

Ю. Кудря, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник
Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко

МУЛЬТИПОЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ГАЛАКТИК КАТАЛОГА 2MFGC

З використанням опублікованих раніше (VizieR On-line Data Catalog: J/other/Ap/49.450, 03/2011) пекулярних швидкостей та відстаней для 2724 галактик з каталогу 2MFGC, проведено мультипольний аналіз поля швидкостей на основі релятивістської геодезичної октупольної моделі. Значущості частини тензорних складових моделі на нашому статистичному матеріалі виявилися достатньо низькими, причому такими, що зазнають суттєвих коливань в залежності від глибини вибірки. Тому було проведено спрощення моделей шляхом відкидання найменш значущих тензорних складових окремо для чотирьох вибірок (повної вибірки з 2724 галактик та її трьох підвибірок з обмеженнями глибини значеннями 10000 км/с, 8000 км/с та 6000 км/с). Приймаючи до уваги суттєву кореляцію між диполем та квадратичним диполем, квадруполем та квадратичним квадруполем, було визначено оптимальні моделі, єдині для всіх вибірок, з максимальною кількістю значущих тензорних компонент, в рамках яких є коректним оцінка певного мультиполя. У всіх визначеннях дипольна складова узгоджується за величиною з передбаченням космологічної Λ CDM-моделі. Структура квадруполя у всіх випадках виявилася близькою до такої, що відповідає агрегації матерії у двох перпендикулярних напрямках. Проведено порівняння наших визначень старших мультиполів з визначеннями в інших роботах.

Ju.N. Kudrya, Ph.D.
Astronomical observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv

MULTIPOLE ANALYSIS OF THE VELOCITY FIELD OF THE 2MFGC GALAXIES

Using previously published (VizieR On-line Data Catalog: J/other/Ap/49.450, 03/2011) individual peculiar velocities and distances for 2724 galaxies from 2MFGC catalog, multipole analysis of the velocity field was carried out based on relativistic geodesic octupole model. Significances of the tensor components of the model in our statistical material were found to be rather low, and they are subject of significant fluctuations depending on the depth of the sample. Therefore a simplification of the model was carried out discarding the least significant tensor components, and this was done separately for the four samples (total sample of 2724 galaxies and its three subsamples with the depth values of 10000 km/s, 8000 km/s and 6000 km/s). Taking into account the significant correlation between the dipole and the quadratic dipole, quadrupole and quadratic quadrupole, it was defined optimal models, which are the same for all subsamples, with maximum number of significant tensor components, in which there is a correct estimation of certain multipoles. All our dipole determinations are in an agreement with Λ CDM cosmological model. Quadrupole structure in all cases was close to that corresponding to agglomeration of matter in two perpendicular directions. The comparison of our high multipoles determinations with the results in other studies was conducted.

УДК 521.96, 520.338, 52-14

С. Шатохіна, мол. наук. співроб.,
Л. Казанцева, канд. фіз.-мат. наук,
В. Андрук, наук. співроб.,
Ю. Процюк, канд. фіз.-мат. наук

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Головна Астрономічна Обсерваторія НАН України

СИСТЕМА ПЛУТОНА З ОЦИФРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФОТОГРАФІЧНИХ ПЛАТІВК

Планетна система Плутона внаслідок своєї віддаленості, недавнього відкриття компонентів та недостатності спостережних даних залишається недостатньо вивченою. Сучасний підхід до переопрацювання ранніх спостережень Плутона з використанням нових технологій вимірювань та обробки може бути ефективним для побудови моделей планетної системи та теорії її руху. Як результат об'єднання зусиль трьох українських обсерваторій – учасників проекту УкрВО – зібрані, оцифровані й опрацьовані спостереження Плутона за 1961–1990 рр., що увійшли до об'єднаного архіву УкрВО. З використанням єдиних методик оцифрування астрономічних зображень і подальшої їх обробки для спостережень 5 телескопів отримано каталог положень і зоряних величин системи Плутона. Проведено аналіз отриманих (О-С) положень та зоряних величин по відношенню до сучасних стандартних ефемерид руху планети та порівняння з результатами обробки інших авторів.

