

### ВИЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРА СОНЦЯ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ

*Проблема визначення діаметра сонячного диска та виявлення можливих його змін була важливою в історії науки і залишається актуальною на сучасному етапі астрономічних досліджень. У статті коротко викладені історія становлення та суть методу фотометричних спостережень затемнень Сонця, що використовується в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету для визначення діаметра сонячного диска. Наведені структурна схема та характеристики обладнання, вимоги до процедури спостережень, рівняння кривої блиску і коротко викладено метод визначення радіуса сонячного диска. Радіус сонячного диска для відстані 1 а. о. становить  $959''.70 \pm 0''.12$  за спостереженнями затемнення 11 липня 1991 р. та  $959''.66 \pm 0''.03$  за спостереженнями затемнення 11 серпня 1999 р. Ці результати порівнюються з результатами інших методів.*

*Problem of solar diameter determination and its probable variations discovering was importance for science history and remains actual at present-day phase of astronomical investigations. The history of settling and content of the technique of solar eclipse photometric observations, that is used in Astronomical observatory of National Taras Shevchenko university of Kyiv for solar disk diameter determination, are stated. Structure chart and properties of equipment, requirement to observational procedure, light curve equation have been outlined and solar disk radius determination technique has been stated briefly. Solar disk radius at distance 1 AU is equal to  $959''.70 \pm 0''.12$  from July 11, 1991 eclipse observations and  $959''.66 \pm 0''.03$  from August 11, 1999 eclipse observations. The results obtained are compared with results of other techniques.*

**Вступ.** Діаметр – один з основних параметрів, який характеризує Сонце як зорю і визначається безпосередньо з астрономічних спостережень. Моделі внутрішньої будови Сонця калібруються за його діаметром, визначеним з астрономічних спостережень у оптичному спектрі випромінювання, і похибки вимірювань діаметра видимого з Землі сонячного диска накладають обмеження на точність параметрів цих моделей [14, 16, 18]. Виявлення можливих змін діаметра Сонця на проміжках часу від 11/22-річного циклу до періодів  $\sim 10^6$  р. та співставлення їх зі змінами його світності є однією з важливих задач при дослідженні сонячно-земних зв'язків, зокрема впливу таких змін на клімат Землі [2, 10]. Отже, визначення діаметра сонячного диска з астрономічних спостережень – це актуальна задача для астрономічної науки, і важливим при її вирішенні є створення нових методів спостережень та обробки даних, які б забезпечували точніше визначення цього параметра, зокрема за рахунок зменшення похибок від впливу земної атмосфери. У Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка для визначення діаметра Сонця використовується метод фотометричних спостережень повних сонячних затемнень, який у значній мірі вільний від впливу земної атмосфери.

Робота над визначенням діаметра Сонця у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка була розпочата наприкінці 1980-х років як розділ програми досліджень глобальних змін параметрів Сонця, зокрема геліосейсмологічних досліджень. Програма досліджень варіацій діаметра Сонця була запланована у ГАО НАНУ та в АО КНУ як спільна робота на довгий проміжок часу (роки й десятиріччя). Про це свідчить Записка до конкурсу програм спостережень затемнення Сонця, написана 10 грудня 1990 р. завідувачем відділу фізики Сонця ГАО НАНУ Е.А. Гуртовенком й надіслана В.В. Тельнюкові-Адамчукові, тодішньому директорові АО. У Записці пропонується як перший крок використати спостереження поблизу протилежних границь смуги повного затемнення Сонця з метою визначення її ширини з високою точністю. Як вважалося, це дозволяє визначити діаметр Сонця з похибкою порядку  $0''.01$  (для відстані в 1 а.о.), якщо використати сучасні числові теорії руху Землі й Місяця та дані про фігуру Місяця й нерівності його рельєфу у крайовій зоні. Таким методом вже користувалися на той час група дослідників з США [19], визначаючи візуально, або за допомогою відеозаписів, моменти 2-го і 3-го контактів (тобто тривалість повної фази затемнення у місцях спостережень). Київські ж вчені для спостережень затемнень Сонця з метою визначення діаметра Сонця вирішили використати фотометричний метод. В АО КНУ були сконструйовані та виготовлені спеціальні експедиційні фотометри [1]. Вперше з цими фотометрами були виконані спостереження затемнення 11 липня 1991 р. у Мексиці з трьох місць поблизу північної межі смуги повного затемнення (район міста Вілла Інсургентес, південна Каліфорнія) та у одному поблизу центральної лінії у м. Ла Пас. Е.А. Гуртовенком, В.В. Тельнюком-Адамчуком та П.О. Олійником (АО Львівського ун-ту) за допомогою двох аматорів зі США [3, 8] Спосіб опрацювання даних цих спостережень та результати викладені у публікаціях [4, 5, 17].

