



ISSN 1607–2855

Том 1 • № 2 • 2000 С. 91 – 105

УДК 523.4

Сезонні зміни та власні коливання в атмосферах планет-гігантів

А.П. Відьмаченко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Досліджено варіації оптичних характеристик та фізичних параметрів атмосфер планет-гігантів. Вперше виявлено існування сезонної перебудови в атмосферах Юпітера та Сатурна, прояв 22.3-річного Хейловського магнітного циклу Сонячної активності, наявність вікових змін абсолютної зоряної величини Юпітера з періодом 180 років. Запропонована і реалізована на практиці методика спостережень та їх обробки, котра дозволила

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ, Видьмаченко А.П. – Проведено исследование по выявлению периодических вариаций оптических характеристик и физических параметров атмосфер планет-гигантов. Из анализа многолетних наблюдательных данных впервые выявлено наличие сезонной перестройки облачных слоев и надоблачной дымки на Юпитере и Сатурне, обнаружено проявление 22.3-летнего Хейловского магнитного цикла Солнечной активности и наличие вековых изменений абсолютной звездной величины Юпитера с периодом около 180 лет. Предложенная и реализованная на практике методика наблюдений и обработки наблюдательного материала позволила впервые зарегистрировать первые две гармоники собственных колебаний водородно-гелиевых атмосфер Юпитера и Сатурна.

SEASONAL CHANGES AND FREE OSCILLATIONS OF GIANT PLANETS ATMOSPHERES, by Vid'machenko A.P. – The optical characteristics and physical parameters of giant planets atmospheres are researching. Existence of seasonal reorganization in Jupiter's and Saturn's atmospheres, existence of 22.3 years a magnetic Hale cycle of solar activity, availability of century changes of a whole Jupiter's disk brightness with a period of 180 years is revealed for the first time. We proposed the observational method and data reduction procedure which the first two harmonics of free oscillations for Jupiter's and Saturn's atmospheres have allowed to register for the first time.

1. ВПЛИВ СОНЦЯ НА АТМОСФЕРИ ПЛАНЕТ.

Сонце тотально діє на всі планетарні процеси і в деякому відношенні синхронізує їх. При цьому, добре прослідковується загальна тенденція до підсилення зв'язку сонячного і планетного явищ при зростанні інтенсивності сонячного випромінювання [12], оскільки основним безпосереднім енергетичним джерелом космічної інформації для планетних атмосфер є Сонце [5, 6]. Зазначимо, що порога синхронізації не існує. Тобто, навіть при дуже слабких зв'язках між об'єктами їх взаємний вплив в ході динамічної еволюції приведе систему в синхронний періодичний режим, що зможе проявитися в атмосфері планети тим чи іншим чином, доступним для його спостережного відкриття [11, 12].

Підвищена потужність випромінювання із активних областей сонячного диску викликає певні ефекти в атмосферах планет. Причому, радіація з різною довжиною хвиль впливає на різні шари атмосфери. Хоча варіації сонячної постійної невеликі, проте реакція атмосфери на них може бути значною. Тому навряд чи можна говорити про істотну безпосередню зміну нагріву тропосфери. Скоріше всього відбуваються сонячно-обумовлені зміни у верхній атмосфері і після цього здійснюється передача цього збурення вниз, наприклад, до рівня хмар, як одному із наочних індикаторів змін. Глибина в атмосфері, на яку переноситься енергія, пов'язана із Сонцем, залежить від виду енергії і її спектральних характеристик. Основними видами енергії, що, судячи по численних даних, відіграють істотну роль в

перебудові атмосфери, є електромагнітне випромінювання (видиме світло, ультрафіолетове (УФ), рентгенівські промені) і заряджені частки (в основному протони), які викликають певну реакцію метеорологічних величин на зміну сонячної активності. Оскільки все ще не до кінця ясно, як глибоко змінна сонячна енергія повинна проникати в атмосферу для того щоб викликати помітну реакцію метеорологічних величин, тому треба вважати важливими всі зазначені види енергії. Крім радіаційних і корпускулярних притоків тепла до верхніх шарів атмосфери можливі також притоки тепла динамічного походження [5,12]: за рахунок планетарних, припливних і гравітаційних хвиль, а також внаслідок явища турбулентності.

Прояви зміни варіацій опромінення планети Сонцем у верхніх шарах атмосфери можуть бути дуже різноманітними. Наприклад, можна точно сказати, що режим верхніх шарів планетних атмосфер в чималій мірі визначається сонячною активністю. Іншими словами, можна представити верхню атмосферу як деякий об'єм газу, стан якого визначається, головним чином впливом сонячної радіації в різних довжинах хвиль. Зв'язок сонячної активності з процесами в тропосфері повинен бути значно складніший, ніж для верхніх шарів атмосфери. Нижче ми представимо деякі із численних фактів, які свідчать про можливість взаємодії різних атмосферних шарів, і про їх можливу Сонячну обумовленість.

Так, наприклад, для атмосфери Землі деякими дослідниками було отримано, що добова амплітуда зміни тиску є більшою в епоху максимуму сонячної активності, ніж в роки мінімуму [5]. При цьому відмічається зростання числа циклонів в роки максимуму сонячної активності; тобто значно підвищується інтенсивність циркуляції в ці роки, що проявляється в зростанні баричних градієнтів, які призводять до збільшення перепадів енергії, а значить, і до підсилення загальної циркуляції атмосфери.

Багато дослідників звернули увагу на той факт, що напрям силових ліній сонячного магнітного поля виявляє чималый вплив на характер зв'язку «Сонце – нижня тропосфера Землі». Тому основний 11-річний цикл плямтворчої діяльності Сонця, який має значну амплітуду, в метеорологічних показниках проявляється набагато менше, ніж 22.3-річний Хейловський магнітний сонячний цикл. Прояви 22.3-річного циклу в коливаннях клімату Землі мають планетарний характер. В максимумах парних (по Цюріхській класифікації, в якій 11-річний цикл із максимумом в 1750 р. вважається нульовим) циклів тиск в приполюсних областях понижений, а в помірних широтах – підвищений. Навпаки, в максимумах непарних циклів спостерігається зворотне явище: підвищення тиску в полярній шапці і пониження – в помірних широтах. Різниця між парними і непарними 11-річними циклами вважається одним із ознак існування 22.3-річного циклу в розглядуваному геофізичному явищі. Більш чіткий прояв саме 22.3-річного магнітного циклу в атмосферній циркуляції скоріше всього вказує на чималу роль заряджених часток при їх впливові на атмосферну циркуляцію, оскільки тільки вони при своєму розповсюдженні від Сонця можуть відчувати різницю між парними і непарними циклами сонячної активності, які визначаються зміною полюсності магнітного поля Сонця [5,12].