Вступ. Наземні спостереження Плутона, зокрема фотографічні ХХ сторіччя, залишаються важливим джерелом інформації для створення чисельних ефемерид і побудови теорій руху планетної системи. Сучасний підхід до переопрацювання ранніх спостережень з використанням нових технологій вимірювань і обробки може бути ефективним для уточнення як положень небесних об'єктів, так і вивчення особливостей їхніх поверхонь через оцінку змін яскравостей. Роботи з переопрацювання старих фотографічних спостережень вже дозволили отримати певні результати. Для накопичення та можливості оперативного обміну астрономічними даними у 2002 р. запрацював міжнародний проект Альянсу віртуальних обсерваторій, до якого у 2011 р. підключилась і Українська віртуальна обсерваторія (УкрВО). Відновлення та використання на якісно новому рівні точності цінних астрономічних спостережних даних є однією з задач УкрВО.

Фотометричні оцінки планетної системи Плутона. З моменту відкриття наземні спостереження далекого об'єкту околиць Сонячної системи ще не дозволили відспостерігати повну орбіту планети. Умови її видимості з земної поверхні, малий кутовий розмір та слабка яскравість ускладнюють спостереження, а космічні спостереження тривають не так давно. Тому залишається багато невизначеностей в питаннях руху, моделі планетної системи та фізичних особливостей Плутона. Ексцентриситет його орбіти, в поєднанні з великим нахилом, викликає суттєві зміни сонячної інсоляції, що має привести до змін на поверхні та атмосферних варіацій. Але складна геометрія видимості планети викликає доволі великі модуляції в фотометрії, які не мають нічого спільного з зазначеними змінами. Щоб зрозуміти сезонну мінливість поверхні Плутона, важливо мати змогу відокремити її від так званих геометричних варіацій, а це можливо зробити лише шляхом аналізу великих рядів спостережень на тривалих проміжках часу, охопивши якнайбільшу ділянку орбіти.

Подібні дослідження розпочались у 70-х роках минулого століття. Спостереження велись різними методами. Наприклад, на основі обробки 50-ти фотографічних та фотоелектричних спостережень на Північній станції ДАІШ пері-

© Шатохіна С., Казанцева Л., Андрук В., Процюк Ю., 2016

оду 1953–1983 рр. були уточнені значення періодів змін яскравості Плутона та виявлено максимальну яскравість почервоніння при фазах 0.6–0.7 і збільшення асиметрії кривої блиску планети [1], вперше помічену у 1973 р. [2]. Причому фотографічні спостереження показали меншу яскравість планети, ніж фотоелектричні. Фотометричні спостереження Плутона 1988 р. з 1-м телескопом Інституту астрофізики Таджикистану (Санглок) підтвердили зниження яскравості планети з часом та асиметричність кривої блиску [3]. Сумарні криві блиску 1954–1993 рр. показали збільшення амплітуди змін, додані до них BVR-виміри 1999 р., виконані в обсерваторії Тейбл-Маунтін (Каліфорнія, США), та порівняння їх з модельними кривими, дозволили прийти до висновку, що зміни блиску можуть бути викликані ефектами складної геометрії видимості планети [4]. Спостереження космічної місії 2002–2003 рр. переконливо довели періодичні зміни яскравості Плутона, які можна пояснити існуванням декількох сезонів на планеті та відповідними змінами альbedo планети [5]. Подальше накопичення спостережень, аналіз кривих блиску Плутона та Харону, порівняння їх зі статичними моделями, побудованими на основі зображень, отриманих телескопом Хаббл, дозволяють зрозуміти складну сезонність змін поверхні планети [6]. Але, враховуючи невеликий відрізок часу спостережень планети позаатмосферно, неможливо відтворити повну модель без залучення результатів ранніх наземних спостережень.