**Метод визначення діаметра Сонця за фотометричними спостереженнями сонячних затемнень та одержані результати.** Метод визначення діаметра сонячного диска за цими спостереженнями полягає у тому, що до кожної зі спостережних кривих блиску сонячного серпа за методом найменших квадратів підбирається модельна крива блиску, описана інтегральним рівнянням, одним з параметрів якого є радіус видимого сонячного диска. Це рівняння має такий вигляд [7]:

$$F(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S_{ph}(\lambda) \cdot p(\lambda, t) \cdot B_0(\lambda)}{D^2(t)} \times \left\{ \int_{R_M(t)-\Delta(t)}^{R_S(t)+H_{Chr}} b(\lambda, r) \cdot 2r \cdot \text{arcCos} \left[ \frac{R_M^2(t) - r^2 - \Delta^2(t)}{2r \cdot \Delta(t)} \right] \cdot dr + J_{ML}(\lambda, t) \right\} \cdot d\lambda + F_{ph}(t)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – межі спектральної чутливості фотометра;  $D(t)$  – відстань від місця спостережень до Сонця на час  $t$ ;  $S_{ph}(\lambda)$  – спектральна чутливість фотометра;  $p(\lambda, t)$  – прозорість земної атмосфери у місці спостережень на час затемнення;

$R_S(t)$ ,  $R_M(t)$  – відповідно топоцентричні радіуси видимих дисків Сонця та Місяця;  $\Delta(t)$  – кутова топоцентрична відстань між їхніми центрами на момент спостережень;  $H_{chr}$  – висота хромосфери за межами видимого диска Сонця;  $B_0(\lambda)$  – спектральна яскравість центра сонячного диска;  $b(\lambda, r)$  – радіально-симетрична функція розподілу спектральної яскравості по сонячному диску відносно яскравості у його центрі;  $J_{ML}(t)$  – поправка до блиску сонячного серпа за рахунок нерівностей краю місячного диска, обчислена за картами Ватса рельєфу Місяця поблизу краю його диска. Така процедура визначення параметрів моделі полягає у розв'язанні некоректно поставленої задачі, для якої похибка результату розв'язку може набагато перевищувати похибки окремої кривої блиску, одержаної зі спостережень. Тому для підвищення достовірності радіус сонячного диска визначається як середнє із його значень, знайдених за кожною з декількох кривих блиску, побудованих для даного затемнення.

Однак при використанні такої методики вдалося реалізувати під час блиску повинні бути прокалібровані за блиском цілого сонячного серпа з метою виключення коефіцієнта прозорості земної атмосфери у місці спостережень та абсолютної чутливості фотометрів на час затемнення. Для цього крім блиску сонячного серпа під час затемнення необхідно було також реєструвати сигнал кожного фотометра від Сонця протягом тривалого часу (близько 2-х годин) до та після затемнення, а потім інтерполювати за цими даними сигнал фотометра на час затемнення. На жаль, під час спостережень затемнення 11 липня 1991 р. такі вимірювання не були виконані, тому радіус Сонця за цими даними був визначений з відносно невисокою точністю і становив  $959''.70 \pm 0''.12$  для відстані 1 а. о. [4, 5, 17].

Повністю зазначену методику вдалося реалізувати під час повного затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. Спостереження цього затемнення були успішно виконані експедицією КНУ імені Тараса Шевченка в Румунії у 6-ти місцях [12]. Під час підготовки до спостережень цього затемнення конструкція фотометрів була удосконалена (структурна схема апаратури показана на рис. 1), що підвищило точність фотометрування та забезпечило можливість встановлення зв'язку внутрішньої шкали часу фотометра зі шкалою UTC з похибкою, не більшою за 1 с. Після спостережень були старанно виміряні спектральні криві чутливості фотометрів та їхні фотометричні шкали у всьому динамічному діапазоні, який складає приблизно  $5 \cdot 10^6$ , і дало можливість визначити точність калібрування кривих блиску (середньоквадратичні похибки не перевищують  $\pm 8\%$ ) [6]. За цими даними радіус сонячного диска був визначений зі значно вищою точністю, ніж для попереднього затемнення:  $959''.66 \pm 0''.03$  [7].