Ретельні дослідження показали, що в атмосфері Землі основний внесок в зміну тиску біля нижньої границі тропосфери вносять процеси, що відбуваються біля верхньої границі тропосфери – поблизу тропопаузи (30% зміни тиску біля поверхні Землі визначаються процесами в шарі 0–3 км і на 60% пов'язані з процесами, що відбуваються вище 8 км – біля тропопаузи) [13].

Дуже огрубляючи все викладене вище, можна сказати, що значне підвищення сонячної активності, чи навіть всяка помітна перебудова режиму сонячної діяльності – дестабілізує планетну атмосферу. При цьому, сонячна активність по відношенню до планетної атмосфери виступає передовсім як тотальний синхронізатор найрізноманітніших фізикоатмосферних явищ. Синхронно протікаючі процеси діють один на інший і ведуть до формування циклічних зв'язків, зокрема, і на основі резонансних співвідношень, які значно підсилюють ефект впливу. При пониженні сонячної активності ці зв'язки можуть частково розпадатися, замінюючись системою випадкових відносин.

2. ПЛАНЕТИ-ГІГАНТИ. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

Низька середня густина планет-гігантів вказує на малу молекулярну масу основних складових, якими можуть бути лише легкі гази – перш за все водень та гелій. Вся видима поверхня планет та деталі, по яких визначають періоди обертання навколо осі – все це є досить густі хмари. На Юпітері вони утворюють численні пояси жовто-коричневих, білих, червоних та голубуватих відтінків. Вигляд зон та смуг досить мінливий, хоча основні особливості (деталі) можуть зберігатися тривалий час. Змінюється і загальний відтінок планети.

Атмосфера Юпітера складається (по об'єму): водень – майже 89%; гелій – майже 11% (це приблизно 80:20 по масі). Решта (значно менше 1%) складають інші елементи: CH_4 , NH_3 , PH_3 , H_2S , GeH_4 , CO , C_2H_6 , C_2H_2 та ряд інших. Загальна протяжність його газової атмосфери перевищує 16000 км. Верхня тисяча кілометрів атмосфери під шаром видимих хмар знаходиться в безперервному русі в основному під впливом потоків тепла із надр планети – та, частково, під дією Сонячного випромінювання [20].

Профіль атмосфери Сатурна в загальних рисах практично повторює профіль Юпітера, хоча і з деяким особливостями: протяжність хмарового шару на Сатурні майже в 7 разів більша, ніж на Юпітері, проте ці хмари майже вдвічі більш розріджені. Потік тепла із надр планети більш ні у 2 рази перевищує енергію від Сонця.

Якщо б дві чорні сфери установити на відстані від Сонця, на яких перебувають Уран та Нептун – то їх температура установилася б на рівнях 57K та 47K, відповідно. Проте виміри показують, що ефективна температура для обох планет однакова: 57K (!). Цей факт можна пояснити лише одним: на Урані майже відсутні власні джерела поповнення енергії, тоді як Нептун має значне джерело власної внутрішньої енергії. Через відсутність власних джерел енергії метеорологічна активність атмосфери Урана набагато менша ніж на інших планетах-гігантах. Внутрішній тепловий потік від Нептуна в 2.7 разів більший, ніж той, що він отримує від Сонця. Тому його метеорологічна активність досить значна. Наприклад, наземні спостереження показували, що в деяких інфрачервоних смугах поглинання яскравість планети інколи змінювалась майже на три зоряні величини (тобто, в ≈ 16 (!) разів) [17–19].

Розглянемо детальніше кожен із планет-гігантів окремо.

3. ЮПІТЕР.

Блиск Юпітера в цілому, його окремих ділянок і основних морфологічних деталей (зон, поясів, полярних шапок) помітно змінюється з часом, що пов'язано як із зміною відстані до земного спостерігача, так і зі зміною альbedo планети через варіації ширини і інтенсивності темних і світлих хмарових утворень на планеті (тобто з варіаціями оптичних характеристик атмосфери планети, а значить – з їх фізичними, кінематичними, хімічними характеристиками). Зміна відбивної здатності хмар в атмосферах планет, їх кольору і т.п. скоріше всього пов'язані з наявністю малих фотохімічно активних домішок, які або змінюють з часом свою відносну концентрацію на досліджуваному рівні в атмосфері, або реагують на невеликі температурні коливання зміною свого кольору. Тобто, варіації оптичних характеристик атмосфери планети повинні бути відображенням різноманітного роду нестабільностей, збурень, пульсацій і т.п. кінематичних і динамічних характеристик планетних атмосфер. Тому, одним із шляхів дослідження нестационарних процесів в атмосферах планет-гігантів є вивчення варіацій оптичних характеристик хмарового шару планети і/або надхмарового туману в широкому діапазоні спектра [1–4].

З 1862 по 1991 р. різними авторами виконано 255 окремих оцінок блиску Юпітера у видимому світлі (в тому числі 93 наші оцінки в 1978-1991 рр.), що дозволило нам вирахувати 33 середньорічних значення зоряної величини M_o (кружки на рис. 1), які ми звели в єдину систему з приведенням блиску планети до середнього протистояння і до фази $\alpha \approx 0^\circ$. По середньорічних даних нами отримано, що зміна інтегрального блиску Юпітера в максимумах сонячної активності (див верхню частину рис.1) має екстремуми: мінімуми для непарних і максимуми для парних циклів. Тобто в зміні блиску всього диску Юпітера у видимому світлі проявляється 22.3-річний Хейловський магнітний цикл сонячної активності. Крім того, ці ж дані вказують на наявність вікових змін M_o з можливим значенням періода майже 180

років (штрихова лінія на рис.1). Застосувавши нашу програму проведення математичного спектрального аналізу фотометричних рядів спостережних даних по методу максимуму ентропії до послідовності даних із 33 точок ми одержали з вірогідністю краще 99% наявність періоду в зміні візуального блиску Юпітера із значенням $T=22.5(+1.6,-1.2)$ років, що близько до тривалості Хейловського магнітного циклу сонячної активності.