Опис методики та результати. Внаслідок об'єднання зусиль 3-х українських обсерваторій – учасників проекту УкрВО [7, 8] – зібрані, оцифровані й опрацьовані спостереження Плутона за 1961–1990 рр., що є в архівах бази даних УкрВО. З використанням єдиних методик оцифрування астронегативів й подальшої їх обробки для всіх спостережень цих обсерваторій отримано каталог [9] 58 положень і В зоряних величин системи Плутона, широко розподілених за часом по орбіті на проміжку 30 років. Але, на жаль, вони не рівномірно розподілені на цьому інтервалі часу, внаслідок чого існує зовсім не заповнений спостереженнями період 1969–1978 рр., але переважна кількість всіх спостережень отримана в 1979–1990 рр. Це зауваження в подальшому додає незручностей в аналізі отриманих даних і перешкоджає узагальненню результатів. Хоча всі дані отримані за єдиними методиками оцифрування платівок й подальшої обробки сканів, очікувалось одержати похибки, дуже подібні за величиною й джерелами їх виникнення для спостережень кожного з 5 телескопів 3-х обсерваторій. В верхній частині таблиці 1 для кожного з телескопів подані результати порівнянь отриманих нами положень Плутона з ефемеридними. З метою порівнянь з аналогічними нашими результатами [10, 11] за класичною методикою та других авторів [12, 13] з Пулково і Балдоне пороховані такі ж дані, які приведені в нижній частині таблиці 1. Для всіх даних використана ефемерида JPL PLU43-DE431 [14]. З огляду даних таблиці – середні значення О-С по координаті δ та їх середньоквадратичні похибки подібні по всіх телескопах. По координаті α спостерігається не тільки різні середні значення, а й більший розкид О-С відносно середніх значень. За результатами інших авторів значення цих величин інші, хоча великий розкид теж спостерігається. Як відомо, на положення Плутона мають вплив різні кінематико-динамічні параметри системи Плутона. Можливо, дослідження і врахування ефектів їх впливу дозволить покращити наші середньоквадратичні похибки.

Таблиця 1. Результати порівняння отриманих положень Плутона с ефемеридою JPL PLU43-DE431

Телескоп	Кількість положень	(O-C) $_{\alpha}$ arcsec	(O-C) $_{\delta}$ arcsec	σ_{α} arcsec	σ_{δ} arcsec	B-V $_m$
Результати цифрових зображень фотоплатівок з Плутоном						
ПДА ГАО	2	.62	-.32	$\pm .63$	$\pm .01$	1.29
ПША ГАО	23	.20	-.15	.52	.58	0.07
АМР КАО	22	-.29	-.15	.73	.52	1.27
АЗТ КАО	2	.08	-.19	.54	.14	0.37
ЗА МАО	9	.27	-.38	.72	.51	1.69
Σ	58	.04	-.19	.68	.52	.79 $\pm$.90
Результати минулих класичних обробок платівок з Плутоном						
ГАО	21	-.02	.19	.61	.44	–
КАО	13	-.61	.01	.58	.48	–
Результати інших авторів						
Балдоне – 1991–1994						
Schmidt telescope	29 (1991–1992)	.43	.25	.20	.36	–
	42 (1991,1992,1994)	.28	.08	.32	.42	–
Пулково – 1999 ПЗС						
ЗА-320	18	.06	.48	.22	.13	–

Окрім точних положень в процесі обробки оцифрованих зображень фотоплатівок одержані зоряні величини всіх зафіксованих об'єктів. Оскільки опорним каталогом був каталог зірок Tycho-2, то зоряні величини В(Т), як і координати, отримані в системі цього каталогу. Ми спробували використати наші дані для підтвердження окремих фотометричних результатів, отриманих саме в тих роках авторами роботи [3]. Це – довгочасове послаблення інтегрального блиску Плутона ($\sim 0.^m3$ за 30 років в В-смузі), монотонне збільшення показника кольору В-V ($\sim 0.^m004$ /рік).

На інтервалі 30 років наших спостережень геоцентричні і геліоцентричні відстані Плутона зменшилися приблизно на 5 а.о., що проілюстровано рис. 1.