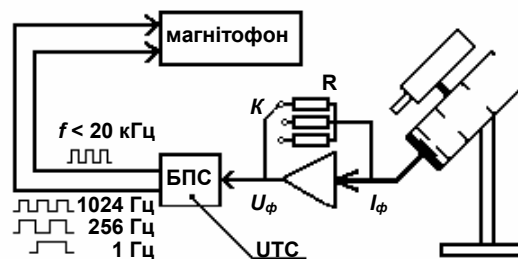


Рис. 1. Схема фотометричної апаратури, використаної для спостережень затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. R – опори зворотнього зв'язку, K – перемикач коефіцієнта зворотнього зв'язку (піддіапазонів чутливості), БПС – блок перетворення сигналу, UTC – кнопка для зв'язки шкали часу фотометра зі шкалою Всесвітнього часу UTC

Також за зазначеною методикою були виконані експедицією КНУ імені Тараса Шевченка фотометричні спостереження повного затемнення Сонця 29 березня 2006 р. в Туреччині, поблизу міст Анталія (північна межа смуги повного затемнення) та Аланія (південна межа) [9]. Під час цих спостережень сигнали фотометрів реєструвалися за допомогою портативних комп'ютерів – ноутбуків. Це дозволило розширити динамічний діапазон зареєстрованих кривих блиску та значно підвищити точність їхнього хронометрування шляхом використання GPS-приймачів. Проте ці спостереження виявилися не настільки успішними, як у 1999 р. – криві блиску цього затемнення були зареєстровані лише у 5-ти місцях – у 3-х біля південної та у 2-х біля північної межі смуги повного затемнення. Зокрема, через складний рельєф місцевості поблизу Анталії не вдалося найкращим чином вибрати місця для спостережень. Дані цих спостережень ще опрацьовуються.

Уявлення про якість та достовірність результатів, одержаних за нашим методом, дає рис. 2. Тут нанесені результати визначення радіуса сонячного диска для відстані 1 а.о., одержані за найпоширенішими сучасними методами протягом останніх приблизно 40-ти років. Як видно, результати методу фотометричних спостережень сонячних затемнень дуже добре узгоджуються з результатами, одержаними зі спостережень поблизу країв смуги таких затемнень іншим методом (реєстрування моментів 2-го і 3-го контактів з портативними телескопами візуально або запис перебігу затемнення поблизу повної фази з відеокамерами), та з класичним результатом Ауверса, одержаним за більш як 3000 вимірювань діаметра сонячного диска, виконаними з геліометрами більш як 100 років тому [13]. Близькі результати одержані також так званім методом дрейфового сканування за допомогою сонячного телескопа та ПЗЗ-камери [20] та за спостереженнями протягом 80-х років 20-го ст. з монітором сонячного диска – спеціальним приладом, створеним у США [15]. Результати ж інших методів показують істотні розбіжності як між собою, так і з зазначеними даними. Слід зазначити проте, що на рис.2 нанесені лише дані, які з достатньою точністю можуть бути прив'язані до певної епохи, тобто або одержані під час спостережень в цю епоху, або ж усереднені за порівняно невеликий проміжок часу спостережень (щонайбільше 5–6 років, як для монітора сонячного диска або спостережень з астролябіями). Однак діаметр сонячного диска визначається і як середнє значення на проміжку часу в декілька сторіч, зокрема за спостереженнями проходжень Меркурія перед сонячним диском. Ряд таких спостережень охоплює більше як три сторіччя, і останній аналіз цих даних з метою визначення радіуса сонячного диска та його можливих варіацій був виконаний у [11].

