



ISSN 1607–2855

Том 4 · № 2 · 2003 С. 77–82

УДК 523.4

Варіації яскравісної температури Урана та Нептуна

В.М. Крушевська, Т.Б. Бенедичук, А.П. Відьмаченко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

В роботі досліджені варіації яскравісних температур Урана та Нептуна. Отримано, що в мікрохвильовій області спектру зміни температури з часом не суттєві. В см-діапазоні спостерігається кореляція змін яскравісної температури з періодом циклу сонячної активності.

ВАРИАЦИИ ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР УРАНА И НЕПТУНА. Крушевская В.Н, Бенедичук Т.Б., Видьмаченко А.П. — В работе исследованы вариации яркостных температур Урана и Нептуна. Получено, что в микроволновой области спектра изменения температуры со временем незначительны. В см-диапазоне наблюдается корреляция изменений яркостной температуры с периодом цикла солнечной активности.

VARIATIONS OF BRIGHTNESS TEMPERATURES OF URANUS AND NEPTUNE, Krushevska V.M., Benedichuk T.B., Vid'machenko A.P. — In this work variations of brightness temperatures of Uranus and Neptune were investigated. It is obtained, that in the microwave region of spectrum changes of temperature with time are not considerable. The changes of temperature correlate with the period of the solar activity cycle in the cm-range.

1. ВСТУП

Для з'ясування фізичних умов на планетах велике значення має дослідження їх ІЧ- та радіовипромінювання. Теплове випромінювання планетної атмосфери в різних довжинах хвиль формується на різних висотах. У реальній атмосфері її температура суттєво залежить від висоти. Наприклад, в ділянках спектру, де знаходяться досить сильні смуги поглинання, випромінювання буде виходити тільки з більш високих шарів тропосфери. Отже, яскравісна температура, вирахована за спостережуваним потоком випромінювання в тій чи іншій ділянці спектру, буде змінюватися з довжиною хвилі. Деякі довжини хвиль, випромінювання в яких виходить з атмосфери в межах певного висотного шару, можна згрупувати між собою. Дослідження змін яскравісної температури певного атмосферного рівня з часом та порівняння залежностей, отриманих для різних рівнів, можуть бути використані для з'ясування динаміки атмосферних шарів.

2. ТЕПЛОВА ІНВЕРСІЯ

Приведені на рис. 1 значення $T_{\text{я}}$ були отримані на протязі тридцяти років, починаючи з 1965 р., коли Келлерман вперше виміряв тепловий потік від Урана поблизу $\lambda = 11.3$ см. А перше радіоастрономічне дослідження Нептуна здійснили Келлерман і Пауліні-Тос у 1966 р. на довжині хвилі 1.9 см [14]. Вже ці перші спостереження виявили зростання температури з довжиною хвилі, яке автори пояснювали відповідним зменшенням коефіцієнта поглинання аміака.

У 1973 р. Лоу та ін. виміряли теплові потоки поблизу $\lambda = 34$ мкм. В наступному році Рейк та Лоу [21] поблизу $\lambda = 22.5$ мкм отримали значення температур для Урана та Нептуна. Факт зменшення температури в інтервалі $\lambda 22 \div 34$ мкм свідчить про наявність теплової інверсії. Це підтверджують подальші результати: Ортон та ін. у 1985 р. [20] провели спостереження поблизу $\lambda 21$ і 32 мкм та помітили, що температури Нептуна на відповідних довжинах хвиль більші, ніж Урана. Цей факт був досить цікавий, оскільки Нептун знаходиться на більшій відстані від Сонця (його радіус-вектор

в середню опозицію дорівнює 30.07 а.о., а Урана — 19.19 а.о). Крім цього, спостережувана ефективна температура Нептуна виявилась суттєво більша за розраховану (у випадку Урана вони приблизно рівні). Це означає, що Нептун випромінює енергії більше, ніж та сонячна енергія, яка поглинається планетою та йде на її нагрівання. Фактично, Нептун випромінює в два рази більше, ніж отримує від Сонця. Це можна пояснити існуванням внутрішнього джерела теплової енергії, що викликає додатковий розігрів планети. Одним з таких джерел може бути гравітаційне стиснення. Згідно з іншою гіпотезою, тепла інверсія викликана великим супутником Тритоном, який обертається навколо Нептуна в напрямку, що є протилежним до обертання планети. При такому русі припливні сили повинні створювати серйозні збурення на Нептуні і можуть бути джерелом додаткового нагрівання в результаті внутрішнього тертя та дисипації припливної енергії у внутрішніх шарах планети. Ще однією з можливих причин теплової інверсії є поглинання світла молекулами CH_4 в ближньому ІЧ діапазоні, яке формується на стратосферному рівні [23]. Отож, поки що остаточно невідомо, завдяки яким процесам виникає тепла інверсія.