Виконавши аналогічні обчислення для фотометричного ряду $M_{Ю}(t)$, що складається із всіх існуючих в нашому розпорядженні 255 індивідуальних точок, ми отримали періодограму, де із кращою роздільною здатністю по частоті, але з меншою вірогідністю: 1) краще 95% – виявлено прояв уже двох значень періодичних складових: $T1=23.9(+1.4,-1.0)$ і $T2=22.1(+1.3,-0.9)$ року, і 2) краще 90% – проявляються періоди $T3=11.88(+0.8,-0.6)$ і $T4=11.1(+0.7,-0.5)$ року. Таким чином, проведений нами аналіз змін інтегрального блиску Юпітера у візуальній ділянці спектра з часом показує на значно більший вплив саме Хейловського магнітного циклу сонячної активності на процеси в атмосфері Юпітера, які відбуваються на рівні формування верхньої границі хмарової системи планети.

Аналіз існуючих фотометричних результатів $M_{Ю}(t)$ дозволив виявити, також, прояв подвоєного орбітального періоду (23.9 року), самого орбітального періоду (11.88 року) і періоду сонячної активності, що характеризується зміною чисел Вольфа W (11.1 року).

Попередній аналіз опублікованих в науковій літературі результатів, а також наші спостережні дані за 1979-1995 рр. про відносний розподіл яскравості вздовж центрального меридіану Юпітера показали, що у всі роки найбільші варіації відбивної здатності відбувалися в екваторіальній (EZ) та в південній і в північній тропічних зонах (STrZ, NTrZ). Саме останні дві зони частіше всього поперемінно ставали

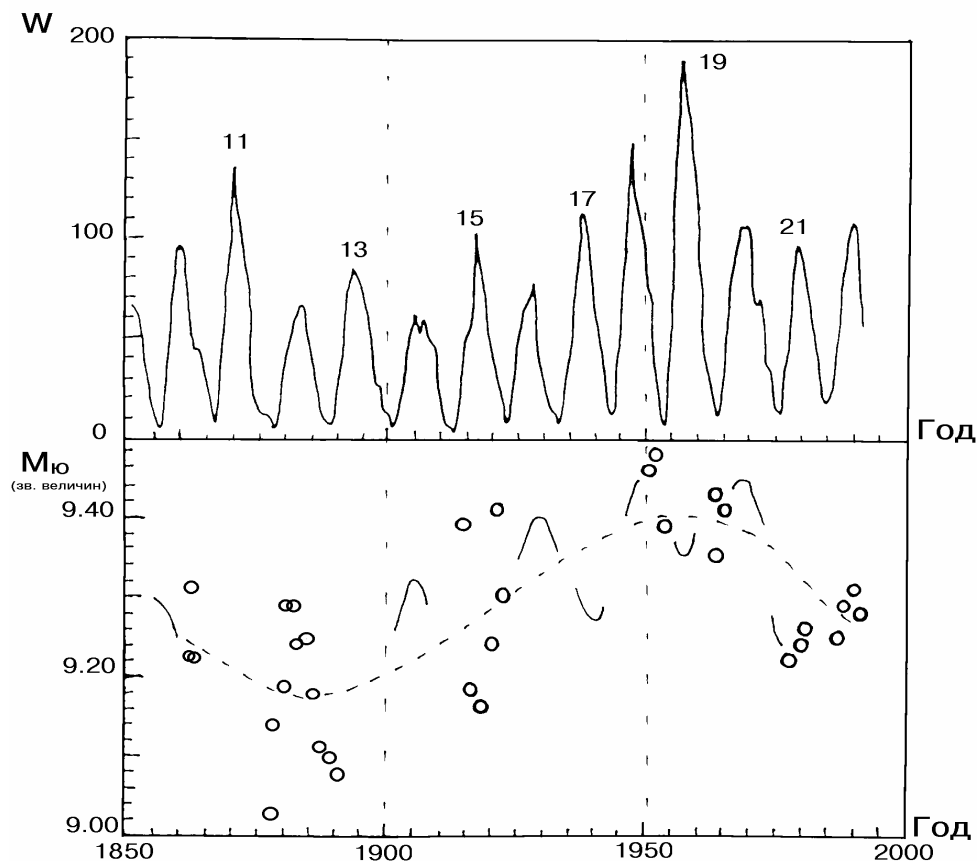


Рис. 1. Зміни візуального блиску Юпітера.

найяскравішими областями на диску. Тому відношення їх яскравостей A_j ми запропонували в якості індексу активності процесів, що відбуваються в атмосфері Юпітера. Вираховувалися значення індексу активності для двох спектральних ділянок: 360-425 нм (кружки на рис.2) і 540-580 нм (квадратики на рис.2). Результати в синій ділянці спектру ми апроксимували синусоїдою: $A_j = A_0 \sin\{2(t-t_0)/T\}$ (лінія "1" на рис.2).

Застосування методу найменших квадратів дозволило визначити невідомі параметри цієї функції ($A_0=0.21\pm0.02$; $t=1965.1\pm0.3$; $T=11.86\pm0.15$). Тобто, запропонований нами фактор активності A_j періодично змінюється з амплітудою $A_0=0.21$ і зі значенням періоду $T=11.86$ років. Відношення A_j для спектрального діапазону 540-580 нм показують, що в цій ділянці спектра розмах коливань яскравості майже на чверть менший і момент, при якому значення $A_j=1$, відповідна крива проходить на 1.5-2 року раніше, ніж крива у синій ділянці спектра.

Таким чином, виконаний аналіз показав існування циклічності в довгоперіодичних коливаннях фактора активності A_j півкуль планети з періодом 11.86 років. Це значення в точності співпадає з періодом обертання Юпітера навколо Сонця [3, 4].

Така періодична зміна яскравості в різних півкулях планети вказує на те, що в атмосфері відбувається періодична глобальна перебудова всієї системи циркуляції, структури хмарових шарів і надхмарового туману [3]. Тобто, аналіз спостережних даних вказує на існування сезонної, вікової та ін. сонячно-обумовленої перебудови в атмосфері Юпітера.