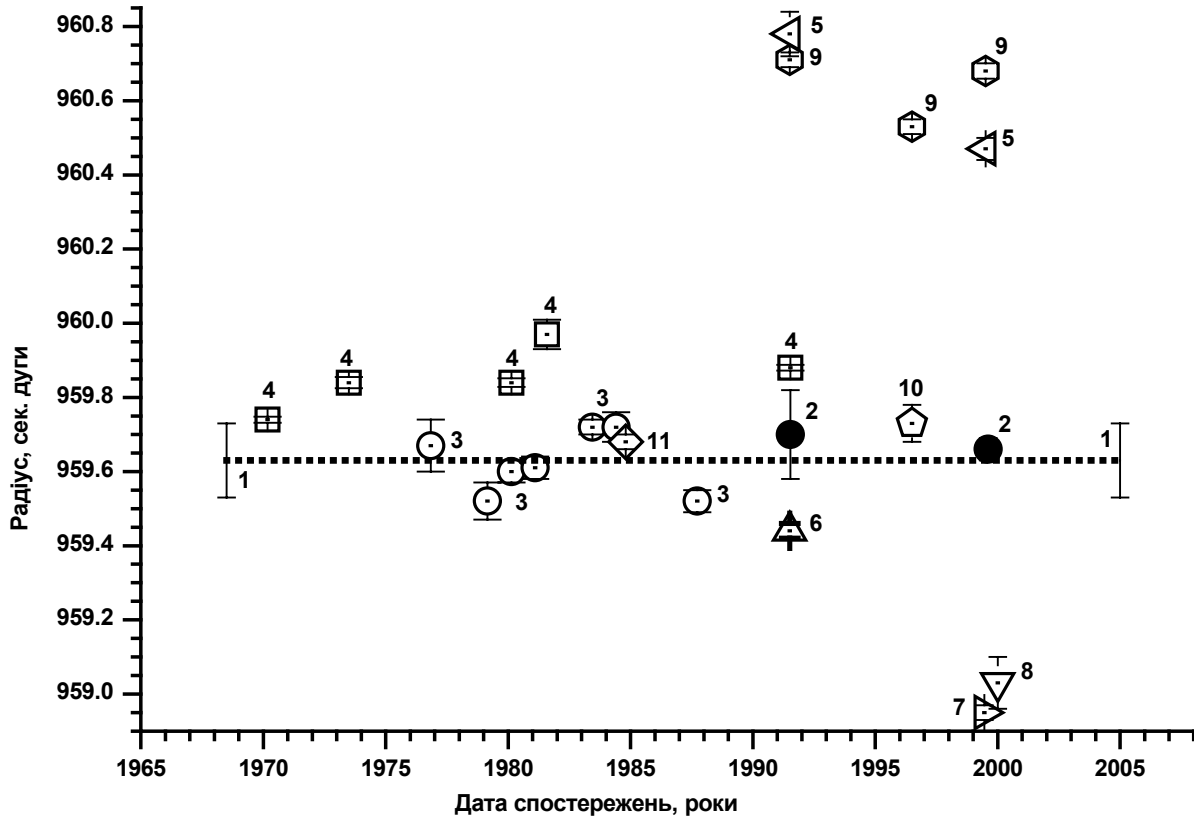


Рис. 2. Порівняння значень радіуса сонячного диска для відстані 1 а. о., одержаних різними методами: 1 – стандартний радіус сонячного диска за Ауверсом; 2 – за фотометричними спостереженнями поблизу країв смуги повного затемнення (АО КНУ); 3 – за візуальними та відео-спостереженнями поблизу країв смуги затемнень Сонця; 4 – за спектрокінематографічними спостереженнями затемнень Сонця; 5 – візуальні вимірювання з астролябією (Чилі); 6 – вимірювання з сонячною астролябією з CCD-детектором (Салерн, Франція); 7 – вимірювання з сонячною астролябією з CCD-детектором (Бразилія); 8 – вимірювання з сонячною астролябією з CCD-детектором (Анталія, Туреччина); 9 – вимірювання методом дрейфового сканування (візуальні спостереження); 10 – метод дрейфового сканування з CCD-детектором; 11 – вимірювання з приладом “Монітор сонячного диска” (SDM), США

**Висновки.** Визначення діаметра Сонця, пошуки його варіацій на різних часових проміжках та виявлення пов'язаних з цим змін світності Сонця і клімату Землі завжди будуть актуальними для науки. Результати таких досліджень досі не дають достовірних висновків щодо існування та амплітуд таких змін, а тому потрібно продовжувати докладати зусилля для удосконалення вже випробуваних та пошуки нових методів визначення розмірів, форми і світності сонячного диска щоб підвищити точність визначення цих параметрів. Одним з перспективних методів є метод фотометричних спостережень затемнень Сонця, напрацьований у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Обидва результати, одержані для відстані 1 а. о. цим методом за спостереженнями повних затемнень Сонця 11 липня 1991 р. ( $959^{\circ}.70 \pm 0^{\circ}.12$ ) та 11 серпня 1999 р. ( $959^{\circ}.66 \pm 0^{\circ}.03$ ), узгоджуються з результатами більшості інших сучасних методів та близькі до класичного результату Ауверса. Звичайно, недоліком цього методу є істотна залежність ймовірності успішних спостережень від погодних умов та розташування смуги затемнення на земній поверхні, однак перші результати вказують на його достатньо адекватну точність та на можливі резерви її підвищення. Зокрема, сучасні засоби пересування дозволяють виконувати такі спостереження навіть у віддалених та важкодоступних раніше місцях на земній поверхні.