3. ВАРІАЦІЇ $T_{\text{я}}$ В МКМ-ДІАПАЗОНІ

У 1973 р. Райк та Лоу [21] на довжині хвилі 12.6 мкм виміряли яскравісну температуру Урана. Факт, що верхня межа $T_{\text{я}}$ лише на 11 К вище значення рівноважної температури, вони пояснили існуванням або аномально низької температурної інверсії, або низької концентрації етану (C_2H_6) та ацетилену (C_2H_2) у верхній атмосфері. У 1977 р. Месі та Сінтон [16] отримали на $\lambda = 12.8$ мкм значення $T_{\text{я}} < 79$ К, в 1982 р. (Ортон та ін.) на $\lambda = 12.5$ мкм — $T_{\text{я}} = 65.4$ К [19], в 1985 р. (Ортон та ін.) — $T_{\text{я}} = 60.3$ К поблизу $\lambda = 12.6$ мкм [20]. Із цих даних видно, що біля емісійної смуги етану, яка відповідає $\lambda = 12.8$ мкм, яскравісна температура Урана зазнає суттєвих змін. Можна вважати, що це може бути викликано маломасштабними переміщеннями хмарових утворень з нижніх шарів стратосфери в верхні.

У 1975 р. Джиллет і Райк [10], а в 1977 р. Месі та Сінтон [16] відкрили в спектрі Нептуна дві емісійні смуги: метану поблизу $\lambda = 7.7$ мкм і етану біля $\lambda = 12.8$ мкм. За розрахунками, ці смуги формуються в інтервалі тисків від 1 до 100 мбар. Першою групою були одержані значення $T_{\text{я}}$ поблизу $\lambda = 7.7$ мкм (вище 115 К) і поблизу $\lambda = 12.8$ мкм (93 К), а другою групою: 130 К і 92 К на тих же довжинах хвиль, відповідно. Для пояснення такого підвищення температури Ортон припустив, що на Нептуні концентрація метану в стратосфері підвищена завдяки незвичайно інтенсивній атмосферній циркуляції, швидкість якої виявляється більшою, ніж швидкість виморожування метану в зоні мінімальних температур. Саме в цьому випадку газоподібний метан повинен проникати в верхню тропосферу, не встигаючи сконденсуватися в цій зоні [3]. Варіації температури можливо

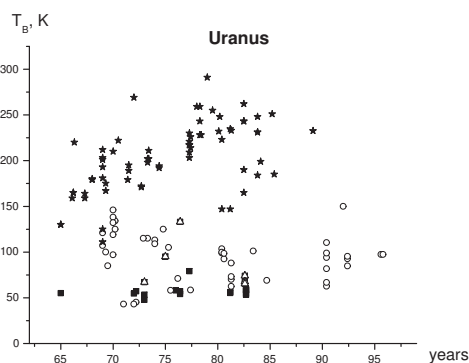


Fig. 1 a

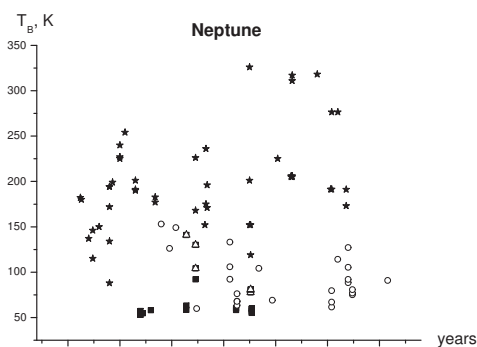


Fig. 1 b

Рис. 1. Зміна яскравісної температури Урана (а) та Нептуна (б) з довжиною хвилі

пояснити і фотохімічними процесами, які призводять до зменшення кількості деяких газів, наприклад, етану та ацетилену, які випромінюють поблизу $\lambda = 12$ і $\lambda = 13$ мкм. А це, в свою чергу, також викликає охолодження атмосфери. Існує гіпотеза, згідно якої знижену температуру на Урані можна пояснити особливостями орієнтації його осі обертання. Цілком імовірно таке припущення для глибоких шарів, оскільки радіативна стала там становить декілька сотень років, тобто набагато більше періода обертання Урана навколо Сонця (84 роки). Але у верхніх шарах енергетичний обмін і стабілізація атмосфери відбуваються значно швидше, і тому баланс припливу сонячної енергії та випромінювання нагрітими атмосферними шарами досягається за час, порівнянний з періодом обертання. Тому верхня атмосфера Урана виявляється холодною через якусь іншу причину. Хоча деякі сезонні зміни, безперечно, відбуваються [3].