4. СЕЗОННІ ЗМІНИ В АТМОСФЕРІ САТУРНА.

Для планет, які подібно Землі мають значний нахил екватора до площини орбіти, характерна набагато більш виражена, ніж для Юпітера, відмінність в притоці сонячної енергії до різних широтних поясів за період обертання навколо Сонця. Так, наприклад, кут нахилу екватора Сатурна до площини його орбіти складає $26^\circ 44'$, а сидеричний період обертання навколо Сонця – 29.45 років. Тому Сатурн один з основних претендентів із групи планет-гігантів, на якій необхідно вивчати сезонні зміни стану

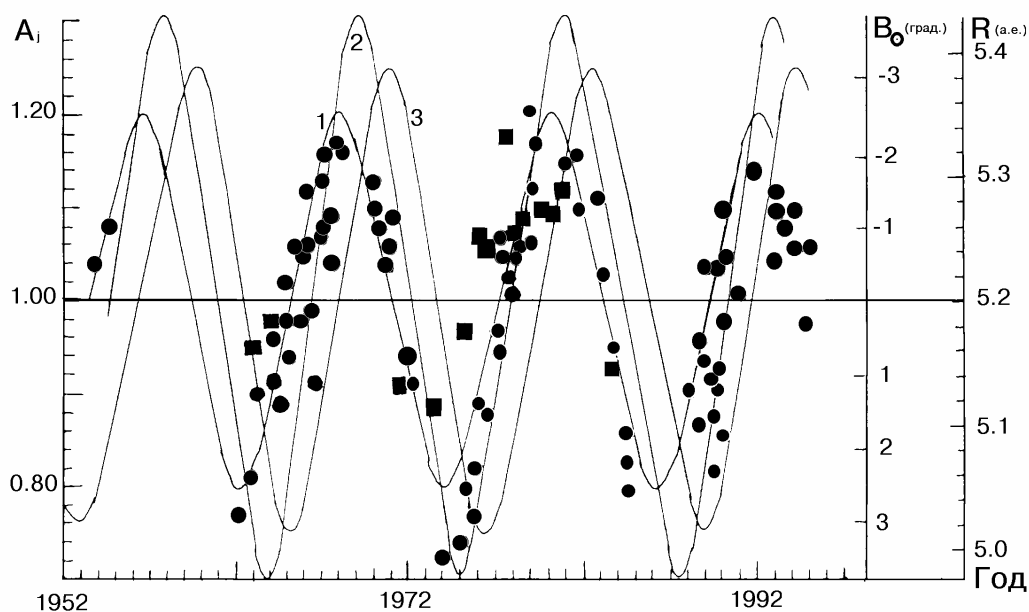


Рис. 2. Варіації фактора активності Юпітера.

атмосфери на протязі розумного інтервалу часу.

Прості розрахунки показують [15], що південна півкуля планети одержує в сумі більшу кількість сонячної енергії, ніж північна, поскільки літнє для південної півкулі сонцестояння має місце під час знаходження Сатурна в перигелії, і саме через еліптичність орбіти ($e=0.05566$) спостерігається асиметрія притоку енергії до південної і північної півкуль на 25%. Особливо великі сезонні варіації притоку енергії від Сонця спостерігаються на високих широтах [2]: в 10 і більше раз (рис.3). Крім, того, зимова півкуля тривалий час знаходиться як в полярній ночі, так і в тіні кілець, які ще на дві третини зменшують величину притоку сонячної радіації до атмосфери, підсилюючи, тим самим, сезонні контрасти в притоці енергії від Сонця (рис. 4).

Ясно, що така зміна режиму опромінення атмосфери Сатурна повинна відобразитися на фізичних і оптичних характеристиках хмарового покриву і/або надхмарового туману планети та на вертикальній структурі атмосфери на різних широтах. Оскільки Сатурн має досить потужне джерело внутрішньої теплової енергії [20], то можна очікувати, що воно є визначальним в процесах, які відбуваються в нижній і в середній тропосфері планети, де утворюється основний хмаровий шар, організовується зональна структура і де формується відбите випромінювання у видимому спектральному діапазоні.

Зміни ж сезонного притоку енергії від Сонця значно сильніше будуть впливати на більш високі рівні атмосфери, де формується випромінювання в ультрафіолетовій ділянці спектру і в деяких інфрачервоних смугах і лініях. Саме тут і необхідно шукати можливі зміни відбивних і випромінювальних властивостей атмосфери Сатурна, пов'язані із сезонними варіаціями притоку сонячної енергії. Хоча не виключена можливість опосередкованого впливу варіацій притоку сонячної енергії і на більш глибокі горизонти атмосфери.

Моменти так званого рівнодення, які повторюються кожні ≈ 14.72 років (в 1995, 1980, 1966 рр. і т.п.), були дуже сприятливими для отримання порівняльних характеристик окремих поясів обох півкуль Сатурна, поскільки саме в цей час екватор інтенсивності практично співпадає з істинним екватором планети. При цьому кільця Сатурна закривали на диску вузьку смугу шириною всього 0.1-0.4" при лінійному розмірі діаметра Сатурна $\approx 20''$. Нижче наведені результати спостережень Сатурна в 1995 та 1980 рр. отримані нами (на рис.5 показано відносний розподіл яскравості вздовж центрального меридіана Сатурна, а на рис.6 – відносний розподіл яскравості вздовж південної екваторіальної зони (SEZ) планети по спостереженнях: (а) у лютому 1980 р. і (б) в червні 1980 р. [3], а в 1966 р. результати взяті із наукової літератури [3].

Аналіз спостережного матеріалу показав, що в довгохвильовій ділянці спектра спостерігається найбільше потемніння від центрального меридіана до краю. При переході до синіх променів яскравість

S_{\odot} , $J \cdot cm^{-2} h^{-1}$

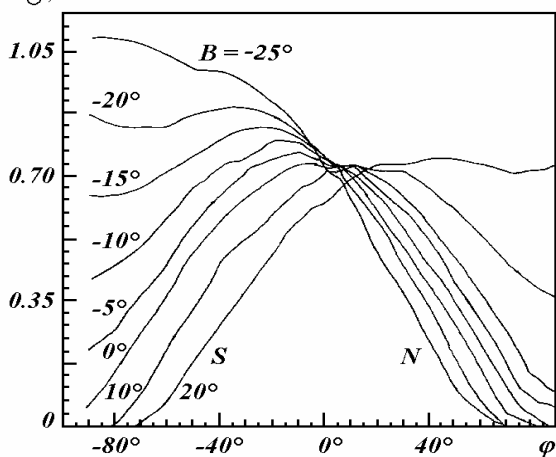


Рис. 3. Приток сонячної енергії до хмарового шару Сатурна.