1. Буздуган Ю. О., Окулов С. М., Клецюнок В. В. Експедиційний фотометр для спостереження сонячного затемнення // Вісн. Київ. ун-ту. Фіз.-мат. науки. – 1992. – № 6. – С. 92–95.
2. Вариации глобальных характеристик Солнца // Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Гопасюк С. И. и др. / Отв. ред. Гуртовенко Э. А. – К.: Наукова Думка, 1992. – 304 с.
3. Гуртовенко Э. А., Тельнюк-Адамчук В. В., Окулов С. М., Буздуган Ю. А., Олійник П. А. Наблюдения солнечного затмения 11 июля 1991 г. в Мексике с целью определения солнечного диаметра // Астрон. циркуляр. – 1991. – № 1550. – С. 29–30.
4. Данилевський В. О. Обробка даних фотоелектричних спостережень та аналіз кривих блиску блиску повного сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 1999. – Вип. 35. – С. 51–59.
5. Данилевський В. О. Попередні результати визначення діаметра Сонця за даними спостережень сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 1999. – Вип. 35. – С. 59–65.
6. Данилевський В. О. Характеристики фотометрів, використаних для спостережень повного затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2003. – Вип. 39–40. – С. 20–24.
7. Данилевський В. О. Визначення радіуса сонячного диска за фотометричними спостереженнями повного затемнення Сонця // Кинематика и физика небес. тел. – 2004. – Т. 20, № 2. – С. 176–188.
8. Дзюбенко М. І., Курочка Л. М., Тельнюк-Адамчук В. В. Спостереження сонячного затемнення 11 липня 1991 р. експедицією Київського університету // Вісн. Київ. ун-ту. Фіз.-мат. науки. – 1992. – № 6. – С. 100–102.

9. Івченко В., Єфіменко В., Буромський М., Данилевський В., Кіліч Г., Клещонко В., Лоцицький В., Тарануха Ю., Сухоруков А., Чурюмов К. Спостереження повного затемнення Сонця 29 березня 2006 року експедицією Київського національного університету імені Тараса Шевченка // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2006. – Вип. 43. – С. 61–64
10. Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О Уайта. Пер. с англ. – М: Мир, 1980. – 558 с.
11. Свешников М. Л. Вариации радиуса Солнца из прохождений Меркурия по его диску // Письма в Астрон. журн. – 2002. – Т. 28, №2. – С. 133–139.
12. Тельнюк-Адамчук В. В., Єфіменко В. М., Данилевський В. О., Дзюбенко М. І., Курочка Л. М., Чурюмов К. І., Буромський М. І., Криводубський В. Н., Крячко І. П., Курмей М. Д., Молотай О. А., Тарануха Ю. Г. Спостереження повного сонячного затемнення 11 серпня 1999 року науковою експедицією Київського університету // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2000. – Вип. 36. – С. 41–47.
13. Auwers A. Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen // Astron. Nachr. – 1891. – Band 128. – P. 361–376.
14. Bahcall J. N., Pinsonneault M. H., Basu S. Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos and helioseismological properties // Astrophys. J. – 2001. – Vol. 555. – P. 990–1012
15. Brown T. M., Christensen-Dalsgaard J. Accurate determination of the solar photospheric radius // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 500. – P. L195–L198
16. Brun A. S., Turck-Chiezer S., Morel P. Standard solar models in the light of new helioseismic constraints // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 506. – P. 913–925.
17. Danylevsky V. O. The solar diameter determination from data of the 1991 July 11 solar eclipse photoelectric observations // Contribs Astron. Observ. Skalnaté Pleso. – 1999. – Vol. 28, N 3. – P. 201–209.
18. Morel P., Provost J., Berthomieu G. Updated solar models // Astron. Astrophys. – 1997. – Vol. 327. – P. 349–360.
19. Sofia S., Dunham D., Fiala A. D. Determination of variations of the solar radius from solar eclipse observations // The Ancient Sun / Eds. Pepin R. O., Eddy J.A., Merrill R.B. – Pergamon Press, 1980. – P. 147–157
20. Wittman A. D. CCD-drift scan measurements of the solar diameter: method and first results // Solar Phys. – 1997. – Vol. 171. – P. 231–237

