у 69 спостережних сесіях. У таблиці 3.1 наведено приклади полів з відповідного каталогу. Ці зорі мають стандартні похибки менше 0.01 зор. вел. та не демонструють змінності на рівні цієї точності. Цей набір стандартів дозволяє астрономам калібрувати свої спостереження з високою точністю та забезпечувати узгодженість даних між різними обсерваторіями.

Таблиця 3.1. Приклад стандартних полів Ландольта для системи Джонсона – Козінса [12]

| Star<br>(1) | $\alpha$ (J2000.0)<br>(2) | $\delta$ (J2000.0)<br>(3) | $V$<br>(4) | $B - V$<br>(5) | $U - B$<br>(6) | $V - R$<br>(7) | $R - I$<br>(8) | $V - I$<br>(9) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| GD 2B       | 00 07 25.484              | +33 19 00.17              | 13.279     | +0.588         | -0.001         | +0.350         | +0.349         | +0.697         |
| GD 2A       | 00 07 26.174              | +33 18 19.18              | 14.853     | +0.912         | +0.684         | +0.530         | +0.462         | +1.002         |
| GD 2        | 00 07 32.261              | +33 17 27.62              | 13.802     | -0.295         | -1.192         | -0.142         | -0.171         | -0.313         |
| GD 2C       | 00 07 32.355              | +33 20 14.69              | 13.314     | +0.619         | +0.081         | +0.360         | +0.357         | +0.718         |
| GD 2E       | 00 07 36.675              | +33 17 41.73              | 15.188     | +0.575         | +0.076         | +0.339         | +0.323         | +0.652         |
| GD 2D       | 00 07 41.634              | +33 17 57.33              | 14.255     | +0.605         | +0.007         | +0.355         | +0.370         | +0.729         |
| GD 410      | 00 35 24.704              | +60 58 11.27              | 12.845     | +0.725         | +0.086         | +0.441         | +0.438         | +0.879         |
| GD 8C       | 00 39 37.145              | +31 37 03.40              | 13.299     | +0.636         | +0.140         | +0.371         | +0.358         | +0.724         |
| GD 8A       | 00 39 40.965              | +31 32 44.53              | 14.593     | +0.695         | +0.199         | +0.400         | +0.378         | +0.780         |
| GD 8B       | 00 39 44.863              | +31 36 36.48              | 13.653     | +0.803         | +0.454         | +0.446         | +0.395         | +0.837         |
| GD 8        | 00 39 52.163              | +31 32 29.19              | 14.699     | -0.275         | -1.169         | -0.145         | -0.197         | -0.348         |
| SA 20-245   | 00 44 21.182              | +45 55 12.77              | 8.951      | +0.866         | +0.575         | +0.476         | +0.421         | +0.894         |
| SA 20-130   | 00 44 44.437              | +45 49 50.97              | 11.032     | +1.052         | +0.845         | +0.553         | +0.514         | +1.069         |
| SA 20-133   | 00 44 49.522              | +45 44 57.85              | 10.824     | +0.457         | +0.138         | +0.268         | +0.260         | +0.528         |
| SA 20-139   | 00 45 13.834              | +45 47 48.08              | 11.272     | +1.076         | +0.893         | +0.567         | +0.522         | +1.091         |
| SA 20-39    | 00 45 34.099              | +45 36 48.21              | 9.353      | +0.472         | +0.092         | +0.277         | +0.280         | +0.555         |
| SA 20-291   | 00 45 37.914              | +45 56 54.86              | 10.454     | +0.794         | +0.429         | +0.425         | +0.388         | +0.812         |
| SA 20-43    | 00 45 42.450              | +45 35 15.39              | 10.412     | +0.764         | +0.301         | +0.430         | +0.409         | +0.838         |
| SA 20-297   | 00 45 51.821              | +45 53 44.79              | 8.907      | -0.054         | -0.417         | -0.015         | -0.020         | -0.032         |
| SA 20-420   | 00 45 56.621              | +46 04 33.36              | 9.520      | +1.007         | +0.733         | +0.534         | +0.500         | +1.028         |

Система Pan-STARRS1 була розроблена в рамках огляду неба Pan-STARRS і, як було відмічено у першому розділі, включає п'ять фільтрів:  $g_{p1}$ ,  $r_{p1}$ ,  $i_{p1}$ ,  $z_{p1}$  та  $u_{p1}$ . Ці фільтри охоплюють діапазон від видимого до ближнього інфрачервоного світла. Фотометрична система PS1 базується на спектрофотометричних спостереженнях, проведених за допомогою космічного телескопа Габбл (HST) та моделей атмосфер білих карликів. Це забезпечує високу точність та надійність калібрування. Для забезпечення точності фотометричних вимірювань у системі PS1 було створено фотометричну опорну шкалу, відому

як "The Pan-STARRS1 Photometric Reference Ladder". Цей каталог містить фотометричні дані приблизно 1000 об'єктів на квадратний градус у різних діапазонах [14]. У таблиці 3.2 наведено приклади полів з відповідного каталогу.

Таблиця 3.2. Приклад стандартних полів для системи Pan-Starrs [14]

| N  | Al2000  | Del2000 | g      | sg    | r      | sr    | i      | si    | z      | sz    |
|----|---------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 1  | 11.5197 | 0.7603  | 12.968 | 0.010 | 12.770 | 0.010 | 12.744 | 0.010 | 12.779 | 0.010 |
| 2  | 11.5348 | 0.7150  | 14.662 | 0.003 | 14.286 | 0.004 | 14.159 | 0.001 | 14.123 | 0.002 |
| 3  | 11.5873 | 0.6206  | 15.143 | 0.008 | 14.886 | 0.005 | 14.814 | 0.002 | 14.822 | 0.004 |
| 4  | 11.6198 | 0.6714  | 15.066 | 0.004 | 14.495 | 0.002 | 14.291 | 0.004 | 14.199 | 0.003 |
| 5  | 11.6352 | 0.7481  | 13.399 | 0.010 | 12.979 | 0.010 | 12.854 | 0.010 | 12.821 | 0.010 |
| 6  | 13.6550 | 0.6493  | 13.480 | 0.010 | 13.128 | 0.010 | 12.906 | 0.010 | 12.800 | 0.010 |
| 7  | 13.6969 | 0.6568  | 15.094 | 0.003 | 14.789 | 0.005 | 14.673 | 0.002 | 14.653 | 0.002 |
| 8  | 13.7141 | 0.6720  | 14.552 | 0.004 | 13.642 | 0.002 | 13.253 | 0.010 | 13.093 | 0.001 |
| 9  | 13.7429 | 0.7335  | 12.588 | 0.010 | 12.260 | 0.010 | 12.180 | 0.010 | 12.182 | 0.010 |
| 10 | 34.5606 | 7.7654  | 14.294 | 0.002 | 13.401 | 0.010 | 13.045 | 0.010 | 12.838 | 0.010 |
| 11 | 34.5653 | 7.8107  | 14.460 | 0.006 | 13.923 | 0.004 | 13.738 | 0.005 | 13.644 | 0.007 |
| 12 | 34.6284 | 7.7480  | 15.930 | 0.003 | 15.457 | 0.003 | 15.273 | 0.003 | 15.188 | 0.002 |
| 13 | 34.6605 | 7.8211  | 13.995 | 0.001 | 13.428 | 0.010 | 13.248 | 0.010 | 13.174 | 0.004 |
| 14 | 34.6645 | 7.7683  | 16.131 | 0.003 | 15.659 | 0.003 | 15.463 | 0.006 | 15.378 | 0.003 |
| 15 | 34.6735 | 7.7423  | 13.286 | 0.010 | 12.951 | 0.010 | 12.840 | 0.010 | 12.812 | 0.010 |

Система калібрування базується на спостереженнях, проведених у фотометричні ночі, з систематичними похибками в межах 0.008–0.012 зор. вел. для різних фільтрів. Оскільки фільтри в системах *UBVRI* та *PS1* мають різні спектральні характеристики (рис. 3.1), для порівняння та об'єднання даних з обох систем необхідно визначити коефіцієнти переходу.

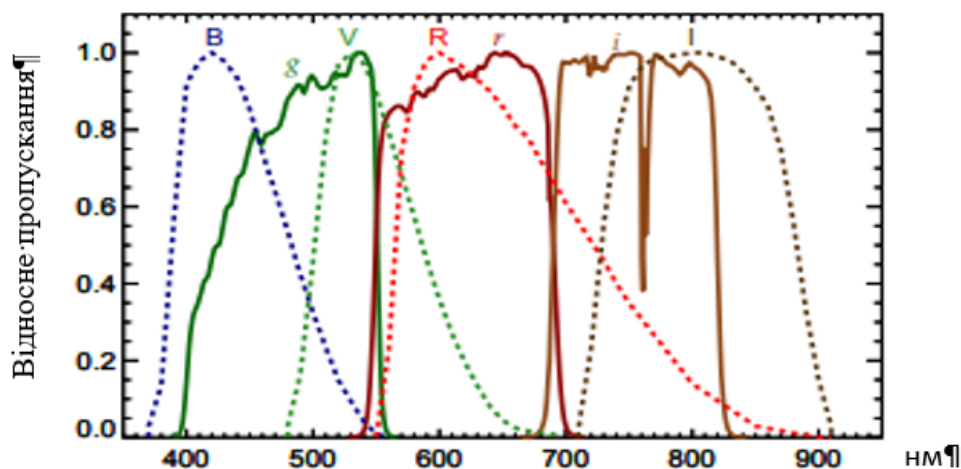


Рисунок 3.1. Порівняння кривих пропускання фільтрів *BVRI* та Pan-STARRS1

Ці коефіцієнти дозволяють перетворювати величини, виміряні в одній системі, до еквівалентних величин в іншій системі. Використання стандартних зір у фотометричних системах Джонсона-Козінса та Pan-STARRS1 є критично важливим для забезпечення точності та узгодженості астрономічних спостережень. У випадку об'єктів що швидко рухаються може спостерігатись кілька різних полів. Через цю особливість калібрування інструментальних зоряних величин за допомогою фотометричних стандартних зір складніше порівняно зі спостереженнями полів нерухомих зірок. Для фотометрії малих тіл необхідний розкид по всьому небу стандартних зір у фотометричній системі *UBVRI*, що поки що не повністю реалізовано.

### **3.2 Визначення коефіцієнтів переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1**

У зв'язку з широким застосуванням різних фотометричних систем у сучасних астрономічних спостереженнях, важливою задачею є встановлення надійних трансформаційних співвідношень між ними. Зокрема, система *UBVRI*, яка історично є базовою для калібрування зоряних величин, має бути узгоджена з новішою системою Pan-STARRS, що використовується в останніх оглядових каталогах. Незважаючи на те, що вже є відповідні формули переходу між цими системами, але вони не завжди задовольняють точності спостережень та не враховують особливості інструментальної системи телескопу. Крім того, основними об'єктами спостережень на телескопі АЗТ-8 є спостереження астероїдів. Кожен астероїд має власний рух, а у випадку об'єктів, що рухаються швидко, за одну ніч може спостерігатись кілька різних полів. Через цю особливість калібрування інструментальних зоряних величин за допомогою фотометричних стандартів суттєво складніше порівняно зі спостереженнями за полями нерухомих зірок. Виходячи з цього, були відібрані стандарти, що спостерігались у системі *BVRI* Джонсона-Козінса з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8 та використані відповідні зоряні величини у системі Pan-STARRS DR1, взяті з каталогу [14]. Відбір здійснювався з використанням зоряного атласу Aladin. Було сформовано

загальну вибірку зір-стандартів, яка складає 170 об'єктів спектральних класів від А до М, розташованих вздовж всього неба, котрі мають зоряні величини  $BVR$  у системі Джонсона – Козінса та  $g_{p1}r_{p1}i_{p1}z_{p1}$  у системі Pan-STARRS DR1. Загальний каталог представлено у Таблиці A1 Додатку А.

Використовуючи цей каталог вдалося побудувати лінійні співвідношення між зоряними величинами обох систем за допомогою відповідних показників кольору. Усі статистичні обчислення та побудова регресійних моделей здійснювались за допомогою табличного редактора Microsoft Excel, що забезпечило оперативну обробку даних та наочне представлення результатів. Таблиця Microsoft Excel представлена у вигляді структурованого масиву даних, який містить ключові кількісні та якісні показники, необхідні для проведення подальшого аналізу. Особливу увагу приділено точності введення значень та уніфікації форматування — усі числові дані подано з однаковим рівнем точності, що забезпечує коректність подальших розрахунків та візуалізації. Каталог зір містить результат фотометричних спостережень та трансформаційних співвідношень між зоряними величинами у системах  $UBVR$  та Pan-STARRS1 PS1. Зоряні величини подано у фільтрах  $griz$  з відповідними стандартними похибками, що дозволяє оцінити якість вимірювань.