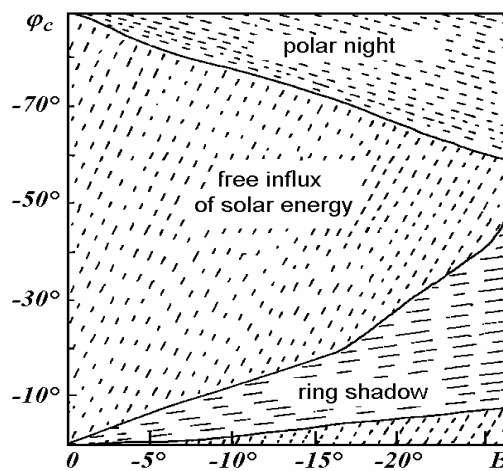


Рис. 4. Режим опромінення Сонцем широтних поясів Сатурна.

крайових областей починає рости і в ультрафіолеті перевищує яскравість в центрі диска. Розподіл яскравості по центральному меридіану в довго- і короткохвильовому діапазонах спектра має різний вигляд [16].

Для фотометричних сканів в 540 нм характерна наявність яскравої південної екваторіальної зони, яка на 20-30% яскравіша південної помірної області (на широтах $|40^\circ|$), відповідно, при 540 нм і 755 нм. Північна екваторіальна область на 7-10% темніша SEZ. Крім асиметрії екваторіальних областей, деяка асиметрія спостерігається і на помірних широтах. Так, на широтах $|35^\circ|$ північна півкуля систематично яскравіша південної на 3-6%. Для коротких довжин хвиль характерне значне зменшення відбивної здатності екваторіальних областей Сатурна у порівнянні з іншими деталями. Причому найтемніша область диску зміщена у південну півкулю. І якщо в 457 нм це ще мало помітно, то в ультрафіолеті добре видно, що південний екваторіальний пояс на 5-15% (в різних довжинах хвиль) темніший північного.

Помірні пояси в обох півкулях на 20-40% яскравіші південного екваторіального поясу. На довжині хвилі 346 нм і, особливо, в 316 нм, спостерігаються темні полярні шапки на широтах $>|60^\circ|$. Вперше знайдений нами факт значного потемніння полярних областей в ультрафіолеті [1,3], пізніше для довжини хвилі 264 нм був підтверджений при спостереженнях Сатурна з космічного апарату "Вояджер 2" [1, 3].

Тобто, найбільше поглинання в ультрафіолеті характерне для екваторіальної області Сатурна і для полярних областей в південній і в північній півкулях. В коротких довжинах хвиль, так же як і в довгохвильовій ділянці спектра, існує значна асиметрія південної і північної помірних областей. Причому, якщо в 457 нм північна півкуля яскравіша, то в ультрафіолеті навпаки: відбивна здатність південної півкулі вища, відповідно, на 3% в 407 нм і на 20% в 316 нм.

Крім того нами виявлено зміни характеру розподілу яскравості вздовж різних широтних поясів Сатурна. В червоній ділянці спектра вона лише появляється, а в короткохвильовому діапазоні вже добре помітна. Цікаво зазначити, що при 407 нм спостерігаємо сильну відмінність характеру потемніння в південній і північній екваторіальних областях Сатурна: в NEZ потемніння до краю значно більше, ніж в SEZ. Така відміна в деякій мірі зберігається і в 372 нм, де в північній екваторіальній області збільшення яскравості до краю замінюється її зменшенням при значеннях $\cos(i)$ (i – кут відбивання світла від хмарового шару) дещо більшому, ніж в SEZ. Порівняння наших результатів в ультрафіолеті 1980 р. з

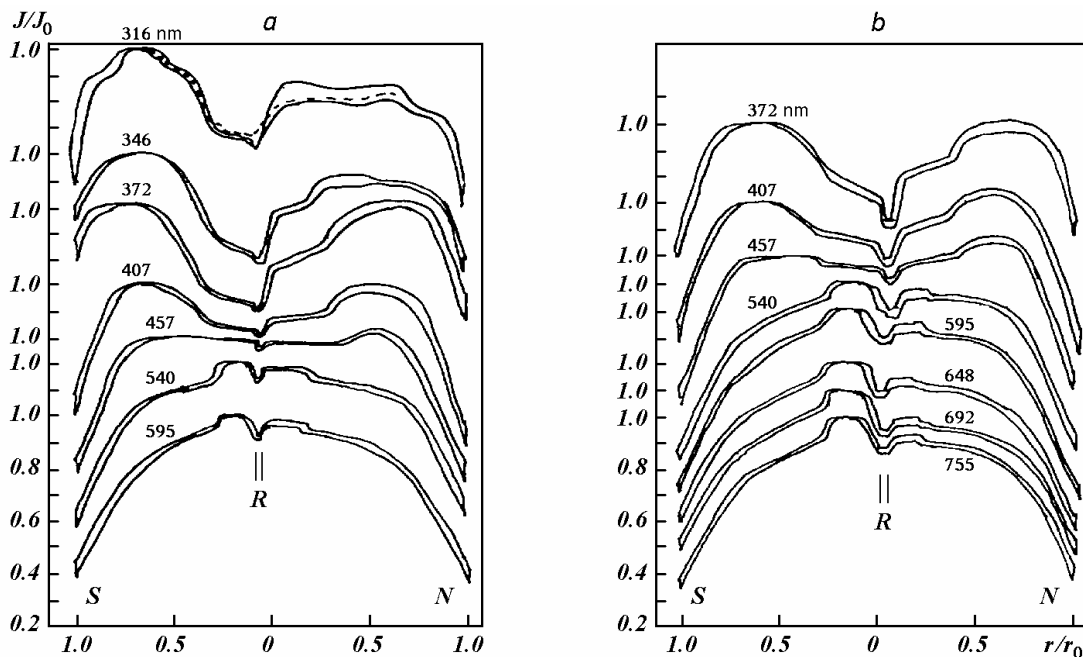


Рис. 5. Розподіл яскравості вздовж центрального меридіана Сатурна (а – лютий 1980 р., б – червень 1980 р.).