В момент 1989-09-05 планета досягла найменшої відстані до Землі і Сонця (перигелій), після чого вона знов віддаляється. (Окрім цього, на інтервалі 1986–1990 відбувалися взаємні затемнення й покриття Плутона і Харона, які настають раз на 124 роки). Також існує залежність зоряних величин планети від її фазового кута, який змінювався протягом часу спостережень в межах 2 градусів. Для виключення впливу цих зазначених факторів була проведена редукція до середньої опозиції всіх отриманих зоряних величин В(Т) Плутона за формулами:

$$M_{mo} = M_o - 5 \lg \left[\frac{r}{a(a-1)} \right] - \Delta m(\alpha)$$

$$\Delta m(\alpha) = \alpha \beta$$

де M_{mo} – зоряна величина, віднесена до середньої опозиції, M_o – спостережувана, r та l – гео- та геліоцентричні відстані, a – велика піввісь орбіти Плутона, $\Delta m(\alpha)$ – фазова функція, α – фазовий кут.

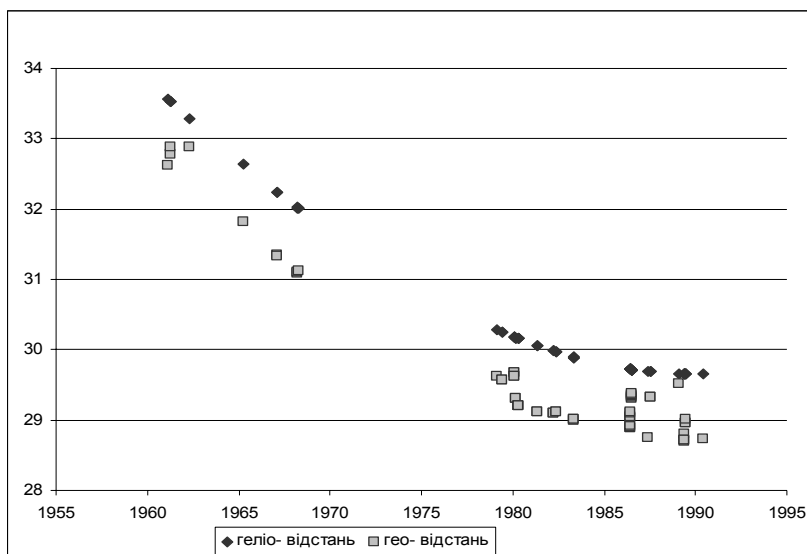


Рис. 1. Зміни геоцентричних і геліоцентричних відстаней Плутона протягом спостережень 1961–1990 рр.

Значення лінійного фазового коефіцієнта $\beta = 0.041$ зор.вел./град. було використано з [3]. Його величина підтвержується розподілом по фазових кутах ефемеридних значень приблизної візуальної зоряної величини M_{Verh} (Плутон+Харон), обчислених для наших спостережень за ефемеридою JPL PLU43-DE431 (рис. 2). Зауважимо, що ефемеридні M_V теж були редуковані до середньої опозиції. А, порівнюючи опубліковані в роботі [3] спостережні зоряні величини M_V Плутона і ефемеридні M_{Verh} , отримана різниця $V - V_{\text{Verh}}$, яка дорівнює $\sim 0.3^m$.