На рис. 3.2 та 3.3 для прикладу наведено залежності між смугами  $V$  від  $g$  та  $R$  від  $r$ , щоб показати загальний діапазон зоряних величин та добре співпадіння між цими смугами (загальний коефіцієнт кореляції становить 0.99). Смуги  $V$  та  $g$  і  $R$  та  $r$  добре відтворюють одна одну (хоча смуга  $g$  має більшу напівширину), що полегшує обчислення трансформаційних коефіцієнтів. Загалом діапазон зоряних величин змінювався від майже 11 до 18, щоб охопити по можливості весь динамічний діапазон при спостереженнях з камерою FLI 47-10 з часом накопичення 60 секунд. При цьому для зорі 18 зор. вел. похибка буде становити близько 0.1 зор. вел., але при спостереженні реальних об'єктів за рахунок збільшення часу накопичення до 300 секунд, похибка спостережень становить не гірше 0.03 зор. вел.

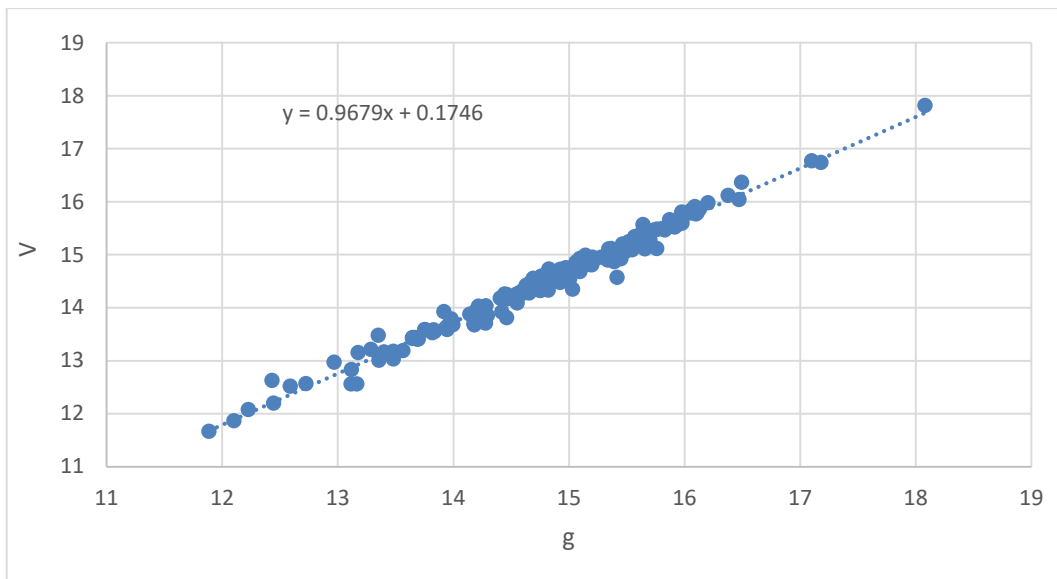


Рисунок 3.3. Залежність між фотометричними смугами  $g$  та  $V$

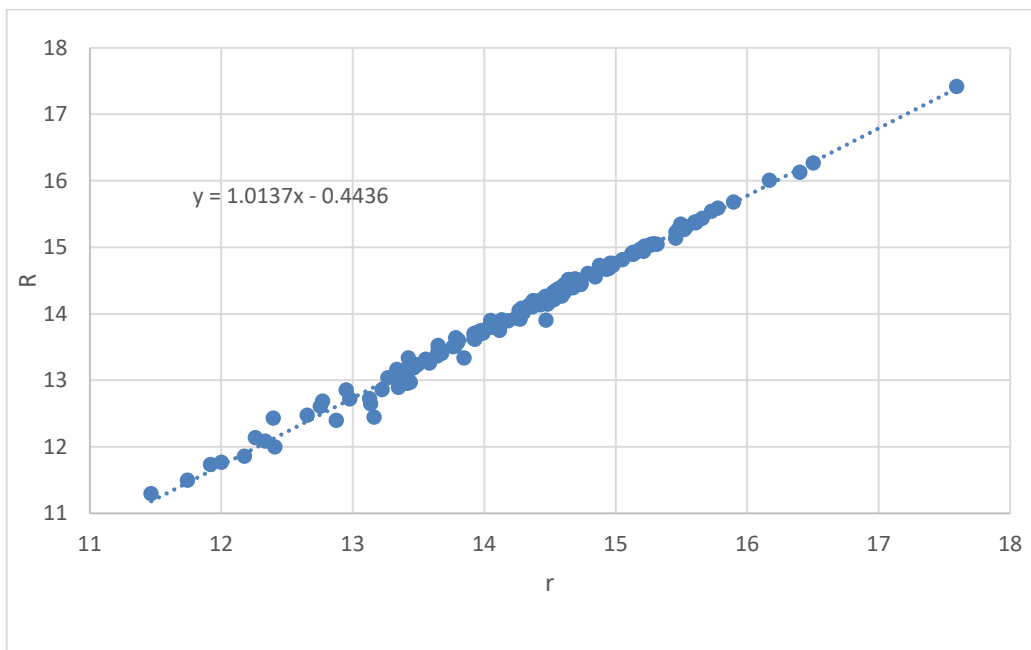


Рисунок 3.3. Залежність між фотометричними смугами  $r$  та  $R$

Оснoву трансформaційного aнaлізу стaновлять показники кольoру, які є вхiдними параметрами. Всi ці показники кольoру є ключовими параметрами для побудoви трансформaцій мiж цими системами. За оснoву був взятий показник кольoру  $g-r$ , щoб викoнати перетвoрення для смуг  $BVR$  системи Джонсона–Кoзiнса. Цей показник кольoру знаходився у дiапазонi 0.1-1.2 зор. вел. i охоплював спектральнi класи вiд F до M. Для отримання кiлькiсних спiввiдношень мiж зоряними величинами у фотометричних системах  $UBVRI$  та

Pan-STARRS було виконано лінійну регресійну підгонку. У якості незалежних змінних використовувалися відповідні колірні індекси. Результати підгонки наведено у таблиці 3.2, де вказано коефіцієнти  $C_0$  (вільний член), та  $C_1$  (нахил). Коефіцієнт кореляції для лінійних залежностей загалом був не менший 0.7, що підтверджує якісну залежність між смугами цих систем. Отримані коефіцієнти можуть бути використані для практичного перетворення зоряних величин між системами у межах вказаних колірних діапазонів. У цьому розділі виконано побудову лінійних рівнянь переходу між відповідними фільтрами на основі емпіричних спостережень перехресно ідентифікованих зір.

Таблиця 3.2. Таблиця трансформаційних коефіцієнтів для переходу між системами.

| $C_0$                | $C_1$                |
|----------------------|----------------------|
| $B-g = f(g-r)$       |                      |
| $0.2193 \pm 0.0024$  | $0.5384 \pm 0.0040$  |
| $V-g = f(g-r)$       |                      |
| $-0.0316 \pm 0.0095$ | $-0.5073 \pm 0.0164$ |
| $V-r = f(g-r)$       |                      |
| $-0.0316 \pm 0.0090$ | $0.4927 \pm 0.0157$  |
| $R-r = f(g-r)$       |                      |
| $-0.1759 \pm 0.0076$ | $-0.1268 \pm 0.0130$ |
| $R-r = f(r-i)$       |                      |
| $-0.1601 \pm 0.0085$ | $-0.4026 \pm 0.0176$ |
| $V-z = f(g-r)$       |                      |
| $-0.1371 \pm 0.0153$ | $1.2821 \pm 0.0265$  |

У межах даного дослідження перехід між фотометричними системами UBVRI та Pan-STARRS1 здійснювався за допомогою лінійних співвідношень між зоряними величинами та відповідними колірними індексами. Визначені коефіцієнти підгонки дозволяють з високою точністю трансформувати дані між системами в межах досліджуваного діапазону величин і кольорів. Для смуг BVR були отримані наступні співвідношення:

$$B=g+0.2193+0.5384(g-r); V=g-0.0316-0.5073(g-r); V=r-0.0316+0.4927(g-r);$$

$$R=r-0.1759-0.1268(g-r); R=r-0.1601-0.4026(r-i); V=z-0.1371+1.2821(g-r)$$

На рисунках 3.4-3.9 побудовано графіки залежностей між різницями зоряних величин двох систем та показниками кольору, які дозволяють оцінити ефективність перетворення для різних діапазонів кольору та зоряної величини.