Надійшла до редколегії 30.04.09

УДК 521.182; 523.44

А. Казанцев, Ф. Кравцов, І. Лук'яник, Л. Казанцева

## МИНУЛЕ ТА СЬОГОДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ АСТЕРОЇДІВ У КИЄВІ

*Наведено коротку історичну довідку про дослідження астероїдів в астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Також коротко описані основні напрямки вивчення астероїдів на сьогодні. Наведені головні результати, отримані в останнє десятиріччя. До таких результатів можна віднести: 1) розробку та реалізацію методу чисельного інтегрування рівнянь руху тіл Сонячної системи; 2) виявлення нового негравітаційного ефекту, що спричиняє просторове розділення астероїдів з різними альbedo; 3) реалізацію методу часової розгортки для спостережень покрить зір астероїдами.*

*A short historical reference about asteroid investigation in Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University is presented. The main lines of asteroid investigation to date are shortly described as well. There are pointed the main results, which had been obtained during the last decade. These are: 1) development of a method for numerical integration of equations of movement for Solar system bodies; 2) revealing of a new non-gravitational effect, which causes a spatial separation for asteroids with different albedos; 3) the time-base method realization for observations of asteroid occultations.*

**Історія дослідження астероїдів в Обсерваторії у минулому.** Певного системного характеру дослідження малих тіл в нашій обсерваторії набули за директорства С.Д.Чорного (1921–1939 рр.). Сам С.Д.Чорний більше часу приділяв теоретичним роботам з питань руху комет. Хоча за період 1925–1938 рр. опубліковано 34 роботи С.Д.Чорного за результатами спостережень малих тіл. в різних журналах («Astronomische Nachrichten», «Astronomical Journal», «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» та ін.). Близько половини цих публікацій присвячено спостереженням астероїдів. Крім С.Д. Чорного спостереження астероїдів в цей період вели М.Диченко, М.Шилова, І.І.Путілін.

Головним предметом дослідження співробітника обсерваторії тих часів І.І.Путіліна були астероїди. Він активно проводив спостереження малих планет та займався розрахунками їх орбіт. Особливу увагу він приділяв побудові чисельної теорії руху астероїда Ганімед. Цей астероїд відноситься до класу астероїдів, що наближаються до Землі (АНЗ), які в останні роки активно досліджуються з погляду на проблему астероїдної небезпеки. На той час ця проблема, як окреме питання не розглядалася. Але астероїди з такими орбітами привертати увагу дослідників. За період з 1934 р по 1947 р. І.І.Путілін опублікував з різних виданнях 39 статей з тематики астероїдів, з них 16 присвячено Ганімеду. Головним результатом його роботи стала монографія «Малые планеты», яка вийшла з друку в 1953 р. і протягом десятиліть була навчальною книгою для дослідників астероїдів в СРСР [13].

З приходом С.К.Всехсвятського до керівництва обсерваторією в 1939 р. дослідження малих тіл Сонячної системи стали одним із головних наукових напрямків. Щоправда, першорядна увага приділялася кометами. Після того, як І.І.Путілін в 1947р. залишив роботу в обсерваторії, теоретичні роботи з астероїдної тематики на обсерваторії припинилися, однак спостереження малих планет продовжувалися. Такі спостереження проводив сам директор обсерваторії С.К.Всехсвятський, а також Е.Сандакова, В.П.Конопльова, Н.Хінкулова. Результати спостережень друкувалися в Астрономічному циркулярі АН СРСР під стандартною назвою «Наблюдения астероидов на Киевской астрономической обсерватории» або «Наблюдения малых планет на Киевской астрономической обсерватории».

Пожвавлення астероїдної тематики в Обсерваторії відбулося в середині 70-х років минулого століття. Тоді у співавторстві з А.М.Симоненко (Астрорада АН СРСР) почалися дослідження орбіт астероїдів в зонах сумірностей з Юпітером. В цих зонах періоди обертання астероїдів та Юпітера навколо Сонця відносяться як цілі числа. Це спричиняє явище орбітального резонансу, яке супроводжується збільшенням ексцентриситету орбіти астероїда без зміни середнього значення великої півосі. На сьогодні остаточно встановлено, що саме зони сумірностей в головному поясі астероїдів є поставниками переважної більшості астероїдів у внутрішні зони планетної системи, в тому числі, й АНЗ.

© А. Казанцев, Ф. Кравцов, І. Лук'яник, Л. Казанцева, 2010