4. ВАРІАЦІЇ $T_{\text{я}}$ В ММ-ДІАПАЗОНІ

Молекулярний водень є основним газом у верхніх шарах атмосфер Урана та Нептуна. Непрозорість атмосфери для теплового ІЧ випромінювання пов'язана головним чином з водневим поглинанням, яке обумовлено зіткненнями молекул водню між собою та з атомами гелію. У лютому – березні 1970 р. Кузьмин та Лосовський виміряли радіовипромінювання Урана на довжині хвилі $\lambda = 8.22$ мкм і отримали середню $T_{\text{я}} = 134 \pm 10$ К. Це значення дуже добре узгоджується з розрахованою $T_{\text{я}} = 135$ К для моделі, де в атмосфері Урана присутній аерозоль з твердого аміаку [2].

У 1974–75 рр. Коуртін та ін. [5] в $\lambda = 1.4$ мм одержали середні значення яскравісних температур Урана і Нептуна. Мікрохвильові температури обох планет виявились значно вищими тих оцінок, які очіувались із розрахунків сонячної рівноваги і виміряних значень на 24 мкм [17]. Ці результати відповідають випромінюванню з глибоких шарів атмосфери з великим температурним градієнтом через наявність парникового ефекту. У травні 1990 р. та травні–червні 1992 р. на 15 см телескопі (JCMT) на Мауна-Кеа були проведені виміри яскравісних температур планет в ближньому мм-діапазоні [12]. В результаті Гріффін і Ортон не знайшли свідчень про будь-які варіації спостережних даних в $\lambda\lambda = 0.35 - 1.3$ мм впродовж десяти років. Вони вважали, що, можливо, зміни в співвідношенні NH_3 дадуть змогу зареєструвати невеликі варіації на довжинах хвиль більше $\lambda = 1.5$ мм.

На Нептуні ділянка спектру $\lambda\lambda = 1 - 4$ мм формується в межах тиску 2–5 бар. А згідно з побудованою у 1986 р. Хеммелом моделлю атмосфери, поблизу тиску $P = 2.6$ бар розміщується нижня густа протяжна хмара з оптичною товщею $\tau = 3$. Вище неї знаходяться два інші шари аерозолі: на рівні $P = 5$ мбар — стратосферна димка з $\tau = 0.15$; а на інтервалі P від 0.4 до 1.5 бар — тропосферна димка з $\tau = 0.05$. Скоріш за все, нижній шар складають частинки сірководню, аміаку або сульфідаммонію. Потрібно, щоб ці хімічні сполуки знаходились в атмосфері з достатніми відносними та абсолютними концентраціями. Це дасть можливість молекулам об'єднуватися в зародки майбутніх

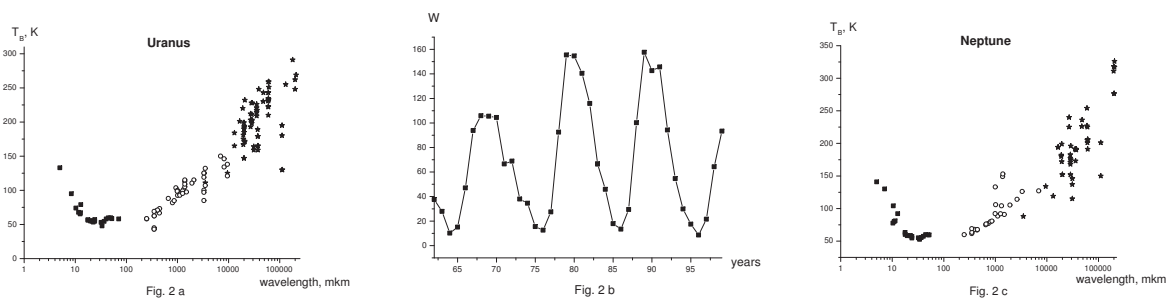


Рис. 2. Зміна яскравісної температури Урана (а), Нептуна (в) та чисел Вольфа (б) з часом.