даними 1966 р. при аналогічних умовах опромінення Сатурна сонячною радіацією, показує, що в 1966 р. також мала місце відмінність в характері зміни потемніння до краю диску між SEZ і NEZ. Проте, в той час в північній екваторіальній зоні спостерігалось значне збільшення яскравості від центру до краю, тоді як в SEZ воно практично було відсутнє.

В 1980 р. ситуація змінилася на зворотну: вже SEZ мала значно більшу яскравість на краю диска, хоча й стала найтемнішою деталлю на диску Сатурна. В 1966 р. самою темною деталлю була північна екваторіальна область.

Звертає на себе увагу той факт, що такий аномальний характер зміни яскравості до краю мають ті екваторіальні області, які тривалий час (до 14 земних років) були закриті кільцями Сатурна: до 1966 р. кільця закривали південну екваторіальну область, а з 1966 по 1980 рр. вони закривали вже NEZ. Крім того, як в 1966 р., так і в 1980 р., раніше затемнені кільцями широтні пояси мали підвищене на 20-50% значення альbedo в синій і ультрафіолетовій ділянках спектра, у порівнянні з тими екваторіальними областями, що не екранувались кільцями.

Таким чином, приведені вище дані відносної фотометрії Сатурна за 1966 і 1980 рр. у видимій ділянці спектра не дозволяють зробити висновок про наявність значних часових варіацій альbedo широтних поясів Сатурна, які перевищують ефект зміни нахилу осі обертання планети. В той же час в ультрафіолеті відбулися істотні часові зміни яскравості на різних широтах, що можуть бути наслідком глобальних процесів, які відбуваються в атмосфері планети. Найбільш очевидним поясненням варіацій альbedo хмарового шару Сатурна в УФ може бути наявність сезонних змін, викликаних варіаціями опромінення різних широт планети Сонцем [14].

Розглянемо можливі відмінності в розподілах яскравості по диску Сатурна в різних довжинах хвиль спектрального діапазону 316-866 нм. З цією метою по запропонованій нами методиці ми опрацювали всі існуючі в нашому розпорядженні розподіли яскравості вздовж центрального меридіана за 1966, 1980 і 1995 рр., тобто, для моментів, коли обидві півкулі Сатурна одержували від Сонця приблизно однакову кількість енергії. Для цього ми поділили північну частину фотометричного профілю на відповідну південну його частину і отримали хвилю відношень яскравостей північної і південної півкуль в різних довжинах хвиль для відповідних широт (рис.7). Результати для всіх довжин хвиль ми нормували на яскравість центру диску Сатурна. Для 1966 р. в нашому розпорядженні були дані в трьох довжинах

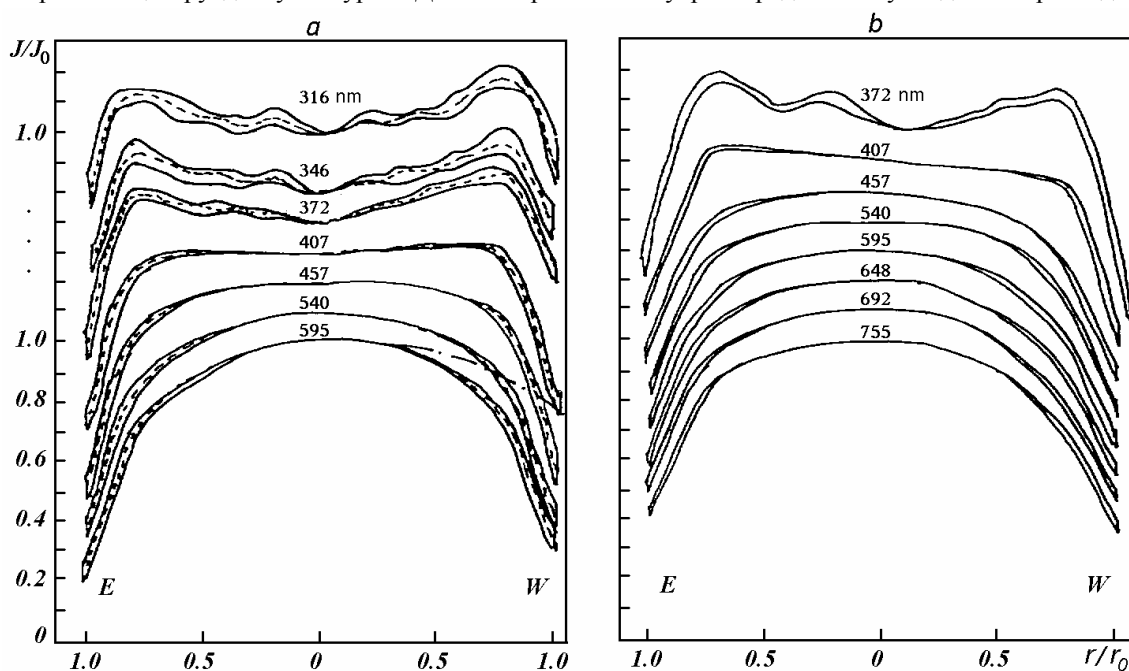


Рис.6. Розподіл яскравості вздовж південної екваторіальної зони Сатурна.

хвиль: 350, 590 і 619 нм (пунктир на рис.7), а для 1995 р. – в 866 нм (штрих-пунктир на рис.7).

Як видно із рис.7, найбільші варіації альbedo з широтою спостерігаються в ультрафіолеті (346-372 нм) і в смугах поглинання метаном при 725, 792 і 866 нм. В інших довжинах хвиль відмінності в яскравостях південної і північної півкуль значно менші. При цьому, звертає на себе увагу ряд особливостей.