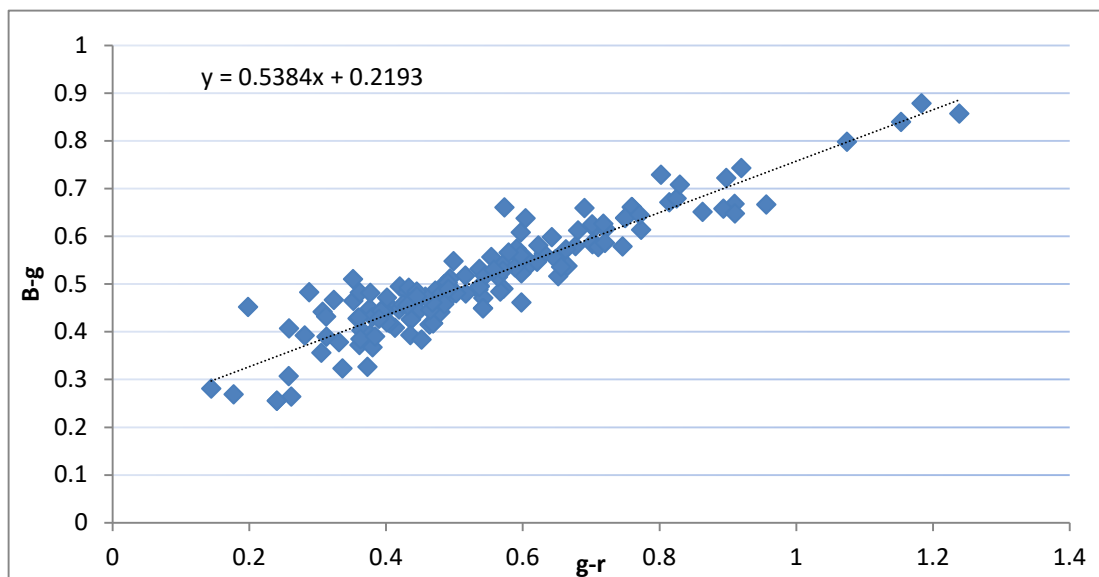


Рисунок 3.4. Залежність  $B-g$  як функції показника кольору  $g-r$

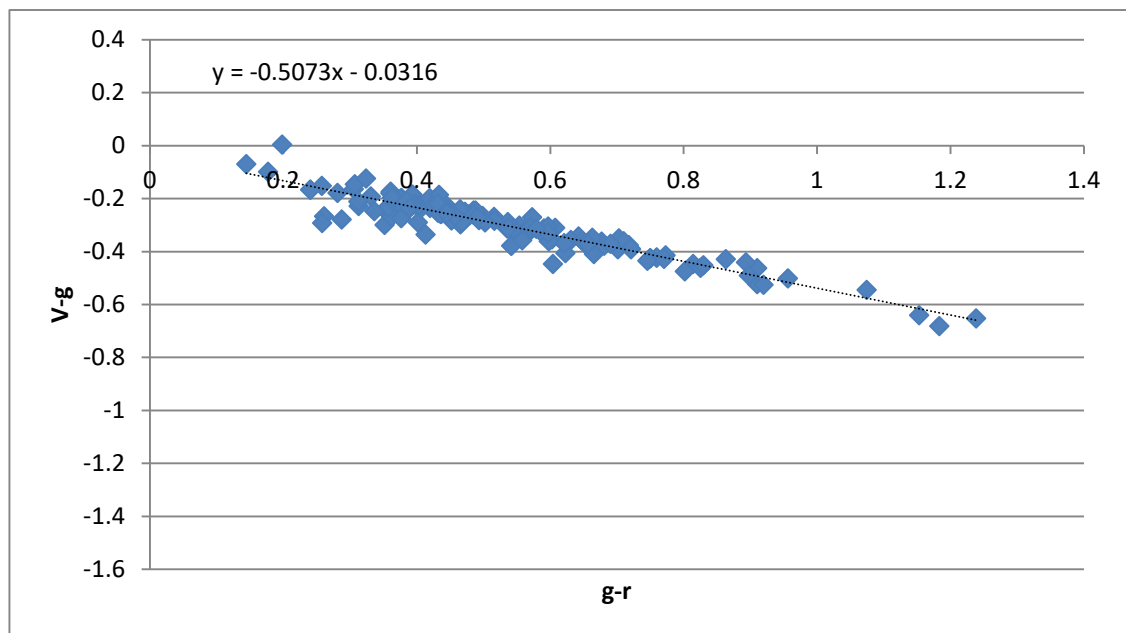


Рисунок 3.5. Залежність  $V-g$  як функції показника кольору  $g-r$

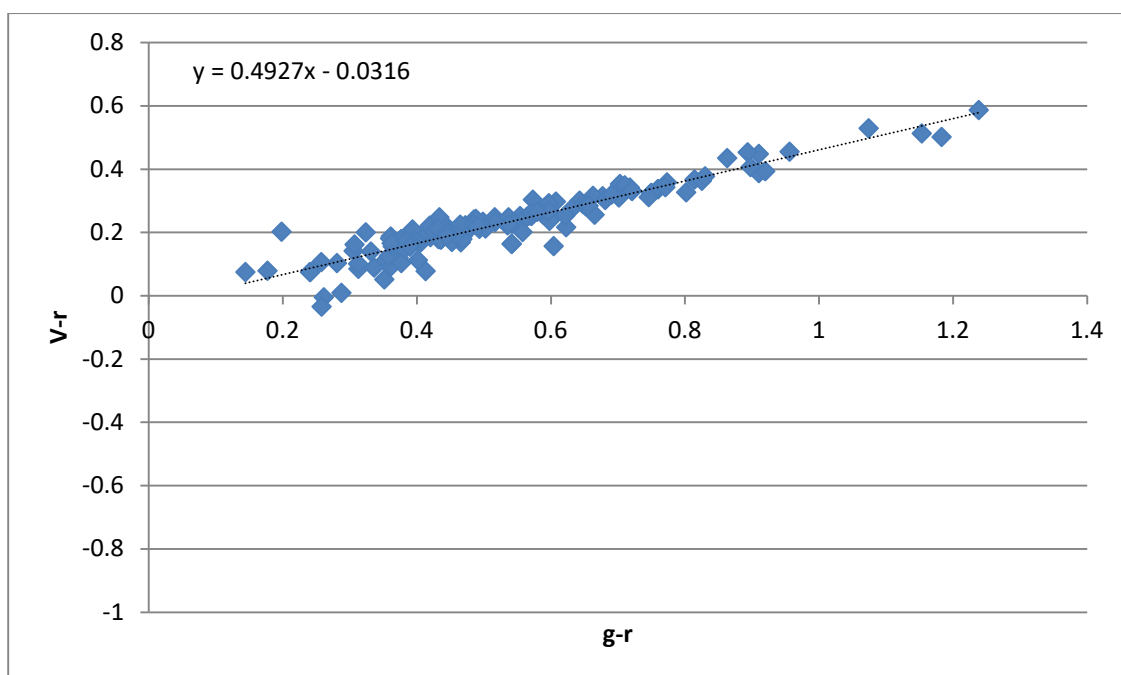


Рисунок 3.6. Залежність  $V-r$  як функції показника кольору  $g-r$

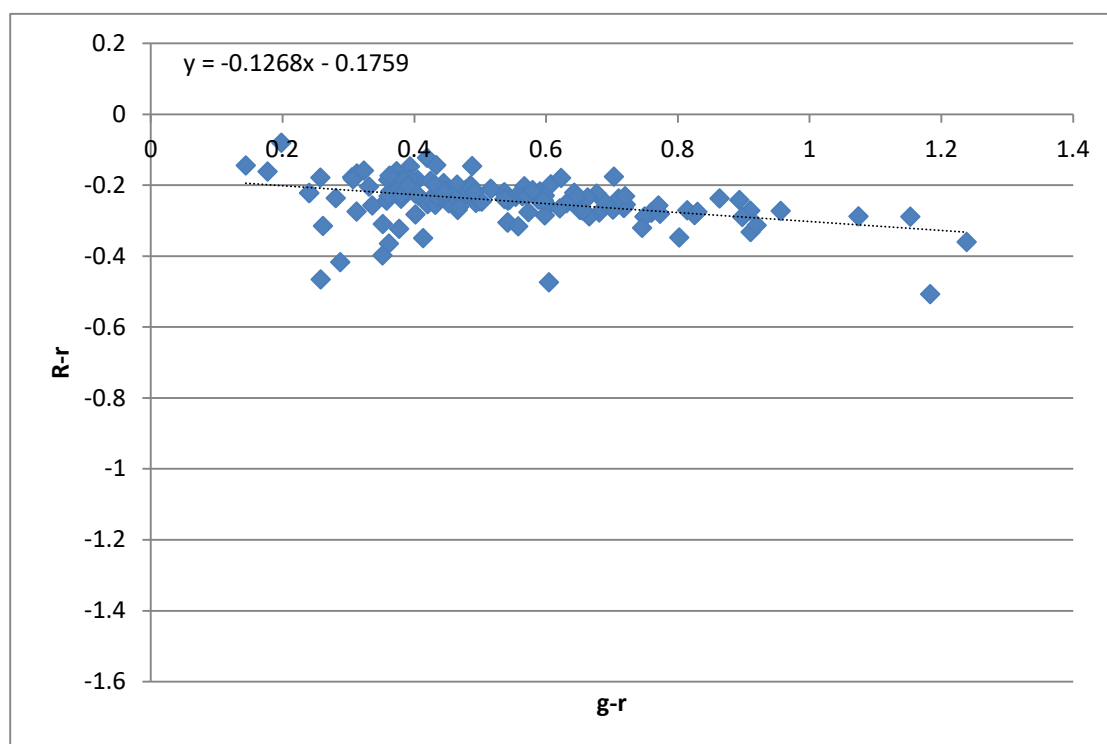


Рисунок 3.7. Залежність  $R-r$  як функції показника кольору  $g-r$

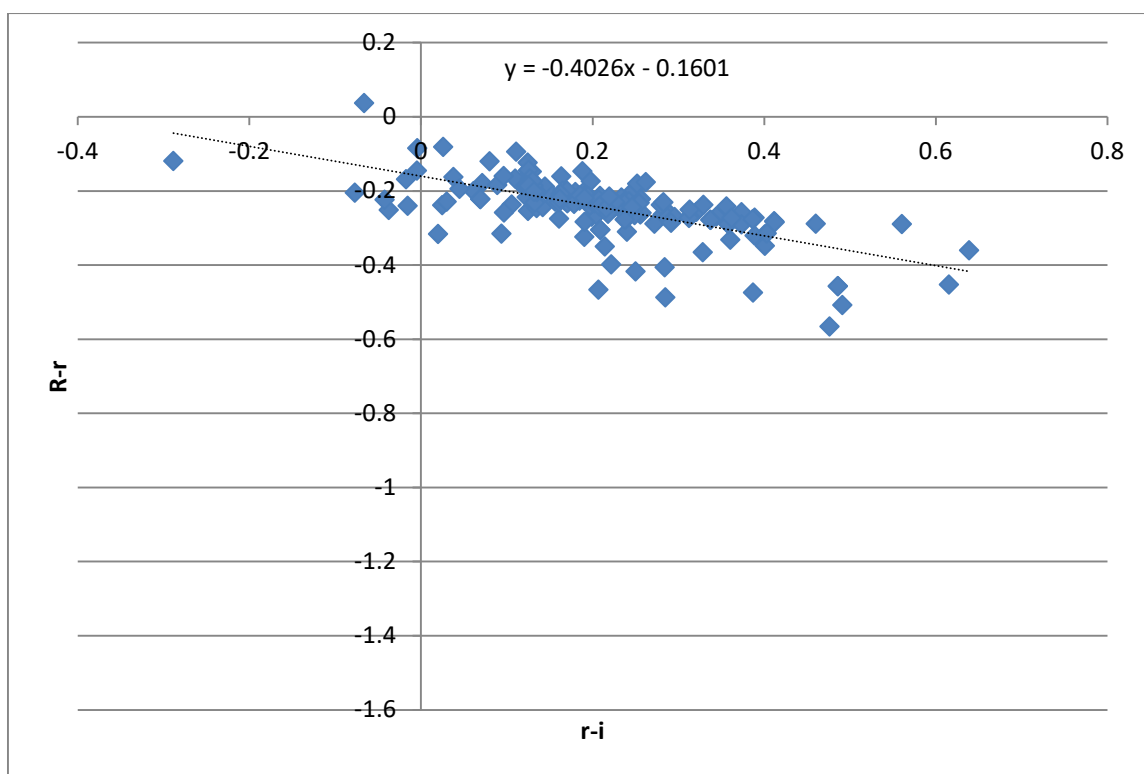


Рисунок 3.8. Залежність  $R-i$  як функції показника кольору  $r-i$

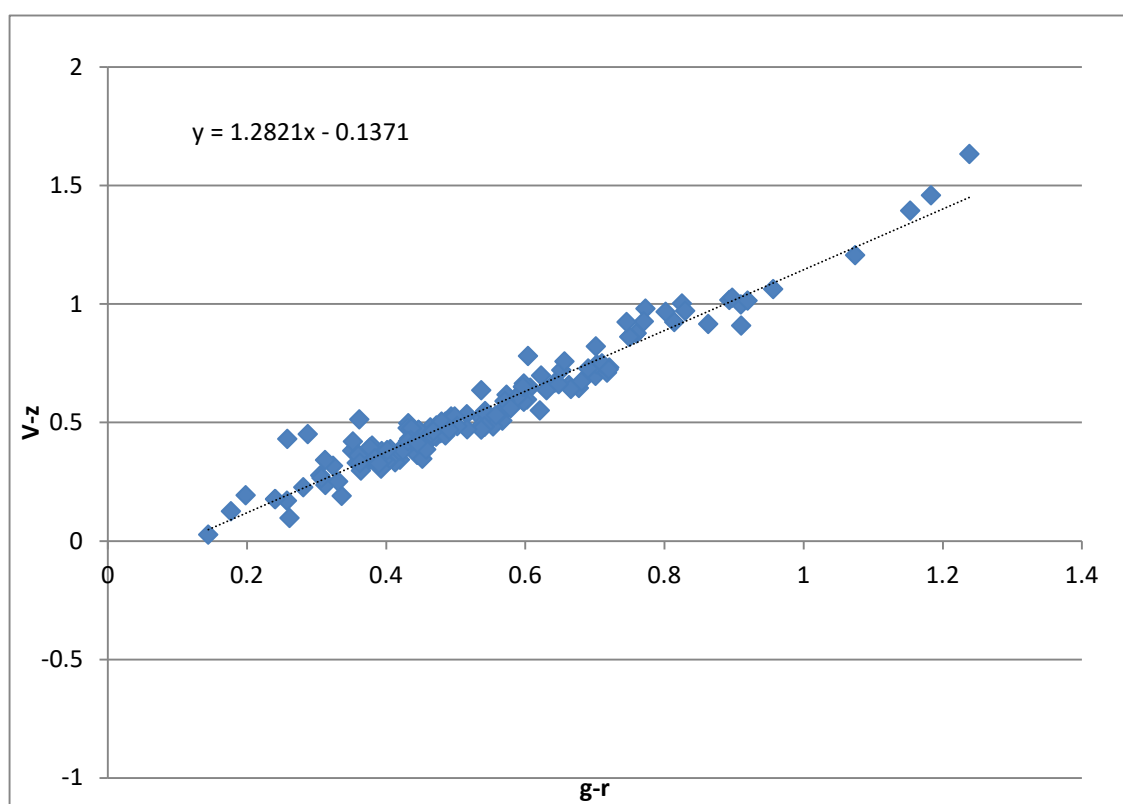


Рисунок 3.9. Залежність  $V-z$  як функції показника кольору  $g-r$

Отримані коефіцієнти трансформації демонструють високу точність та стабільність у перетворенні зоряних величин між системами *BVRI* та *Pan-STARRS1*. Розрахунки охоплюють зорі з зоряними величинами у межах 11–17 зор. вел. та показниками кольору від 0 до 1.3, що забезпечує охоплення широкого спектру об'єктів — від синіх до червоних зір. Стандартне відхилення для більшості лінійних підгонок не перевищує 0.03–0.08 зор. вел., що свідчить про високу якість апроксимації. Отримані результати добре узгоджуються з літературними даними [9, 10, 13, 14], та можуть бути використані для практичного фотометричного калібрування між різними системами спостережень.