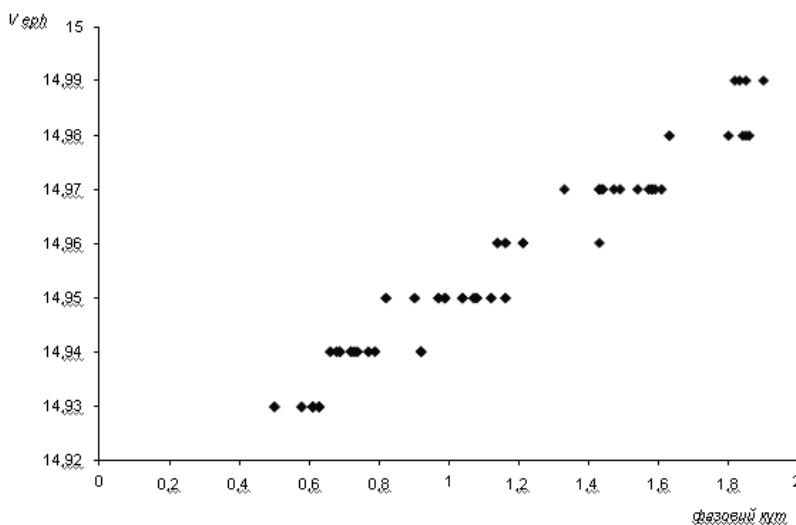


Рис. 2. Розподіл по фазових кутах ефемеридних значень M_{Verh} , редукованих до середньої опозиції

На рис. 3 приведено часовий розподіл редукованих до середньої опозиції (з урахуванням фазової функції) зоряних величин $B(T)$, отриманих нами по спостереженнях на всіх телескопах. На цьому рисунку додатково для порівняння в іншій V-смузі нанесені ефемеридні M_{Verh} (DE431) і опубліковані M_V величини Плутона, отримані в 1988 на телескопі Санглок.

За даними рисунка спостерігається "провал" спостережень на ДША телескопі у порівнянні із іншими, що можна пояснити різними фотометричними системами телескопів. Зоряні величини, одержані по спостереженнях на ДША, близькі за величиною до візуальних M_V .

На рис. 4 зображені усереднені значення $B(T) - V_{\text{Verh}}$ для кожного телескопа у порівнянні з результатами інших авторів. Середня квадратична похибка обрахунку зоряної величини $B(T)$ на фотопластинці по всіх телескопах складає 0.3^m . Але для кожного з телескопів розкид окремих значень від середнього великий (середньоквадратичне відхилення $\sigma = (0.5 \div 0.7)^m$ для різних телескопів). З огляду на рисунок, значення $B(T) - V_{\text{Verh}}$ для кожного телескопа мають не тільки великий розкид, але й систематично зміщені. Це можна пояснити неідентичністю фотометричних систем телескопів і додати до отриманих значень $B(T)$ деяку постійну для кожного телескопа величину, щоб таким чином позбавитися систематичних невідповідностей. Для телескопів ЗА MAO і AMP KAO вона приблизно дорівнює $\sim -0.5^m$, а для ПША ГАО $\sim +1.0^m$. Або причина цих зміщень інша.

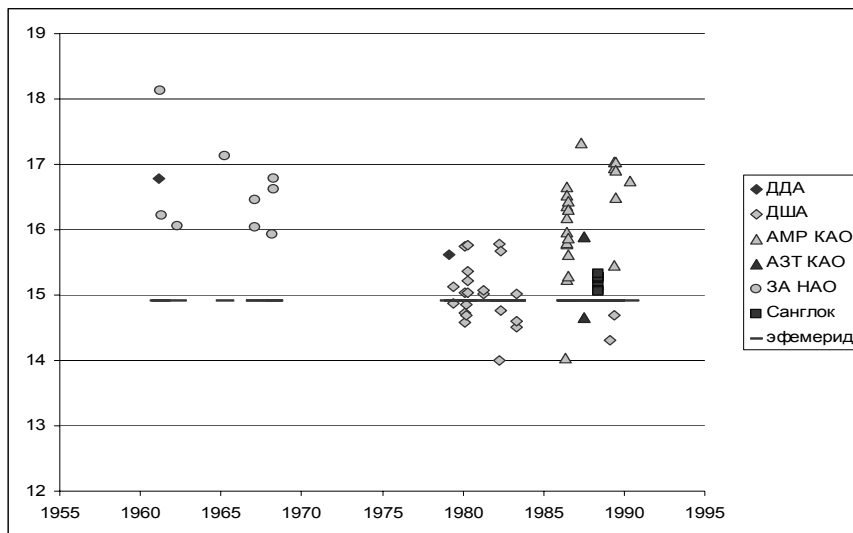


Рис. 3. Розподіл за часом зоряних величин $V(T)$ по даних цифрових зображень фотоплатівок