крапель чи кристаликів конденсату. Для того, щоб насичений газ міг перейти в рідкий, або твердий стан у вигляді крапель чи кристалів льоду, необхідна, також, присутність в атмосфері дуже маленьких частинок, котрі могли б стати ядрами конденсації [3].

У 1995 р. (липень–серпень) Енкреназ, Серябін і Вейштейн [9], використавши Фур'є-спектрометр, провели на обсерваторії Мауна-Кеа дослідження в мм-діапазоні для встановлення збагачення тропосфер планет сполуками CO та PH_3 . На довжині хвилі $\lambda = 1.5$ мм були отримані температури Урану і Нептуна. На основі цих даних було виявлено, що низьку амплітуду коливань потоків в короткохвильовій області спектру можна пояснити стабільністю джерела непрозорості, тобто H_2 .

5. ВАРІАЦІЇ $T_{\text{я}}$ В СМ-ДІАПАЗОНІ

У 1978 р. Клейн і Турегано [15] доповіли про значні зміни яскравісних температур Урану в інтервалі $\lambda\lambda = 2-4$ см. З 1966 по 1977 р. середня температура диска планети збільшилась від 160 до 220 К. Було зроблено припущення, що варіації потоків відбувалися за рахунок зміни кількості аміаку над випромінюючим шаром і що кількість NH_3 зменшується в напрямку до полюсу та коливається з часом. Можливо, на ці явища впливає змінна швидкість циркуляції в нижніх шарах атмосфери. Джаффе та ін. [13] у травні 1980 – червні 1981 р. за допомогою VLA (Very Large Array) виміряли потоки на $\lambda\lambda = 2$ та 6.1 см. Зменшення $T_{\text{я}}$ з 1978 по 1980 р. вказує на зріст збагачення амонію, хоча він більш помітний у вищих шарах (2 см), ніж на 6 см рівні. Все це може бути викликано змінами атмосферної циркуляції. У 1989 р. Де Патер та ін. [8] також доповіли про варіації яскравісної температури Урану з широтою, які пояснювались зміною відносної кількості амонію.

Брігс та Ендрю [4] помітили, що зростання потоків випромінювання з часом було нерівномірним. Вони зробили висновок про наявність варіацій питомої кількості NH_3 з широтою та часом. Припускалося, що ці зміни могло спричинити нерівномірне нагрівання верхнього шару атмосфери (до 0.6 атм) сонячними променями.

У 1982 та 1986 рр. Де Патер і Річмонд [7] спостерігали Нептун біля $\lambda\lambda 6$ та 20 см. Яскравісна температура Нептуна зростає із збільшенням довжини хвилі. Особливо це помітно в діапазоні $\lambda\lambda 6-20$ см. Різке її зростання свідчить про те, що в нижньому шарі тропосфери (30–150 бар) немає густих хмар, і що він не є ізотермічним. У випадку Урану Де Патер і Галкіс [6] помітили, що в інтервалі $\lambda\lambda 6-20$ см значення яскравісної температури майже не змінюється з довжиною хвилі. Це може відбуватися через наявність в атмосфері на рівні тисків 30–40 бар сильного джерела непрозорості (наприклад, амонію чи водяної пари), або через присутність протяжного ізотермічного шару.

Аналіз даних різних авторів показав, що значення яскравісних температур Урану відчувають два типи коливань: повільні – тривалістю 40 років і амплітудою 15 К та швидкі з періодом 7–8 років і амплітудою 10–15 К. Середня $T_{\text{я}}$ диска Нептуна поблизу $\lambda = 3$ см з 1970 по 1982 р. знизилася на 50 К, після чого знову зросла до 191 К. Тобто період коливань складає 15–20 років, а значення повної амплітуди – 40 К [1]. Спостереження планет у візуальних променях теж показали, що зміна блиску відбувалася з періодами 6–11 і 42 роки для Урану та 21 рік для Нептуна.

Співпадання періодів вказує на існування тісного зв'язку між варіаціями в оптичному та мікрохвильовому діапазонах. А це свідчить про єдину природу збурень на різних рівнях тропосфери. Знаючи час відносної затримки сигналу між діапазонами довжин хвиль і відстань між ефективними рівнями випромінювань, Демент'єв оцінив вертикальну швидкість їх розповсюдження [1].