### 3.3 Порівняльний аналіз значень коефіцієнтів переходу отриманих в даній роботі з літературними даними

При впровадженні фотометричної системи *Pan-STARRS1*, були представлені відповідні формули переходу між деякими фотометричними системами, в тому числі і коефіцієнти переходу до фотометричної системи Джонсона–Козінса [9, 10, 13, 14]. Про це говорилося в розділі 1. Для перевірки достовірності та точності отриманих у даній роботі коефіцієнтів лінійної трансформації між фотометричними системами *BVRI* та *Pan-STARRS1* було проведено порівняльний аналіз із результатами, наведеними у інших роботах. Оскільки у нашому випадку (при спостереженні малих тіл Сонячної системи) використовуються в основному смуги *BVR*, то значення зоряних величин якраз для цих смуг і порівнювалось. Процедура була наступна: обчислювались середні відхилення каталожних значень зоряних величин у смугах *BVR* від зоряних величин отриманих через трансформаційні коефіцієнти, що взяті з робіт [9, 10, 13, 14].

Для порівняння були використані наступні співвідношення зі статті [9]:  

$$B = g + 0.219 + 0.365 (g-r), V = g - 0.587 (g-r) - 0.011, R = r - 0.272 (r-i) - 0.159.$$

Співвідношення зі статті [14]:  

$$B = g + 0.213 + 0.587 (g-r), V = g - 0.525 (g-r) - 0.006, R = r - 0.294 (r-i) - 0.143.$$

Співвідношення зі статті [10]:

$$B = g + 0.194 + 0.561 (g-r), V = g - 0.508 (g-r) - 0.017, R = r - 0.275(r-i) - 0.166.$$

Та співвідношення зі статті [13]:

$$B = g + 0.197 + 0.535 (g-r), V = g - 0.505 (g-r) - 0.025, R = r - 0.286 (r-i) - 0.166.$$

У таблиці 3.3 наведено середні відхилення та їх похибки для трьох основних смуг *BVR*, що відповідають різним трансформаційним формулам. Графіки відхилень представлені на рисунках 3.10 – 3.12.

Таблиця 3.3 Значення середніх відхилень та їх похибки для трьох основних смуг *BVR*, отриманих у даному дослідженні у порівнянні з літературними даними.

| Смуга | Середнє відхилення (зор. вел.) |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
|-------|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|       | Дана робота                    |       | [9]    |       | [14]   |       | [10]   |       | [13]   |       |
| B     | 0.007                          | 0.066 | 0.099  | 0.074 | -0.012 | 0.067 | 0.020  | 0.066 | 0.031  | 0.066 |
| V     | 0.004                          | 0.053 | 0.026  | 0.053 | -0.012 | 0.053 | -0.010 | 0.053 | -0.004 | 0.053 |
| R     | 0.001                          | 0.057 | -0.028 | 0.059 | -0.039 | 0.058 | -0.020 | 0.059 | -0.018 | 0.059 |

Як видно з таблиці 3.3, загалом середнє відхилення для різних смуг з різними коефіцієнтами не перевищує 0.03 зор. вел. У випадку наших співвідношень воно має найменше значення (теоретично повинно бути нульовим), що вказує на краще визначення зоряних величин у системі Джонсона-Козінса використовуючи дані Pan-STARRS1 за отриманими в даній роботі коефіцієнтами. Звертає увагу систематичне зміщення визначення зоряних величин для смуги *B* при використанні трансформаційних коефіцієнтів з роботи [9], воно становить майже 0.1 зор. вел. і його слід враховувати при використанні їхніх трансформаційних коефіцієнтів. Також слід відмітити невелике систематичне зміщення для смуги *R*, що отримано при використанні коефіцієнтів з роботи [14], що також потребує врахування. Похибки середніх відхилень для всіх визначень близькі між собою і достатньо високі. Це вказує на те, що для точності визначень зоряної величини один-два відсотки для

кожної смуги в кожному конкретному випадку слід визначати коефіцієнти трансформації використовуючи зорі на кожному із зоряних полів.

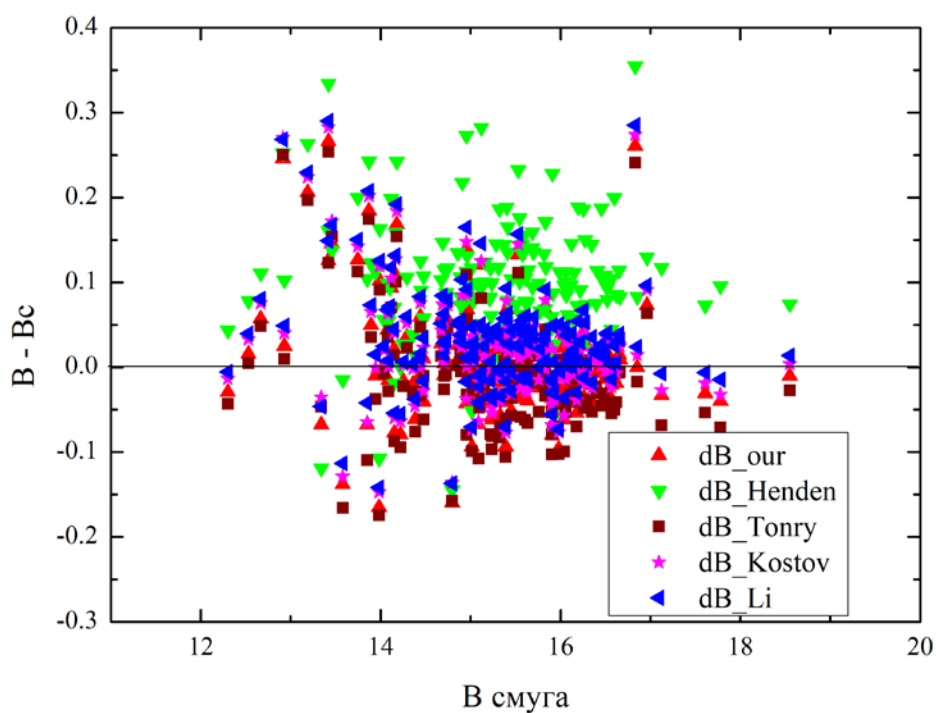


Рисунок 3.10. Залежність відхилення від зоряної величини для смуги  $B$

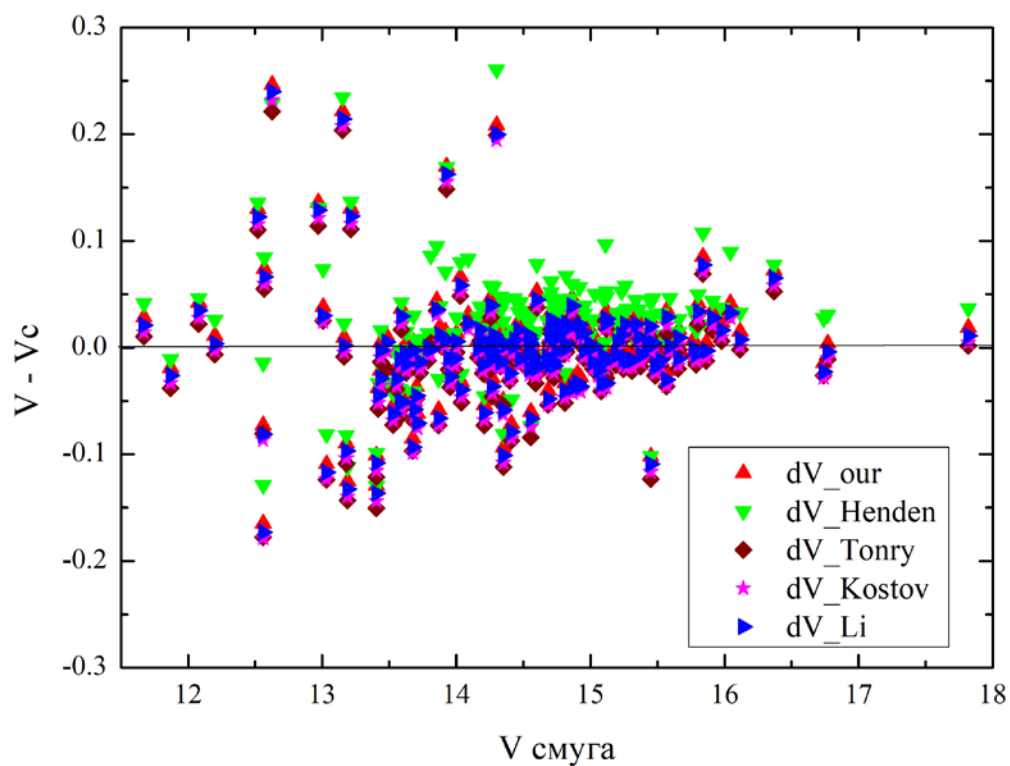


Рисунок 3.11. Залежність відхилення від зоряної величини для смуги  $V$

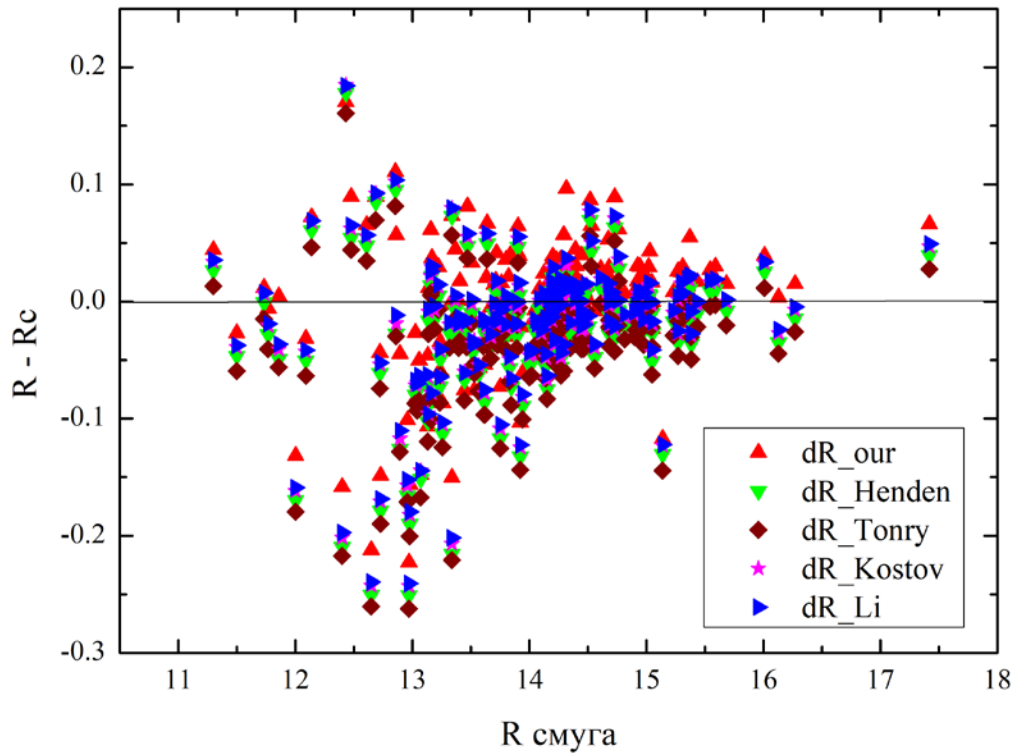


Рисунок 3.12. Залежність відхилення від зоряної величини для смуги  $R$

Аналіз рисунків 3.10-3.12 показує, що найбільші відхилення спостерігаються для зір з зоряною величиною  $<13$ . У випадку каталога Pan-STARRS1 це достатньо яскраві зорі і оцінка їх блиску на основі апертурної фотометрії може суттєво не співпадати з реальними значеннями, тобто мати відхилення до 0.2 зор. вел. У цілому ж відхилення для більш слабкіших зір не перевищують 0.1 зор. вел. (і навіть менше, за виключенням  $B$  смуги з роботи [10]) для всіх смуг і для всіх наборів трансформаційних коефіцієнтів. Деякі інші невеликі розбіжності можуть бути зумовлені особливостями вибору зір у червоному діапазоні кольорів або обмеженнями у точності визначення величин у даній області спектру. Загалом, результати порівняння демонструють хорошу узгодженість отриманих у цій роботі коефіцієнтів з літературними даними, що підтверджує достовірність проведених розрахунків та їх придатність для практичного використання у фотометричних трансформаціях.

## Висновки

При виконанні дипломної роботи були вирішені поставлені основні завдання:

1. Проведено огляд наукової літератури щодо фотометричних систем Джонсона-Козінса, Слоанівської та Pan-STARRS DR1.
2. Освоєно методику роботи з фотометричними каталогами та методику дослідження фотометричних систем.
3. Виконано відбір даних з фотометричних каталогів зір-стандартів Ландольта та Pan-STARRS DR1 та сформовано вибірку для 170 зір, для яких визначені зоряні величини у фотометричній системі Джонсона-Козінса з урахуванням інструментальної системи телескопа АЗТ-8.
4. Обчислено коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1.