В той же час використана методика обробки, протестована на інших програмах та об'єктах досліджень, показує узгодженість результатів та їхню достовірність [15, 16]. Для перевірки точності фотометричних оцінок Плутона додатково була проведена наступна процедура. Для телескопа ЗА МАО, кожна фотоплівка була просканована 6 разів і кожен скан пройшов окрему обробку. Хоча зоряна величина Плутона на охопленому періоді спостережень 1961–1968 р. змінювалась від $15,1$ до $17,4^m$, середнє квадратичне відхилення визначень зоряної величини для кожної плівки по 6-ти сканах становить близько $0,02^m$. Крім того, для кожної плівки були оцінені середні радіуси зображень зірок певних зоряних величин (прив'язаних до опорного каталогу) та інтенсивність центру зображення в умовних одиницях та порівняні з відповідними величинами для Плутона (рис. 5.). Отримане порівняння підтверджує достовірність результатів. Варто врахувати, що зображення Плутона, маючи середні кутові розміри близько $0,1''$, на фотографічних зображеннях має мало відрізнятися від зображень зірок, тільки більш розмите.

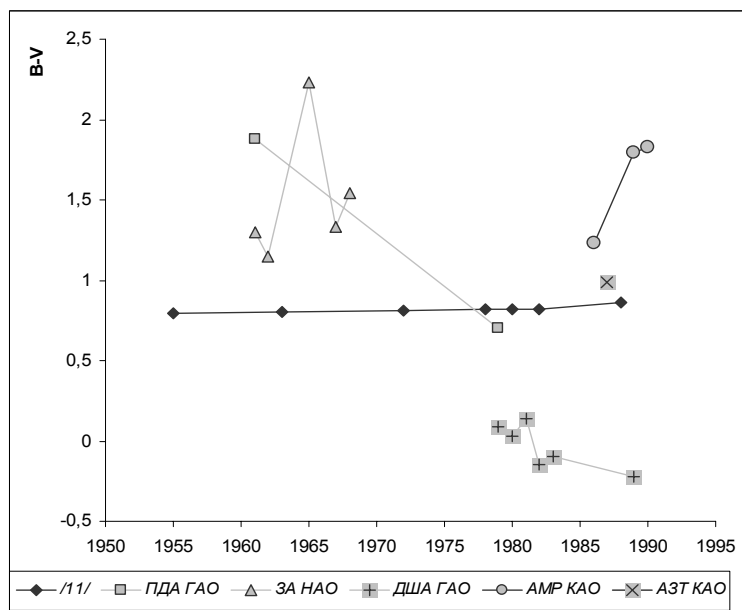


Рис. 4. Значення показників кольору $B(T)-V_{\text{eph}}$, отриманих за цифровими зображеннями фотоплатівок у порівнянні з опублікованими в роботі [3]

Висновки. Опрацювання оцифрованих астрономічних фотографічних знімків попередніх років розширює діапазон спостережних даних, дає можливість підвищити точність отриманих результатів з врахуванням нових даних та методик обробки. В той же час, алгоритми та методи цих опрацювань ще до кінця не апробовані, залишається багато не вивчених питань і не зрозумілих, поки що не пояснених результатів.

Щоб отримати вірогідний часовий тренд зоряних величин, зазначений в роботі [3], необхідне продовження досліджень в напрямку вивчення фотометричних систем використаних телескопів і з'ясування причин отриманих систематичних зміщень. Якби розподіл по часовому проміжку наших спостережень був більш рівномірним, можливо, можна було б отримати тренд по кожному телескопу окремо, не зважаючи на зазначені перепони.

Висловлюємо вдячність с.н.с. ГАО НАНУ Кулик І.В. за допомогу в обговоренні фотометричних результатів роботи.