1) Повна антифазність спектрального ходу відношень B_N/B_S для екваторіальної області з одного боку і помірної і полярної областей з іншої. Антифазність проявляється в тому, що в УФ в 1980 р. північна екваторіальна область яскравіша південної, тоді як на помірних широтах і в полярних регіонах південна півкуля яскравіша північної. В видимих і в червоних променях навпаки: уже південна екваторіальна область яскравіша північної, а в помірних широтах і в полярних областях – північна півкуля має більшу яскравість.

2) Із наших даних за 1980 р. для всіх трьох виділених широтних поясів (екваторіальний, помірний та полярний) існує значення довжини хвилі, при якому їх яскравість в північній і південній півкулях однакова. Причому, при переході від УФ в червону область спочатку вирівнюються яскравості в помірних широтах (при 407 нм), після цього в південній і в північній екваторіальних областях (при 457 нм) і тільки при 540 нм вирівнюються яскравості полярних регіонів.

3) В 1966 р. спостерігалася дещо інша картина: полярні області в обох півкулях приблизно рівні по яскравості для всіх трьох існуючих в нашому розпорядженні довжин хвиль – 350, 590 і 619 нм; південна екваторіальна область була яскравіша північної екваторіальної області в усіх довжинах хвиль; в помірних широтах в ультрафіолеті і в 590 нм північна півкуля дещо яскравіша південної, і лише в метановій смузі при 619 нм південна півкуля на 5% яскравіша північної.

Таким чином, в ультрафіолеті яскравості всіх досліджуваних в 1966 р. широтних поясів знаходяться в протифазі до аналогічних спостережних даних, одержаних в 1980 р. [14]. В метановій смузі поглинання при 619 нм яскравості помірних і приполярних областей Сатурна знаходились в протифазі з розмахом амплітуди до 15-20%. Деяка хвиля протифазності яскравостей спостерігалася і в екваторіальних областях. Проте, як в 1966, так і в 980 р. SEZ була яскравіша NEZ. Із вищенаведеного аналізу слідує висновок, що найдостовірніше протифазність у яскравостях північної і південної півкуль Сатурна в 1966 і в 1980 рр. (з розмахом амплітуд до 45%) – проявляється в екваторіальному поясі по спостереженнях в ультрафіолетових променях. Для помірних і приполярних поясів розмах амплітуд відношення яскравостей по даних 1966 і 1980 рр. в 350 нм складає 15-20%. Тобто, максимальна амплітуда сезонних варіацій спостерігається на широтах $[5-15^\circ]$. Саме зазначені широти довше всього знаходяться в затінку кілець. Ця причина значно підсилює контраст варіацій притоку енергії до планетної атмосфери від Сонця через затемнення кільцями якраз зимової півкулі Сатурна.

На підставі одержаних нами електро-

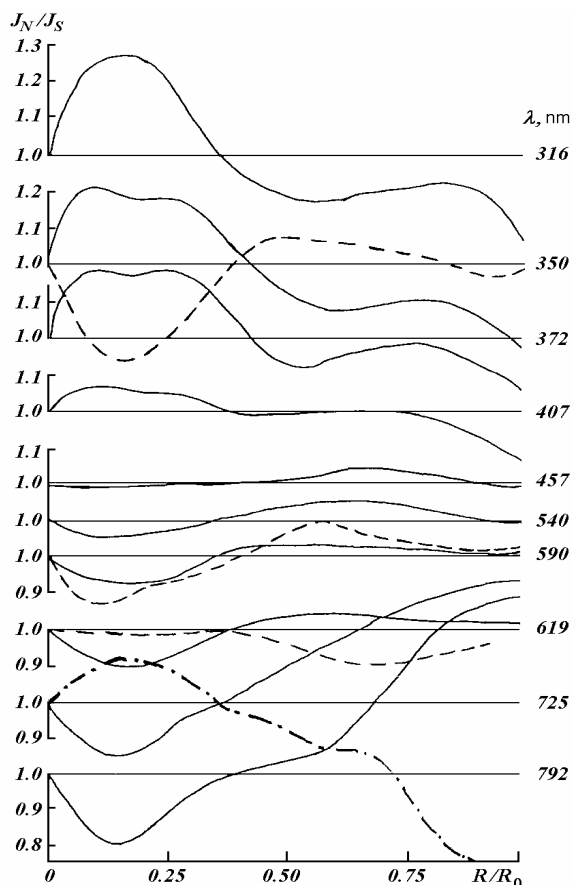


Рис.7. Сезонні "хвилі" яскравості.

фотометричних, спектро-фотометричних і спектрополяриметричних даних, а також аналогічних даних, одержаних іншими авторами (про абсолютну відбивну здатність різноманітних ділянок диску Сатурна, про відносний розподіл яскравості вздовж різних широтних поясів і вздовж центрального меридіана планети, про поляризаційні властивості різних ділянок видимого диску), в різних довжинах хвиль при різних умовах освітлення планети Сонцем і в різні сезони видимості Сатурна, ми визначили оптичні параметри газової і аерозольної складових атмосфери планети [16]. Розрахунки виконувалися виходячи з припущення, що поле відбитого випромінювання в спектральному діапазоні 300-800 нм формується в тій частині атмосфери Сатурна, яка може бути представлена двома однорідними шарами: верхній шар є оптично тонким чисто газовим з деякою оптичною товщиною розсіюючої компоненти; нижній газозааерозольний напівнескінчений шар.

Численні дослідження поляризаційних властивостей різноманітних ділянок на диску Сатурна не показали наявності широтних неоднорідностей. Це дало підставу стверджувати, що дійсна частина показника заломлення хмарових часток і їх розмір для різних широтних поясів практично однакові [3]. Звідси слідує висновок про те, що спостережувані відмінності в фотометричних (відбивних, поглинальних і випромінювальних) властивостях широтних поясів можуть бути обумовлені відмінностями: об'ємної концентрації хмарового аерозоля, оптичної товщини надхмарового газового шару, спектральних значень уявної частини показника заломлення хмарових часток. Варіації саме цих перерахованих вище характеристик слабо відбиваються на поляризаційних властивостях атмосфери, проте мають істотний вплив на її яскравість [16]. Міру цих відмінностей ми оцінювали по розподілах яскравості по диску Сатурна в неперервному спектрі і в молекулярних смугах поглинання, одержаних нами в 1980 р. (відповідні розрахунки приведені пунктиром на рис.6), а також по даних, отриманих іншими авторами в моменти, близькі до "зникнення" кілець, тобто, коли обидві півкулі Сатурна знаходились в однакових умовах опромінення планети Сонцем. В рамках прийнятої нами вище двошарової моделі атмосфери планети були визначені оптичні характеристики широтних поясів для різних моментів спостережень. Відповідний розрахунок об'ємного коефіцієнту розсіяння газу було виконано для воднево-гелієвої атмосфери, що складається із 85% водню і 15% гелію.