Виходячи з реалізованих задач вдалося отримати наступні основні результати:

1. Отримано вибірку для 170 зір-стандартів різних спектральних класів, для яких визначені зоряні величини у фотометричних системах Джонсона-Козінса (*BVR* смуги) та Pan-STARRS DR1 (*griz* смуги).
2. Визначено коефіцієнти переходу між фотометричними системами Джонсона-Козінса та Pan-STARRS DR1 для трьох смуг *BVR*.
3. Виконано порівняльний аналіз значень коефіцієнтів переходу отриманих в даній роботі з літературними даними та показано, що вони є надійними у межах використаних діапазонів зоряних величин і показників кольору. Визначені у цій роботі трансформаційні співвідношення можуть бути ефективно використані для переведення даних між фотометричними системами Джонсона Козінса та Pan-STARRS.

### Список використаної літератури

1. Александров Ю.В., Шевченко В.Г. Астрофізика. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2016. – 208 с.
2. Каретніков В.Г. Багатоколірна астрофотометрія: Навчальний посібник. Одеса: 2012. – 168 с.
3. Терещенко І. А., Шевченко В.Г., Круглий Ю. Н. Дослідження фотометричної системи телескопа АЗТ-8 та ПЗС-камери IMG 1024S Кінематика і фізика небесних тіл. 2010. Т. 26, № 2. С. 74–80.
4. Шевченко В. Г. Комп'ютерні технології: методичні вказівки – Г 80 Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2011. – 38 с.
5. Bessel S.M. Standard photometric systems. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2005. V. 43. P. 293–336.
6. Bonnarel F., Fernique P., Bienaymé O., et al. The ALADIN interactive sky atlas. Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 2000. V. 143, 33-40.
7. Chambers K. C., Magnier E. A., Metcalfe N., et al., 2016. The Pan-STARRS1 Surveys. eprint arXiv:1612.05560, 38 pp. <https://arxiv.org/abs/1612.05560>
8. Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E. et al. The Sloan Digital Sky Survey photometric system. Astron. J. 1996. V. 111, 1748-1756.
9. Henden A. A., Smith T. C., Levine S. E., Terrell D. The AAVSO Photometric All-Sky Survey Completes the Sky. AAS Meeting. V. 220. 2012. Id. 133.06.
10. Kostov A., Bonev T. Transformation of Pan-STARRS1 gri to Stetson BVRI magnitudes. Photometry of small bodies observations. Institute of Astronomy and NAO, Bulgarian Academy of Sciences, BG-1784, Sofia 18.06.2017
11. Landolt A.U. UBVRI photometric standard stars in the magnitude range  $11.5 < V < 16.0$  around the celestial equator. Astron. J. 1992. V. 104, 340–371.
12. Landolt A.U. UBVRI photometric standard stars around the celestial equator: updates and additions. Astron. J. 2009. V. 137, 4186–4269.
13. Li X. et al. An UBVRI calibration method based on Pan-STARRS photometric survey. Astronomy and Computing V.45. – 2023. – P.8.

14. Tonry J. L., Stubbs C. W., Lykke K. R. et al. The Pan-STARRS1 photometric system. *Astrophys. J.* 2012. V. 750, id. 99, 14 pp.
15. Степанюк Марія (04 листопада 2022). Чугуївська астрономічна обсерваторія після росіян: подорож разом з астрономами. <https://gwaramedia.com/>
16. <https://www.astro.louisville.edu/software/aladin/>
17. <https://aladin.cds.unistra.fr/>
18. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011>
19. <https://en.wikipedia.org/>
20. <https://karazin.ua/>

## Додаток А

Таблиця А1. Каталог фотометричних стандартів систем Джонсона-Козінса та PanStarrs 1

| N  | AI2000  | Del2000  | g       | r       | i       | z       | B      | V      | R      | g-r    | B-g    | V-g     | V-z     | r-i     | R-r     | V-r     |
|----|---------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 11,5197 | 0,76027  | 12,968  | 12,77   | 12,744  | 12,779  | 13,42  | 12,972 | 12,689 | 0,198  | 0,452  | 0,004   | 0,193   | 0,026   | -0,081  | 0,202   |
| 2  | 11,5348 | 0,71503  | 14,6622 | 14,286  | 14,1594 | 14,1234 | 15,111 | 14,464 | 14,086 | 0,3762 | 0,4488 | -0,1982 | 0,3406  | 0,1266  | -0,2    | 0,178   |
| 3  | 11,5873 | 0,62062  | 15,1432 | 14,8857 | 14,8141 | 14,8222 | 15,45  | 14,992 | 14,707 | 0,2575 | 0,3068 | -0,1512 | 0,1698  | 0,0716  | -0,1787 | 0,1063  |
| 4  | 11,6198 | 0,67144  | 15,066  | 14,4945 | 14,2914 | 14,1994 | 15,556 | 14,749 | 14,268 | 0,5715 | 0,49   | -0,317  | 0,5496  | 0,2031  | -0,2265 | 0,2545  |
| 5  | 11,6352 | 0,7481   | 13,399  | 12,979  | 12,854  | 12,821  | 13,894 | 13,164 | 12,725 | 0,42   | 0,495  | -0,235  | 0,343   | 0,125   | -0,254  | 0,185   |
| 6  | 13,655  | 0,6493   | 13,4795 | 13,128  | 12,906  | 12,8    | 13,99  | 13,18  | 12,73  | 0,3515 | 0,5105 | -0,2995 | 0,38    | 0,222   | -0,398  | 0,052   |
| 7  | 13,6969 | 0,65678  | 15,0941 | 14,7886 | 14,6732 | 14,6533 | 15,45  | 14,93  | 14,61  | 0,3055 | 0,3559 | -0,1641 | 0,2767  | 0,1154  | -0,1786 | 0,1414  |
| 8  | 13,7141 | 0,67204  | 14,5519 | 13,6419 | 13,253  | 13,0927 | 15,22  | 14,09  | 13,37  | 0,91   | 0,6681 | -0,4619 | 0,9973  | 0,3889  | -0,2719 | 0,4481  |
| 9  | 13,7429 | 0,73348  | 12,588  | 12,26   | 12,18   | 12,182  | 13,19  | 12,52  | 12,14  |        | 0,602  | -0,068  | 0,338   | 0,08    | -0,12   | 0,26    |
| 10 | 34,5606 | 7,76542  | 14,2943 | 13,401  | 13,045  | 12,838  | 14,952 | 13,854 | 13,159 | 0,8933 | 0,6577 | -0,4403 | 1,016   | 0,356   | -0,242  | 0,453   |
| 11 | 34,5653 | 7,81071  | 14,4602 | 13,9232 | 13,7376 | 13,6435 | 14,956 | 14,163 | 13,703 | 0,537  | 0,4958 | -0,2972 | 0,5195  | 0,1856  | -0,2202 | 0,2398  |
| 12 | 34,6284 | 7,7448   | 15,9296 | 15,4574 | 15,2726 | 15,1877 | 16,396 | 15,656 | 15,231 | 0,4722 | 0,4664 | -0,2736 | 0,4683  | 0,1848  | -0,2264 | 0,1986  |
| 13 | 34,6605 | 7,82107  | 13,995  | 13,428  | 13,248  | 13,1742 | 14,479 | 13,681 | 13,225 | 0,567  | 0,484  | -0,314  | 0,5068  | 0,18    | -0,203  | 0,253   |
| 14 | 34,6645 | 7,7683   | 16,1313 | 15,6591 | 15,4631 | 15,3775 | 16,567 | 15,865 | 15,437 | 0,4722 | 0,4357 | -0,2663 | 0,4875  | 0,196   | -0,2221 | 0,2059  |
| 15 | 34,6735 | 7,74231  | 13,286  | 12,951  | 12,84   | 12,812  | 13,87  | 13,215 | 12,857 |        | 0,584  | -0,071  | 0,403   | 0,111   | -0,094  | 0,264   |
| 16 | 34,6919 | 7,74022  | 14,776  | 14,1335 | 13,8834 | 13,7655 | 15,374 | 14,434 | 13,912 | 0,6425 | 0,598  | -0,342  | 0,6685  | 0,2501  | -0,2215 | 0,3005  |
| 17 | 34,7308 | 7,82884  | 15,5698 | 14,9624 | 14,7143 | 14,6141 | 16,107 | 15,26  | 14,764 | 0,6074 | 0,5372 | -0,3098 | 0,6459  | 0,2481  | -0,1984 | 0,2976  |
| 18 | 35,0283 | 9,51123  | 15,0692 | 14,3652 | 14,1095 | 13,984  | 15,686 | 14,707 | 14,102 | 0,704  | 0,6168 | -0,3622 | 0,723   | 0,2557  | -0,2632 | 0,3418  |
| 19 | 35,0714 | 9,59732  | 15,2817 | 14,6862 | 14,4437 | 14,3576 | 15,836 | 14,953 | 14,438 | 0,5955 | 0,5543 | -0,3287 | 0,5954  | 0,2425  | -0,2482 | 0,2668  |
| 20 | 35,0811 | 9,4578   | 15,1985 | 14,4775 | 14,1908 | 14,0771 | 15,814 | 14,808 | 14,223 | 0,721  | 0,6155 | -0,3905 | 0,7309  | 0,2867  | -0,2545 | 0,3305  |
| 21 | 35,1257 | 9,49096  | 15,0752 | 14,4444 | 14,1922 | 14,0836 | 15,639 | 14,719 | 14,193 | 0,6308 | 0,5638 | -0,3562 | 0,6354  | 0,2522  | -0,2514 | 0,2746  |
| 22 | 35,1368 | 9,46665  | 14,2759 | 13,6531 | 13,401  | 13,172  | 14,857 | 13,87  | 13,473 | 0,6228 | 0,5811 | -0,4059 | 0,698   | 0,2521  | -0,1801 | 0,2169  |