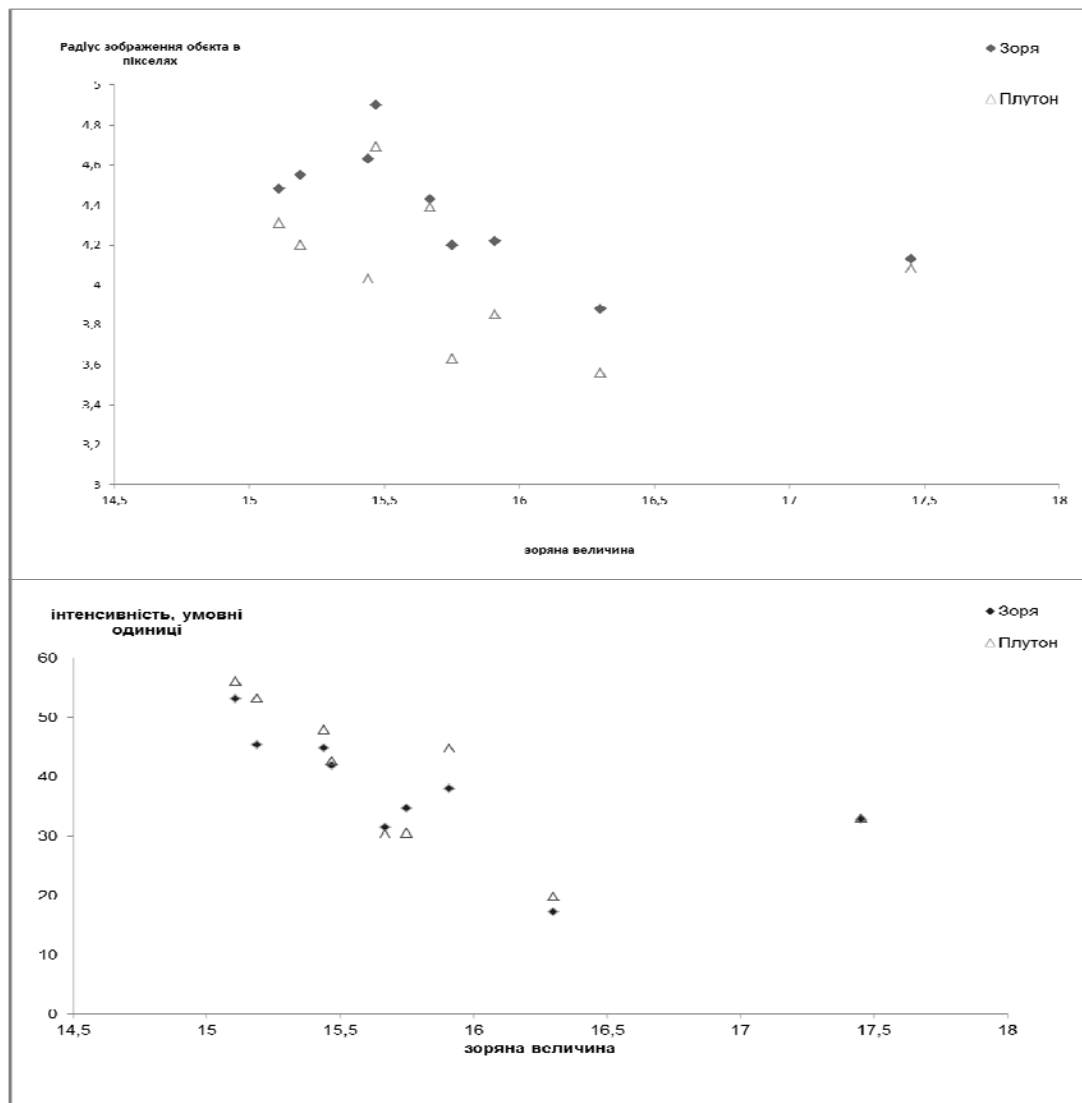


Рис. 5. Порівняння розмірів зображень зірок на знімках з зображеннями Плутона на фотоплівках ЗА НАО (згори) та відповідних величин інтенсивності центру зображень (знизу)