6. АНАЛІЗ СПОСТЕРЕЖНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В даній роботі прослідковані варіації яскравісних температур Урану та Нептуна. За результатами, одержаними різними авторами, для обох планет побудовано графіки $T_{\text{я}} = f(\lambda)$ і $T_{\text{я}} = f(t)$. У зв'язку з відсутністю набору спостережних даних в кожній окремій довжині хвилі, деякі довжини хвиль, випромінювання в яких виходить з атмосфери в межах певного шару, можна згрупувати між собою. Для досліджень були вибрані мкм-, мм- та см-діапазони довжин хвиль.

Із графіку $T_{\text{я}} = f(\lambda)$ (рис. 1) видно, що у ближньому мкм-діапазоні температура зменшується з λ . Цей факт пояснюється наявністю теплової інверсії. А більш висока температура Нептуна на відповідних довжинах хвиль пояснюється наявністю внутрішнього теплового джерела. Яскравісна температура, починаючи вже з далекого мкм-діапазону, збільшується з ростом λ . Для Нептуна це особливо помітно в інтервалі $\lambda\lambda 6-20$ см. Це ще раз вказує на те, що в нижній тропосфері планети немає густих хмар. Для Урана, навпаки, маємо невелику зміну $T_{\text{я}}$ з λ в даній спектральній області. Для пояснення цього припускається, що на відповідному рівні тропосфери існує сильне джерело непрозорості.

Проаналізувавши графіки, які показують залежність температури від часу (рис. 2), можна помітити у випадку Урана досить чітке розмежування значень $T_{\text{я}}$ на три рівні, які відповідають (знизу вгору) мкм-, мм- та см-діапазонам, відповідно. Що стосується Нептуна, то тут рівні розділяються не досить чітко. Для обох планет яскравісна температура змінюється з часом. У ближньому мкм-діапазоні даних недостатньо, щоб зробити однозначні висновки. У мікронній області спектру зміни температури не суттєві, що можна пояснити стабільністю джерела непрозорості.

Порівняння графічної залежності зміни температури та чисел Вольфа з часом (рис. 2) вказує на існування між ними певної кореляції. Найбільш суттєвим є зв'язок в см-діапазоні. Це пояснюється тим, що випромінювання в цих довжинах хвиль виходить із зовнішніх шарів планетної атмосфери, які найбільш доступні впливу сонячної радіації. Зміни яскравісної температури планети відбуваються з певною затримкою, порівняно зі зміною чисел Вольфа: наявні дані дозволяють зробити такий висновок для Урана в 20 та 21 циклах сонячної активності, для Нептуна — в 20 та 22.

7. ВИСНОВКИ

1. У ближньому мкм-діапазоні температура зменшується з ростом λ . Цей факт пояснюється наявністю теплової інверсії. А більш високу температуру Нептуна на відповідних довжинах хвиль пояснюється існуванням внутрішнього теплового джерела.

Яскравісна температура, починаючи вже з далекого мкм-діапазону, збільшується з λ . На це впливає зменшення коефіцієнту поглинання NH_3 . Особливо це помітно в інтервалі $\lambda\lambda 6-20$ см. Це свідчить про те, що в нижній тропосфері немає густих хмар. Для Урана, навпаки, маємо невелику зміну $T_{\text{я}}$ з λ в даній спектральній області. Припускається, що на відповідному рівні тропосфери існує сильне джерело непрозорості.

2. При проведенні аналізу залежності температури від часу для Урана відмічаємо чітке розмежування значень $T_{\text{я}}$ на три рівні, які відповідають мкм-, мм- та см-діапазонам. Що стосується Нептуна, то тут розмежування рівнів значно менш виражено.

Для обох планет яскравісна температура змінюється з часом. Спостерігається кореляція між змінами яскравісної температури та змінами чисел Вольфа. Найбільш помітним зв'язок виявляється в см-діапазоні.

В мікронній області спектру зміни температури несуттєві, що можна пояснити стабільністю джерела непрозорості.