| 23 | 35,1487 | 9,51631  | 15,8283 | 15,1514 | 14,9156 | 14,8203 | 16,408 | 15,466 | 14,927 | 0,6769 | 0,5797 | -0,3623 | 0,6457  | 0,2358  | -0,2244 | 0,3146  |
| 24 | 35,1724 | 9,34603  | 14,5645 | 14,0989 | 13,8998 | 13,8338 | 15,035 | 14,268 | 13,829 | 0,4656 | 0,4705 | -0,2965 | 0,4342  | 0,1991  | -0,2699 | 0,1691  |
| 25 | 35,1779 | 9,46088  | 15,6119 | 15,206  | 15,0357 | 14,9878 | 16,064 | 15,375 | 14,976 | 0,4059 | 0,4521 | -0,2369 | 0,3872  | 0,1703  | -0,23   | 0,169   |
| 26 | 35,2055 | 9,47816  | 15,8037 | 15,2684 | 15,0725 | 15,0077 | 16,292 | 15,491 | 15,046 | 0,5353 | 0,4883 | -0,3127 | 0,4833  | 0,1959  | -0,2224 | 0,2226  |
| 27 | 35,3371 | 9,62389  | 14,7534 | 14,1507 | 13,8934 | 13,8031 | 15,31  | 14,4   | 13,892 | 0,6027 | 0,5566 | -0,3534 | 0,5969  | 0,2573  | -0,2587 | 0,2493  |
| 28 | 35,3431 | 9,65008  | 15,6489 | 14,9477 | 14,6658 | 14,5639 | 16,274 | 15,26  | 14,684 | 0,7012 | 0,6251 | -0,3889 | 0,6961  | 0,2819  | -0,2637 | 0,3123  |
| 29 | 39,0584 | 25,4144  | 15,0637 | 14,6909 | 14,5274 | 14,474  | 15,39  | 14,81  | 14,53  | 0,3728 | 0,3263 | -0,2537 | 0,336   | 0,1635  | -0,1609 | 0,1191  |
| 30 | 39,0688 | 25,4393  | 15,7162 | 15,455  | 15,3612 | 15,3534 | 15,98  | 15,45  | 15,14  | 0,2612 | 0,2638 | -0,2662 | 0,0966  | 0,0938  | -0,315  | -0,005  |
| 31 | 54,864  | 18,3657  | 15,0088 | 14,418  | 14,1843 | 14,0809 | 15,577 | 14,697 | 14,2   | 0,5908 | 0,5682 | -0,3118 | 0,6161  | 0,2337  | -0,218  | 0,279   |
| 32 | 54,8975 | 18,1676  | 15,3502 | 14,7931 | 14,623  | 14,4693 | 14,705 | 13,91  | 13,444 |        |        | -1,4402 | -0,5593 |         | -1,3491 | -0,8831 |
| 33 | 54,9519 | 18,3563  | 14,9501 | 14,4649 | 14,2744 | 14,2031 | 15,45  | 14,706 | 14,264 | 0,4852 | 0,4999 | -0,2441 | 0,5029  | 0,1905  | -0,2009 | 0,2411  |
| 34 | 54,9694 | 18,1558  | 15,0371 | 14,446  | 14,2068 | 14,1126 | 15,611 | 14,721 | 14,214 | 0,5911 | 0,5739 | -0,3161 | 0,6084  | 0,2392  | -0,232  | 0,275   |
| 35 | 54,9932 | 18,2566  | 14,6859 | 14,2727 | 14,0584 | 14,0194 | 15,094 | 14,351 | 13,923 | 0,4132 | 0,4081 | -0,3349 | 0,3316  | 0,2143  | -0,3497 | 0,0783  |
| 36 | 55,0091 | 18,2396  | 15,4724 | 14,979  | 14,7592 | 14,666  | 15,984 | 15,191 | 14,729 | 0,4934 | 0,5116 | -0,2814 | 0,525   | 0,2198  | -0,25   | 0,212   |
| 37 | 55,0506 | 18,2678  | 15,105  | 14,6147 | 14,4059 | 14,3406 | 15,608 | 14,852 | 14,401 | 0,4903 | 0,503  | -0,253  | 0,5114  | 0,2088  | -0,2137 | 0,2373  |
| 38 | 55,0519 | 18,3832  | 15,0374 | 14,5214 | 14,3299 | 14,2352 | 15,555 | 14,769 | 14,311 | 0,516  | 0,5176 | -0,2684 | 0,5338  | 0,1915  | -0,2104 | 0,2476  |
| 39 | 55,0534 | 18,2905  | 15,2238 | 14,6268 | 14,3719 | 14,2694 | 15,832 | 14,919 | 14,395 | 0,597  | 0,6082 | -0,3048 | 0,6496  | 0,2549  | -0,2318 | 0,2922  |
| 40 | 55,0817 | 18,3202  | 15,6577 | 14,5835 | 14,1232 | 13,9073 | 16,456 | 15,113 | 14,295 | 1,0742 | 0,7983 | -0,5447 | 1,2057  | 0,4603  | -0,2885 | 0,5295  |
| 41 | 58,3052 | 0,27295  | 12,43   | 12,395  | 12,461  | 12,555  | 12,914 | 12,627 | 12,432 |        |        | 0,197   | 0,072   | -0,066  | 0,037   | 0,232   |
| 42 | 87,0805 | 23,7764  | 14,143  | 13,6443 | 13,428  | 13,3534 | 14,691 | 13,878 | 13,398 | 0,4987 | 0,548  | -0,265  | 0,5246  | 0,2163  | -0,2463 | 0,2337  |
| 43 | 87,0861 | 23,7008  | 14,2814 | 13,9293 | 13,6892 | 13,6201 | 14,746 | 14,039 | 13,619 | 0,3521 | 0,4646 | -0,2424 | 0,4189  | 0,2401  | -0,3103 | 0,1097  |
| 44 | 87,1245 | 23,6662  | 14,1972 | 13,7652 | 13,444  | 13,4469 | 14,677 | 13,944 | 13,509 | 0,432  | 0,4798 | -0,2532 | 0,4971  | 0,3212  | -0,2562 | 0,1788  |
| 45 | 87,155  | 23,7362  | 14,4787 | 14,1171 | 13,7885 | 13,6974 | 14,961 | 14,21  | 13,752 | 0,3616 | 0,4823 | -0,2687 | 0,5126  | 0,3286  | -0,3651 | 0,0929  |
| 46 | 87,1663 | 23,8216  | 14,4045 | 13,9737 | 13,7827 | 13,7021 | 14,887 | 14,179 | 13,747 | 0,4308 | 0,4825 | -0,2255 | 0,4769  | 0,191   | -0,2267 | 0,2053  |
| 47 | 87,1915 | 23,8112  | 14,4645 | 14,0848 | 14,0599 | 13,8476 | 14,895 | 14,249 | 13,846 | 0,3797 | 0,4305 | -0,2155 | 0,4014  | 0,0249  | -0,2388 | 0,1642  |
| 48 | 102,916 | -0,44498 | 14,826  | 14,649  | 14,611  | 14,6034 | 15,095 | 14,728 | 14,487 | 0,177  | 0,269  | -0,098  | 0,1246  | 0,038   | -0,162  | 0,079   |
| 49 | 102,916 | -0,4283  | 14,6896 | 14,6068 | 14,6242 | 14,6487 | 14,794 | 14,556 | 14,438 |        | 0,1044 | -0,1336 | -0,0927 | -0,0174 | -0,1688 | -0,0508 |
| 50 | 122,022 | 35,5092  | 13,175  | 12,755  | 12,63   | 12,597  | 13,747 | 13,152 | 12,61  |        | 0,572  | -0,023  | 0,555   | 0,125   | -0,145  | 0,397   |
| 51 | 122,112 | 35,5017  | 14,5857 | 13,6758 | 13,3625 | 13,2134 | 15,236 | 14,301 | 13,407 |        | 0,6503 | -0,2847 | 1,0876  | 0,3133  | -0,2688 | 0,6252  |
| 52 | 122,12  | 35,5029  | 13,6477 | 13,335  | 13,225  | 13,1836 | 14,037 | 13,42  | 13,168 | 0,3127 | 0,3893 | -0,2277 | 0,2364  | 0,11    | -0,167  | 0,085   |
| 53 | 122,159 | 35,4796  | 15,2021 | 14,73   | 14,5624 | 14,5133 | 15,688 | 14,953 | 14,504 | 0,4721 | 0,4859 | -0,2491 | 0,4397  | 0,1676  | -0,226  | 0,223   |
| 54 | 122,192 | 35,5247  | 13,9172 | 13,6661 | 13,6045 | 13,6198 | 14,255 | 13,928 | 13,466 |        | 0,3378 | 0,0108  | 0,3082  | 0,0616  | -0,2001 | 0,2619  |
| 55 | 137,55  | 7,01892  | 16,0974 | 15,4994 | 15,2626 | 15,1829 | 16,62  | 15,77  | 15,27  | 0,598  | 0,5226 | -0,3274 | 0,5871  | 0,2368  | -0,2294 | 0,2706  |
| 56 | 137,554 | 7,04951  | 16,1085 | 15,5379 | 15,2956 | 15,2    | 16,65  | 15,79  | 15,31  | 0,5706 | 0,5415 | -0,3185 | 0,59    | 0,2423  | -0,2279 | 0,2521  |
| 57 | 137,607 | 7,0215   | 15,3923 | 14,4821 | 14,1215 | 13,9616 | 16,04  | 14,87  | 14,15  | 0,9102 | 0,6477 | -0,5223 | 0,9084  | 0,3606  | -0,3321 | 0,3879  |
| 58 | 150,452 | 20,7868  | 15,3645 | 14,8767 | 14,6886 | 14,6452 | 15,83  | 15,12  | 14,73  | 0,4878 | 0,4655 | -0,2445 | 0,4748  | 0,1881  | -0,1467 | 0,2433  |
| 59 | 150,497 | 20,7796  | 15,0311 | 13,848  | 13,357  | 12,891  | 15,91  | 14,35  | 13,34  | 1,1831 | 0,8789 | -0,6811 | 1,459   | 0,491   | -0,508  | 0,502   |
| 60 | 161,688 | 17,3102  | 14,8694 | 14,2963 | 14,0573 | 13,9836 | 15,53  | 14,6   | 14,02  | 0,5731 | 0,6606 | -0,2694 | 0,6164  | 0,239   | -0,2763 | 0,3037  |
| 61 | 161,71  | 17,2534  | 12,725  | 12,336  | 12,201  | 12,156  | 13,42  | 12,57  | 12,09  |        | 0,695  | -0,155  | 0,414   | 0,135   | -0,246  | 0,234   |
| 62 | 161,711 | 17,2599  | 16,0597 | 15,5208 | 15,3117 | 15,2523 | 16,83  | 15,84  | 15,27  |        | 0,7703 | -0,2197 | 0,5877  | 0,2091  | -0,2508 | 0,3192  |
| 63 | 170,864 | 16,3579  | 16,4718 | 15,6087 | 15,2796 | 15,1289 | 17,123 | 16,044 | 15,371 | 0,8631 | 0,6512 | -0,4278 | 0,9151  | 0,3291  | -0,2377 | 0,4353  |
| 64 | 170,871 | 16,3705  | 16,3761 | 15,8976 | 15,7293 | 15,6626 | 16,853 | 16,117 | 15,685 | 0,4785 | 0,4769 | -0,2591 | 0,4544  | 0,1683  | -0,2126 | 0,2194  |
| 65 | 170,872 | 16,4408  | 14,9725 | 14,5674 | 14,4456 |         |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |

|     |         |          |         |         |         |         |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |
|-----|---------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 68  | 178,806 | -0,22983 | 15,0606 | 14,6414 | 14,517  | 14,4831 | 15,507 | 14,863 | 14,518 | 0,4192 | 0,4464 | -0,1976 | 0,3799  | 0,1244  | -0,1234 | 0,2216  |
| 69  | 178,834 | -0,30823 | 14,2171 | 13,7838 | 13,6582 | 13,5999 | 14,709 | 14,032 | 13,64  | 0,4333 | 0,4919 | -0,1851 | 0,4321  | 0,1256  | -0,1438 | 0,2482  |
| 70  | 178,897 | -0,27707 | 13,357  | 12,654  | 12,392  | 12,262  | 13,945 | 13,007 | 12,478 | 0,703  | 0,588  | -0,35   | 0,745   | 0,262   | -0,176  | 0,353   |
| 71  | 190,723 | 24,5216  | 15,6393 | 15,495  | 15,4995 | 15,5431 | 15,92  | 15,57  | 15,35  | 0,1443 | 0,2807 | -0,0693 | 0,0269  | -0,0045 | -0,145  | 0,075   |
| 72  | 190,725 | 24,5261  | 13,563  | 13,137  | 12,852  | 12,694  | 14,18  | 13,19  | 12,65  |        | 0,617  | -0,373  | 0,496   | 0,285   | -0,487  | 0,053   |
| 73  | 190,839 | 24,4426  | 11,885  | 11,467  | 11,34   | 11,309  | 12,3   | 11,67  | 11,3   |        | 0,415  | -0,215  | 0,361   | 0,127   | -0,167  | 0,203   |
| 74  | 191,386 | 28,8984  | 14,8534 | 14,2996 | 14,1289 | 14,0692 | 15,41  | 14,552 | 14,066 | 0,5538 | 0,5566 | -0,3014 | 0,4828  | 0,1707  | -0,2336 | 0,2524  |
| 75  | 191,402 | 28,766   | 15,5786 | 14,9156 | 14,6786 | 14,5732 | 16,151 | 15,231 | 14,681 | 0,663  | 0,5724 | -0,3476 | 0,6578  | 0,237   | -0,2346 | 0,3154  |
| 76  | 191,467 | 28,8737  | 14,6299 | 14,2659 | 14,1424 | 14,1252 | 15,033 | 14,422 | 14,049 | 0,364  | 0,4031 | -0,2079 | 0,2968  | 0,1235  | -0,2169 | 0,1561  |
| 77  | 191,535 | 28,9185  | 14,6537 | 13,9359 | 13,6867 | 13,5674 | 15,28  | 14,278 | 13,671 | 0,7178 | 0,6263 | -0,3757 | 0,7106  | 0,2492  | -0,2649 | 0,3421  |
| 78  | 200,411 | -2,17201 | 16,2029 | 15,7782 | 15,6337 | 15,5985 | 16,66  | 15,98  | 15,59  | 0,4247 | 0,4571 | -0,2229 | 0,3815  | 0,1445  | -0,1882 | 0,2018  |
| 79  | 200,419 | -2,16481 | 18,0793 | 17,5934 | 17,3956 | 17,3064 | 18,55  | 17,82  | 17,42  |        | 0,4707 | -0,2593 | 0,5136  | 0,1978  | -0,1734 | 0,2266  |
| 80  | 200,423 | -2,19162 | 17,1002 | 16,5035 | 16,2834 | 16,2001 | 17,61  | 16,77  | 16,27  |        | 0,5098 | -0,3302 | 0,5699  | 0,2201  | -0,2335 | 0,2665  |
| 81  | 201,414 | -8,82198 | 13,35   | 13,6486 | 13,9372 | 14,1158 | 13,341 | 13,481 | 13,529 |        |        | 0,131   | -0,6348 | -0,2886 | -0,1196 | -0,1676 |
| 82  | 201,457 | -8,83988 | 13,7527 | 13,424  | 13,4283 | 13,5835 | 13,984 | 13,591 | 13,339 |        | 0,2313 | -0,1617 | 0,0075  | -0,0043 | -0,085  | 0,167   |
| 83  | 201,459 | -8,81087 | 14,2467 | 13,8021 | 13,7572 | 13,6407 | 14,71  | 14,003 | 13,608 | 0,4446 | 0,4633 | -0,2437 | 0,3623  | 0,0449  | -0,1941 | 0,2009  |
| 84  | 201,461 | -8,84873 | 13,6844 | 13,397  | 13,147  | 12,956  | 14,167 | 13,406 | 12,98  | 0,2874 | 0,4826 | -0,2784 | 0,45    | 0,25    | -0,417  | 0,009   |
| 85  | 201,522 | -8,84341 | 12,225  | 11,918  | 11,829  | 11,814  | 12,667 | 12,08  | 11,734 | 0,307  | 0,442  | -0,145  | 0,266   | 0,089   | -0,184  | 0,162   |
| 86  | 204,701 | -0,08091 | 13,9349 | 13,371  | 13,166  | 13,0794 | 14,45  | 13,62  | 13,14  | 0,5639 | 0,5151 | -0,3149 | 0,5406  | 0,205   | -0,231  | 0,249   |
| 87  | 204,727 | -0,07889 | 13,7579 | 13,477  | 13,371  | 13,3534 | 14,15  | 13,58  | 13,24  | 0,2809 | 0,3921 | -0,1779 | 0,2266  | 0,106   | -0,237  | 0,103   |
| 88  | 204,811 | -0,125   | 13,166  | 12,177  | 11,776  | 11,553  | 13,85  | 12,56  | 11,86  |        | 0,684  | -0,606  | 1,007   | 0,401   | -0,317  | 0,383   |
| 89  | 204,827 | -0,09271 | 14,4783 | 13,9417 | 13,6851 | 13,5539 | 15,01  | 14,19  | 13,72  | 0,5366 | 0,5317 | -0,2883 | 0,6361  | 0,2566  | -0,2217 | 0,2483  |
| 90  | 210,543 | 0,59931  | 15,9354 | 15,3144 | 15,1103 | 15,0167 | 16,482 | 15,567 | 15,049 | 0,621  | 0,5466 | -0,3684 | 0,5503  | 0,2041  | -0,2654 | 0,2526  |
| 91  | 210,557 | 0,5924   | 15,9761 | 15,6153 | 15,4826 | 15,4394 | 16,348 | 15,803 | 15,384 | 0,3608 | 0,3719 | -0,1731 | 0,3636  | 0,1327  | -0,2313 | 0,1877  |
| 92  | 210,569 | 0,58868  | 13,116  | 12,409  | 12,125  | 11,972  | 13,578 | 12,561 | 12,003 |        | 0,462  | -0,555  | 0,589   | 0,284   | -0,406  | 0,152   |
| 93  | 210,573 | 0,58899  | 15,009  | 14,4206 | 14,1916 | 14,0738 | 15,544 | 14,678 | 14,179 | 0,5884 | 0,535  | -0,331  | 0,6042  | 0,229   | -0,2416 | 0,2574  |
| 94  | 210,588 | 0,58711  | 14,4617 | 13,2234 | 12,5845 | 12,1774 | 15,319 | 13,81  | 12,863 | 1,2383 | 0,8573 | -0,6517 | 1,6326  | 0,6389  | -0,3604 | 0,5866  |
| 95  | 211,597 | -5,42966 | 15,5678 | 15,1226 | 14,9693 | 14,9216 | 16,05  | 15,34  | 14,91  | 0,4452 | 0,4822 | -0,2278 | 0,4184  | 0,1533  | -0,2126 | 0,2174  |
| 96  | 211,617 | -5,41423 | 17,181  | 16,4019 | 16,1147 | 16,0045 | 17,78  | 16,74  | 16,13  |        | 0,599  | -0,441  | 0,7355  | 0,2872  | -0,2719 | 0,3381  |
| 97  | 211,619 | -5,45926 | 16,4933 | 16,1696 | 16,0732 | 16,0536 | 16,96  | 16,37  | 16,01  | 0,3237 | 0,4667 | -0,1233 | 0,3164  | 0,0964  | -0,1596 | 0,2004  |
| 98  | 211,673 | -5,43351 | 14,958  | 14,2773 | 14,04   | 13,9072 | 15,57  | 14,58  | 14     | 0,6807 | 0,612  | -0,378  | 0,6728  | 0,2373  | -0,2773 | 0,3027  |
| 99  | 234,928 | -13,9821 | 15,0941 | 14,4287 | 14,1564 | 14,0445 | 15,632 | 14,685 | 14,14  | 0,6654 | 0,5379 | -0,4091 | 0,6405  | 0,2723  | -0,2887 | 0,2563  |
| 100 | 234,938 | -13,9303 | 15,5147 | 15,051  | 14,8513 | 14,7655 | 15,93  | 15,245 | 14,817 | 0,4637 | 0,4153 | -0,2697 | 0,4795  | 0,1997  | -0,234  | 0,194   |
| 101 | 234,96  | -13,8704 | 14,9225 | 14,1083 | 13,7338 | 13,5526 | 15,594 | 14,476 | 13,837 | 0,8142 | 0,6715 | -0,4465 | 0,9234  | 0,3745  | -0,2713 | 0,3677  |
| 102 | 234,966 | -13,8338 | 13,4801 | 12,876  | 12,489  | 12,253  | 14,118 | 13,033 | 12,402 | 0,6041 | 0,6379 | -0,4471 | 0,78    | 0,387   | -0,474  | 0,157   |
| 103 | 234,968 | -13,8004 | 14,9225 | 14,3804 | 14,1551 | 14,0602 | 15,393 | 14,608 | 14,136 | 0,5421 | 0,4705 | -0,3145 | 0,5478  | 0,2253  | -0,2444 | 0,2276  |
| 104 | 234,969 | -13,9131 | 15,5625 | 14,9146 | 14,6602 | 14,543  | 16,115 | 15,204 | 14,681 | 0,6479 | 0,5525 | -0,3585 | 0,661   | 0,2544  | -0,2336 | 0,2894  |
| 105 | 234,996 | -13,9626 | 15,9147 | 15,213  | 14,8686 | 14,7037 | 16,498 | 15,524 | 14,944 | 0,7017 | 0,5833 | -0,3907 | 0,8203  | 0,3444  | -0,269  | 0,311   |
| 106 | 235,005 | -13,7936 | 15,76   | 15,2914 | 15,0946 | 15,0356 | 16,178 | 15,482 | 15,052 | 0,4686 | 0,418  | -0,278  | 0,4464  | 0,1968  | -0,2394 | 0,1906  |
| 107 | 235,005 | -13,7936 | 15,76   | 15,2914 | 15,0946 | 15,0356 | 16,178 | 15,482 | 15,052 | 0,4686 | 0,418  | -0,278  | 0,4464  | 0,1968  | -0,2394 | 0,1906  |
| 108 | 235,02  | -13,9464 | 14,1823 | 13,416  | 12,93   | 12,63   | 14,954 | 13,677 | 12,959 |        | 0,7717 | -0,5053 | 1,047   | 0,486   | -0,457  | 0,261   |
| 109 | 235,02  | -13,9464 | 14,1823 | 13,416  | 12,93   | 12,63   | 14,954 | 13,677 | 12,959 |        | 0,7717 | -0,5053 | 1,047   | 0,486   | -0,457  | 0,261   |
| 110 | 235,027 | -13,8918 | 14,7841 | 14,3375 | 14,1429 | 14,0741 | 15,227 | 14,542 | 14,123 | 0,4466 | 0,4429 | -0,2421 | 0,4679  | 0,1946  | -0,2145 | 0,2045  |
| 111 | 235,027 | -13,8918 | 14,7841 | 14,3375 | 14,1429 | 14,0741 | 15,227 | 14,542 | 14,123 | 0,4466 | 0,4429 | -0,2421 | 0,4679  | 0,1946  | -0,2145 | 0,2045  |
| 112 | 235,057 | -13,9224 | 15,568  | 15,1316 | 14,9296 | 14,8359 | 15,994 | 15,311 | 14,899 | 0,4364 | 0,426  | -0,257  | 0,4751  | 0,202   | -0,2326 | 0,1794  |
| 113 | 235,057 | -13,9224 | 15,568  | 15,1316 | 14,9296 | 14,8359 | 15,994 | 15,311 | 14,899 | 0,4364 | 0,426  | -0,257  | 0,4751  | 0,202   | -0,2326 | 0,1794  |
| 114 | 235,068 | -13,8253 | 15,4638 | 14,9841 | 14,7769 | 14,6986 | 15,905 | 15,202 | 14,76  | 0,4797 | 0,4412 | -0,2618 | 0,5034  | 0,2072  | -0,2241 | 0,2179  |
| 115 | 235,069 | -13,9834 | 14,5158 | 13,9713 | 13,7632 | 13,6666 | 15,033 | 14,2   | 13,73  | 0,5445 | 0,5172 | -0,3158 | 0,5334  | 0,2081  | -0,2413 | 0,2287  |
| 116 | 235,087 | -13,9884 | 13,697  | 13,439  | 13,232  | 12,9749 | 14,104 | 13,405 | 12,973 | 0,258  | 0,407  | -0,292  | 0,4301  | 0,207   | -0,466  | -0,034  |
| 117 | 235,091 | -13,9913 | 13,9904 | 13,5548 | 13,3763 | 13,3066 | 14,383 | 13,732 | 13,32  | 0,4356 | 0,3926 | -0,2584 | 0,4254  | 0,1785  | -0,2348 | 0,1772  |
| 118 | 235,119 | -13,9344 | 14,7505 | 13,9908 | 13,6534 | 13,4516 | 15,412 | 14,328 | 13,713 | 0,7597 | 0,6615 | -0,4225 | 0,8764  | 0,3374  | -0,2778 | 0,3372  |
| 119 | 235,119 | -13,9344 | 14,7505 | 13,9908 | 13,6534 | 13,4516 | 15,412 | 14,328 | 13,713 | 0,7597 | 0,6615 | -0,4225 | 0,8764  | 0,3374  | -0,2778 | 0,3372  |
| 120 | 235,12  | -13,9837 | 15,4847 | 14,735  | 14,3765 | 14,1988 | 16,123 | 15,06  | 14,446 | 0,7497 | 0,6383 | -0,4247 | 0,8612  | 0,3585  | -0,289  | 0,325   |
| 121 | 235,12  | -13,9837 | 15,4847 | 14,735  | 14,3765 | 14,1988 | 16,123 | 15,06  | 14,446 | 0,7497 | 0,6383 | -0,4247 | 0,8612  | 0,3585  | -0,289  | 0,325   |
| 122 | 235,128 | -13,841  | 14,7886 | 14,247  | 14,038  | 13,9292 | 15,238 | 14,411 | 13,942 | 0,5416 | 0,4494 | -0,3776 | 0,4818  | 0,209   | -0,305  | 0,164   |
| 123 | 235,128 | -13,841  | 14,7886 | 14,247  | 14,038  | 13,9292 | 15,238 | 14,411 | 13,942 | 0,5416 | 0,4494 | -0,3776 | 0,4818  | 0,209   | -0,305  | 0,164   |
| 124 | 235,139 | -13,8265 | 14,7588 | 14,5184 | 14,4493 | 14,4166 | 15,014 | 14,593 | 14,296 | 0,2404 | 0,2552 | -0,1658 | 0,1764  | 0,0691  | -0,2224 | 0,0746  |
| 125 | 235,139 | -13,8265 | 14,7588 | 14,5184 | 14,4493 | 14,4166 | 15,014 | 14,593 | 14,296 | 0,2404 | 0,2552 | -0,1658 | 0,1764  | 0,0691  | -0,2224 | 0,0746  |
| 126 | 245,307 | -10,2433 | 15,3868 | 14,7352 | 14,4396 | 14,2987 | 15,903 | 15,019 | 14,465 | 0,6516 | 0,5162 | -0,3678 | 0,7203  | 0,2956  | -0,2702 | 0,2838  |
| 127 | 245,343 | -10,2638 | 14,1779 | 13,376  | 12,975  | 12,737  | 14,907 | 13,703 | 13,028 | 0,8019 | 0,7291 | -0,4749 | 0,966   | 0,401   | -0,348  | 0,327   |
| 128 | 245,345 | -10,2807 | 14,6225 | 14,0518 | 13,8256 | 13,7241 | 15,15  | 14,314 | 13,822 | 0,5707 | 0,5275 | -0,3085 | 0,5899  | 0,2262  | -0,2298 | 0,2622  |
| 129 | 252,054 | -19,3099 | 14,2774 | 13,3473 | 12,732  | 12,295  | 15,118 | 13,712 | 12,895 |        | 0,8406 | -0,5654 | 1,417   | 0,6153  | -0,4523 | 0,3647  |
| 130 | 252,081 | -19,2929 | 15,4166 | 14,4704 | 13,9942 | 13,7317 | 15,848 | 14,572 | 13,905 |        | 0,4314 | -0,8446 | 0,8403  | 0,4762  | -0,5654 | 0,1016  |
| 131 | 252,081 | -19,2743 | 15,4473 | 14,6743 | 14,2626 | 14,0532 | 16,061 | 15,033 | 14,393 | 0,773  | 0,6137 | -0,4143 | 0,9798  | 0,4117  | -0,2813 | 0,3587  |
| 132 | 252,088 | -19,2652 | 15,4428 | 14,8448 | 14,5531 | 14,4183 | 15,904 | 15,082 | 14,559 | 0,598  | 0,4612 | -0,3608 | 0,6637  | 0,2917  | -0,2858 | 0,2372  |
| 133 | 252,102 | -19,2741 | 15,072  | 14      |         |         |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |

|     |         |          |         |         |         |         |        |        |        |        |        |         |        |         |         |        |
|-----|---------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|
| 134 | 258,365 | -19,0337 | 15,7011 | 14,9304 | 14,5568 | 14,3483 | 16,346 | 15,274 | 14,673 | 0,7707 | 0,6449 | -0,4271 | 0,9257 | 0,3736  | -0,2574 | 0,3436 |
| 135 | 258,365 | -19,0255 | 15,7584 | 14,6053 | 14,0448 | 13,7246 | 16,598 | 15,118 | 14,316 | 1,1531 | 0,8396 | -0,6404 | 1,3934 | 0,5605  | -0,2893 | 0,5127 |
| 136 | 258,366 | -19,0234 | 15,0075 | 14,1823 | 13,7697 | 13,5442 | 15,687 | 14,546 | 13,898 | 0,8252 | 0,6795 | -0,4615 | 1,0018 | 0,4126  | -0,2843 | 0,3637 |
| 137 | 258,37  | -19,047  | 15,3364 | 14,5906 | 14,2016 | 13,979  | 15,915 | 14,902 | 14,27  | 0,7458 | 0,5786 | -0,4344 | 0,923  | 0,389   | -0,3206 | 0,3114 |
| 138 | 258,373 | -19,0481 | 14,8206 | 13,9229 | 13,5494 | 13,3045 | 15,543 | 14,33  | 13,633 | 0,8977 | 0,7224 | -0,4906 | 1,0255 | 0,3735  | -0,2899 | 0,4071 |
| 139 | 258,401 | -19,0118 | 15,5469 | 14,7171 | 14,3305 | 14,1244 | 16,255 | 15,095 | 14,441 | 0,8298 | 0,7081 | -0,4519 | 0,9706 | 0,3866  | -0,2761 | 0,3779 |
| 140 | 258,417 | -19,0403 | 15,4506 | 14,531  | 14,1278 | 13,9108 | 16,194 | 14,925 | 14,217 | 0,9196 | 0,7434 | -0,5256 | 1,0142 | 0,4032  | -0,314  | 0,394  |
| 141 | 304,944 | -19,8208 | 13,9469 | 13,389  | 13,369  | 13,0591 | 14,477 | 13,59  | 13,073 | 0,5579 | 0,5301 | -0,3569 | 0,5309 | 0,02    | -0,316  | 0,201  |
| 142 | 304,944 | -19,7813 | 13,8374 | 13,3854 | 13,423  | 13,209  | 14,221 | 13,555 | 13,134 | 0,452  | 0,3836 | -0,2824 | 0,346  | -0,0376 | -0,2514 | 0,1696 |
| 143 | 304,964 | -19,8335 | 13,9395 | 13,4027 | 13,418  | 13,1588 | 14,434 | 13,628 | 13,163 | 0,5368 | 0,4945 | -0,3115 | 0,4692 | -0,0153 | -0,2397 | 0,2253 |
| 144 | 304,966 | -19,8305 | 13,6681 | 13,2669 | 13,309  | 13,1045 | 14,088 | 13,438 | 13,043 | 0,4012 | 0,4199 | -0,2301 | 0,3335 | -0,0421 | -0,2239 | 0,1711 |
| 145 | 305,886 | -9,83121 | 14,9568 | 14,5255 | 14,3604 | 14,3168 | 15,412 | 14,738 | 14,326 | 0,4313 | 0,4552 | -0,2188 | 0,4212 | 0,1651  | -0,1995 | 0,2125 |
| 146 | 305,946 | -9,77256 | 14,9219 | 14,5449 | 14,414  | 14,3743 | 15,316 | 14,724 | 14,356 | 0,377  | 0,3941 | -0,1979 | 0,3497 | 0,1309  | -0,1889 | 0,1791 |
| 147 | 305,952 | -9,80322 | 15,6838 | 15,2191 | 15,0487 | 14,9907 | 16,13  | 15,444 | 15,02  | 0,4647 | 0,4462 | -0,2398 | 0,4533 | 0,1704  | -0,1991 | 0,2249 |
| 148 | 305,964 | -9,74145 | 15,7038 | 15,1874 | 15,0019 | 14,9486 | 16,184 | 15,42  | 14,976 | 0,5164 | 0,4802 | -0,2838 | 0,4714 | 0,1855  | -0,2114 | 0,2326 |
| 149 | 305,97  | -9,78885 | 15,6202 | 15,135  | 14,9722 | 14,9144 | 16,078 | 15,36  | 14,927 | 0,4852 | 0,4578 | -0,2602 | 0,4456 | 0,1628  | -0,208  | 0,225  |
| 150 | 310,651 | -19,3536 | 14,2455 | 13,7778 | 13,5599 | 13,4942 | 14,707 | 13,957 | 13,516 | 0,4677 | 0,4615 | -0,2885 | 0,4628 | 0,2179  | -0,2618 | 0,1792 |
| 151 | 310,657 | -19,3676 | 14,9619 | 14,5817 | 14,4251 | 14,3782 | 15,329 | 14,728 | 14,353 | 0,3802 | 0,3671 | -0,2339 | 0,3498 | 0,1566  | -0,2287 | 0,1463 |
| 152 | 310,676 | -19,2563 | 13,8301 | 13,494  | 13,397  | 13,3931 | 14,153 | 13,583 | 13,236 | 0,3361 | 0,3229 | -0,2471 | 0,1899 | 0,097   | -0,258  | 0,089  |
| 153 | 310,785 | -19,3596 | 13,1176 | 13,163  | 12,902  | 12,746  | 13,458 | 12,832 | 12,451 |        | 0,3404 | -0,2856 | 0,086  |         | -0,712  | -0,331 |
| 154 | 310,795 | -19,3457 | 13,9613 | 13,5845 | 13,394  | 13,2943 | 14,443 | 13,688 | 13,261 | 0,3768 | 0,4817 | -0,2733 | 0,3937 | 0,1905  | -0,3235 | 0,1035 |
| 155 | 310,979 | -10,7587 | 14,7599 | 14,3639 | 14,2287 | 14,1988 | 15,206 | 14,54  | 14,161 | 0,396  | 0,4461 | -0,2199 | 0,3412 | 0,1352  | -0,2029 | 0,1761 |
| 156 | 310,994 | -10,7868 | 16,0899 | 15,7297 | 15,5986 | 15,5503 | 16,52  | 15,911 | 15,544 | 0,3602 | 0,4301 | -0,1789 | 0,3607 | 0,1311  | -0,1857 | 0,1813 |
| 157 | 311,016 | -10,7607 | 15,1787 | 14,4684 | 14,1886 | 14,0695 | 15,756 | 14,818 | 14,231 | 0,7103 | 0,5773 | -0,3607 | 0,7485 | 0,2798  | -0,2374 | 0,3496 |
| 158 | 311,063 | -10,745  | 14,7666 | 14,3738 | 14,2511 | 14,2352 | 15,21  | 14,54  | 14,19  | 0,3928 | 0,4434 | -0,2266 | 0,3048 | 0,1227  | -0,1838 | 0,1662 |
| 159 | 330,597 | -8,98256 | 14,7364 | 14,3739 | 14,2434 | 14,2105 | 15,121 | 14,54  | 14,2   | 0,3625 | 0,3846 | -0,1964 | 0,3295 | 0,1305  | -0,1739 | 0,1661 |
| 160 | 330,618 | -9,00631 | 13,9829 | 13,6517 | 13,7288 | 13,5399 | 14,361 | 13,791 | 13,447 | 0,3312 | 0,3781 | -0,1919 | 0,2511 | -0,0771 | -0,2047 | 0,1393 |
| 161 | 330,619 | -8,98298 | 13,6481 | 13,336  | 13,175  | 13,0961 | 14,08  | 13,437 | 13,061 | 0,3121 | 0,4319 | -0,2111 | 0,3409 | 0,161   | -0,275  | 0,101  |
| 162 | 337,011 | -0,99356 | 15,8696 | 15,4855 | 15,3598 | 15,3123 | 16,26  | 15,66  | 15,3   | 0,3841 | 0,3904 | -0,2096 | 0,3477 | 0,1257  | -0,1855 | 0,1745 |
| 163 | 337,035 | -0,98933 | 14,2563 | 13,7987 | 13,7687 | 13,6043 | 14,73  | 13,99  | 13,57  | 0,4576 | 0,4737 | -0,2663 | 0,3857 | 0,03    | -0,2287 | 0,1913 |
| 164 | 337,077 | -0,91804 | 12,446  | 12,001  | 11,84   | 11,779  | 12,93  | 12,2   | 11,77  | 0,445  | 0,484  | -0,246  | 0,421  | 0,161   | -0,231  | 0,199  |
| 165 | 337,125 | -0,93562 | 14,5998 | 14,0033 | 13,7572 | 13,6194 | 15,16  | 14,27  | 13,76  | 0,5965 | 0,5602 | -0,3298 | 0,6506 | 0,2461  | -0,2433 | 0,2667 |
| 166 | 339,389 | 1,49115  | 14,5494 | 14,0472 | 13,8313 | 13,7761 | 15,03  | 14,26  | 13,8   | 0,5022 | 0,4806 | -0,2894 | 0,4839 | 0,2159  | -0,2472 | 0,2128 |
| 167 | 339,413 | 1,45769  | 15,134  | 14,5547 | 14,3352 | 14,2596 | 15,7   | 14,82  | 14,34  | 0,5793 | 0,566  | -0,314  | 0,5604 | 0,2195  | -0,2147 | 0,2653 |
| 167 | 339,413 | 1,45769  | 15,134  | 14,5547 | 14,3352 | 14,2596 | 15,7   | 14,82  | 14,34  | 0,5793 | 0,566  | -0,314  | 0,5604 | 0,2195  | -0,2147 | 0,2653 |
| 168 | 339,482 | 1,53287  | 15,7307 | 15,2397 | 15,0489 | 14,9923 | 16,22  | 15,46  | 15,02  | 0,491  | 0,4893 | -0,2707 | 0,4677 | 0,1908  | -0,2197 | 0,2203 |
| 169 | 339,54  | 1,53265  | 16,0456 | 15,6007 | 15,4389 | 15,3769 | 16,52  | 15,79  | 15,38  | 0,4449 | 0,4744 | -0,2556 | 0,4131 | 0,1618  | -0,2207 | 0,1893 |
| 170 | 339,551 | 1,45671  | 14,7407 | 14,0503 | 13,737  | 13,6423 | 15,4   | 14,37  | 13,8   | 0,6904 | 0,6593 | -0,3707 | 0,7277 | 0,3133  | -0,2503 | 0,3197 |
| 171 | 345,622 | -3,97011 | 15,3447 | 14,9553 | 14,8232 | 14,7844 | 15,772 | 15,11  | 14,753 | 0,3894 | 0,4273 | -0,2347 | 0,3256 | 0,1321  | -0,2023 | 0,1547 |
| 172 | 345,634 | -3,98147 | 14,4202 | 13,464  | 13,102  | 12,857  | 15,087 | 13,919 | 13,191 | 0,9562 | 0,6668 | -0,5012 | 1,062  | 0,362   | -0,273  | 0,455  |
| 173 | 345,648 | -3,9788  | 15,9791 | 15,259  | 14,9764 | 14,868  | 16,565 | 15,592 | 15,028 | 0,7201 | 0,5859 | -0,3871 | 0,724  | 0,2826  | -0,231  | 0,333  |
| 174 | 345,656 | -3,96428 | 13,8195 | 13,418  | 13,227  | 13,1471 | 14,291 | 13,53  | 13,135 | 0,4015 | 0,4715 | -0,2895 | 0,3829 | 0,191   | -0,283  | 0,112  |