Список використаних джерел

1. Лютый В.М., Тарашук В.П. Фотометрические исследования Плутона вблизи перигелия. II. Уточнение периода вращения. Показатели цвета // Письма в Астрон. журн. – 1984. – V. 10, N. 7 – P. 542–548.
2. Anderson L.E., Fix J.D. Pluto. New photometry and determination of the axis of rotation // Icarus – 1973. – Vol. 20? N 1 – P. 279–283.
3. Аврамчук В.В., Рахимов В.Ю., Чернова Г.П., Шавловский В.И. Фотометрия и поляриметрия Плутона вблизи перигелия // Кинематика и физика неб. тел. – 1992 - Т. 8, № 4. – С. 37–45.
4. Buratti B.J., Hillier J.K., Heinze A., Hicks M.D. Pluto: Photometric evidence for volatile transport? // Bul. AA S – 2000. – Vol. 32 – P. 1082.
5. Buie M., Grundy W., Young E., Young L., Stern A. Pluto and Charon with the Hubble Space Telescope. I. Monitoring Global Change and Improved Surface Properties from Light Curves // The Astr. Journ. – 2010. – Vol. 139, N. 3 – P. 1117–1127.
6. Buratti B. J., Dalba P. A., Hicks M., Chu D., O'Neill A., Chesley J. P. Volatile Transport on Pluto: First Results from the 2013 Observing Season // American Geophysical Union, Fall Meeting – 2013. – abstract #P51B-1743.
7. Вавилова И.Б., Пакуляк Л.К., Шляпников А.А., Процюк Ю.И., Саваневич В.Е., Андронов И.Л., Андрук В.Н., Кондрашова Н.Н., Бакланов А.В., Головин А.В., Федоров П.Н., Ахметов В.С., Исак И.И., Мажаев А.Э., Головя В.В., Вирун Н.В., Золотухина А.В., Казанцева Л.В., Вирнина Н.А., Бреус В.В., Кашуба С.Г., Чинарова Л.Л., Кудашкина Л.С., Епишев В.П. Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение // Кинематика и физика небес. тел. – 2012 – Т. 28, N 2. – с. 59–80.
8. Pakuliak L. DBGPA V2.0, <http://gua.db.ukr-vo.org/>
9. Казанцева Л.В., Шатохина С.В., Процюк Ю.И., Ковылянская О.Э., Андрук В.Н. Результаты обработки оцифрованных фотографических наблюдений Плутона из коллекций УкрВО // КФНТ – 2014 (в друкі).
10. Тельнюк-Адамчук В.В., Пасечник С.В. Результаты позиционных астрофотографических наблюдений Плутона // Вестн. Киев. Ун-та. Астрономия – 1989 – 31 – С. 82–83.
11. Shatkhina S.V. Astrometric positions of the external planets and their satellites // www.mao.kiev.ua/ast/unp.php
12. Ryl'kov. Equatorial geocentric coordinates of Pluto from the observations 1991–1994 with Baldone Schmidt telescope // Astron. Astrophys., Suppl. Ser., 1996, Vol. 118, P. 105–110.
13. Девяткин А.В. Астрометрические наблюдения системы Плутон-Харон на зеркальном астрографе ЗА-320 в 1999 // Известия ГАО № 214, с. 361–369.
14. Jon. Giorgini HORIZONS Web-Interface <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.
15. Яценко А.І., Андрук В.М., Шатохина С.В. Перші результати астрометричної та фотометричної обробки сканованих пліток ПДА ГАО НАНУ // Вісник КНУ ім.Т. Шевченка. Сер. Астрономія – 2011. – Вип. 47 – С. 35–38.
16. Yatsenko A.I., Pakuliak L.K., Andruk V.M., Kazantseva L.V. Re-Processing Kiev Observatory Plates for the Ukraine VO // SCAN-IT PDPP Newsletter – 2013. – N. 6 – P. 6–9.