1. Демет'єв М.С. Временные изменения в спектрах Урана и Нептуна // КФНТ. — 1994. — **10**, № 4. — С. 3–24.
2. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Измерения радиоизлучения Урана на волне 8,22 мм и некоторые свойства его атмосферы // Астрономический вестник. — 1971. — **5**, № 1. — С. 23.
3. Тейфель В.Г. Уран и Нептун — далекие планеты-гиганты. — М.: Знание, 1982. — 64 с.
4. Briggs F.H., Andrew B.H. Microwave radiometry and interferometry of Uranus // Icarus. — 1980. — **41**, № 2. — P. 269–277.
5. Courtin R., Coron N., Encrenaz Th., Gispert R., Bruston P., Leblanc J., Dambier G., Vidal-Madjar A. Observations of Giant Planets at 1.4 mm and Consequences on the Effective Temperatures // Astron. Astrophys. — 1977. — **60**. — P. 115–123.

6. *De Pater I., Gulkis S.* VLA observations of Uranus at 1.3–20 cm // *Icarus*. — 1988. — **75**, №2. — P. 306.
7. *De Pater I., Richmond M.* Neptune's Microwave Spectrum from 1 mm to 20 cm // *Icarus*. — 1989. — **80**, №1. — P. 1–13.
8. *De Pater I., Ulich B.L., Kreysa E., Chini R.* Planetary Observations at a Wavelength of $355\ \mu\text{m}$ // *Icarus*. — 1989. — **79**, №1. — P. 190–195.
9. *Encrenaz T.H., et.al.* Millimeter spectroscopy of Uranus and Neptune: Constraints on CO and PH₃ tropospheric abundances // *Icarus*. — 1996. — **124**, №2. — P. 616
10. *Gillett F.C., Rieke G.H.* 5–20 micron observations of Uranus // *Astrophysical Journal*. — 1977. — **218**, №3. — P. L141.
11. *Greve A., Steppe H., Graham D., Schalinski C.J.* Disk brightness temperature of the planets at 43 GHz (and 43 GHz flux densities of some continuum sources) // *Astron. Astrophys.* — 1994. — **286**. — P. 654–658.
12. *Griffin M.J., Orton G.S.* The near-millimeter brightness temperature spectra of Uranus and Neptune // *Icarus*. — 1993. — **105**, №2. — P. 537.
13. *Jaffe W.J., et.al.* Uranus: microwave images // *Science*. — 1984. — **225**, №4662. — P. 453.
14. *Kellermann K.J., Pauliny-Toth J.J.K.* Observations of the radio emission of Uranus, Neptune, and other planets at 1.9 cm // *Astrophysical Journal*. — 1966. — **145**, №3. — P. L954.
15. *Klein M.J., Turegano J.A.* Evidence of an increase in the microwave brightness temperature of Uranus // *Astrophysical Journal Letters*. — 1978. — **224**. — P. L31–L34.
16. *Macy W. Ir., Sinton W.* Detection of methane and ethane on Neptune but not on Uranus // *Astrophysical Journal*. — 1977. — **218**, №2. — P. L79.
17. *Morrison D., Cruikshank D.P.* Temperatures of Uranus and Neptune at 24 microns // *Astrophysical Journal*. — 1973. — **179**. — P. 329–331.
18. *Muhleman D.O., Berge G.L.* Observations of Mars, Uranus, Neptune, Io, Europe, Ganymede, and Callisto at a Wavelength of 2.66 mm // *Icarus*. — 1991. — **92**, №1. — P. 263–272.
19. *Orton G.S., et.al.* Observational constraints on the atmospheres of Neptune and Uranus from new measurements near $10\ \mu\text{m}$ // *Icarus*. — 1983. — **56**, №1. — P. 147.
20. *Orton G.S., Baines K.H., Bergstralh J.T., Brown R.H., Caldwell J., Toczko A.T.* Infrared radiometry of Uranus and Neptune at 21 and 32 microns // *Icarus*. — 1987. — **69**. — P. 230–238.
21. *Reike G.H., Low F.J.* Infrared measurements of Uranus and Neptune // *Astrophysical Journal*. — 1974. — **193**, №3. — P. L147.
22. *Ulich B.L.* Millimeter-wavelengths continuum calibration sources // *The Astronomical Journal*. — 1981. — **86**, №11. — P. 1619–1626.
23. *Webster W.J., Webster A.C., Webster G.T.* Interferometer observations of Uranus, Neptune, and Pluto at wavelengths of 11.1 and 3.7 centimeters // *Astrophysical Journal*. — 1972. — **174**. — P. 679–684.

Надійшла до редакції 17.07.2003