Із аналізу значень параметрів, розрахованих для різних широтних областей, нами зроблено висновок, що для півкулі, яка до моменту одержання спостережних даних екранувалась кільцями (там тривалий час була зима: в південній півкулі до 1966 і до 1995 р. та в північній півкулі до 1980 р.), хмаровий шар є більш розрідженим і його верхня границя знаходиться в ньому на більшій висоті, ніж у півкулі, яка "пережила" до цього літній сезон. Крім того, ті екваторіальні області Сатурна, які тривалий час були закриті кільцями, відчуваючи дефіцит притоку в атмосферу сонячної радіації, відрізняються від інших широтних поясів підвищеною кількістю сильно поглинаючої кольорової домішки.

Оскільки періоди обертання далеких планет навколо Сонця складають від 11.86 років у Юпітера до 248 років у Плутона, то дослідження можливих сезонних або інших довгоперіодичних варіацій їх оптичних властивостей на перший погляд може здаватися малоперспективним і навіть взагалі неможливим на коротких інтервалах часу. Проте, у всіх планет існують певні критичні точки на орбіті, поблизу яких відбувається різка зміна оптичних характеристик. Яскравим прикладом цього є момент весняного рівнодення на Землі, коли за один місяць до нього сніжний покрив спостерігається від північного полюсу до широт 30-40°, а в південній півкулі сніг тане навіть на берегах Антарктиди; всього через один місяць після переходу підсонячної точки через екватор в північній півкулі сніг залишається тільки на частині арктичних островів, а в протилежній півкулі сніжний покрив займає область від південного полюсу до широти 30-40°. Отже, дистанційне спостереження Землі протягом всього двох місяців (0.17 земного року) дозволяють виявити зміни оптичних властивостей планети і установити, що саме сезонні варіації опромінення планети Сонцем будуть причиною існуючих змін. На прикладі дослідження хмарового шару Сатурна по дистанційних спостереженнях в метанових смугах поглинання на протязі інтервалу часу 1965-1967 рр. (при періоді обертання Сатурна навколо Сонця 29.45 земних років (!)) ми показали реальність вивчення сезонних змін в атмосферах планет на коротких інтервалах часу поблизу знаходження цих планет на орбіті в точках весняного (осіннього) рівнодення [2].

5. УРАН ТА НЕПТУН.

Змінні процеси, які відбуваються в атмосферах Урана та Нептуна на сьогодні вивчені набагато менше. Це викликано в першу чергу тим, що диски цих планет практично не розділяються на деталі при наземних спостереженнях. До таких процесів можна віднести зміни з часом в локальних областях атмосфери деяких її параметрів: концентрації аерозолі, хімічного складу, питомого вмісту газів, температури, швидкості переміщення повітря. Висновок про те, що фізичні і оптичні властивості атмосфер із часом змінюються слідує хоч би із того, що у цих планет спостерігається зміна блиску, поява і зникнення дуже яскравих деталей на диску, зміна температури і т. ін. Результати спостережень про зміни блиску, одержані в різних довжинах хвиль, дозволяють визначити напрям і швидкість розповсюдження коливальних процесів в атмосфері.

Варіації абсолютних зоряних величин “B” і “V” для Урана і Нептуна, результати спектрофотометричних спостережень [17–19] та спостережень із середньополосними фільтрами показані на рис.8, 9 [7, 8, 17–19]. Між кривими блиску, збудованими по даних широкополосної фотометрії і спектрофотометрії, та кривими середньополосної фотометрії спостерігається кореляція, хоча колювання блиску Урана і Нептуна характеризуються різними періодами і амплітудою. Як показують дослідження

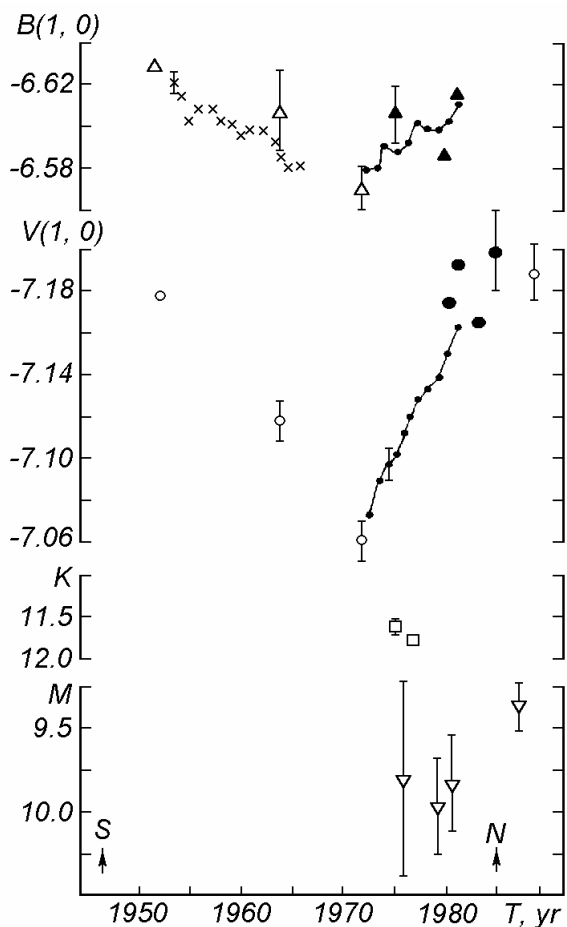


Рис.8. Блиск Урана в широких B,V,K,M і в середньополосних b,y фільтрах в 1952–1989 рр. Світлі знаки – широкополосна фотометрія, темні – спектро-фотометрія, крапки – спостереження Серковського і Джерзиковича в фільтрі “B” по Локвуду, лінія з крапками – середньополосні спостереження Локвуда, стрілки – моменти сонцестояння.

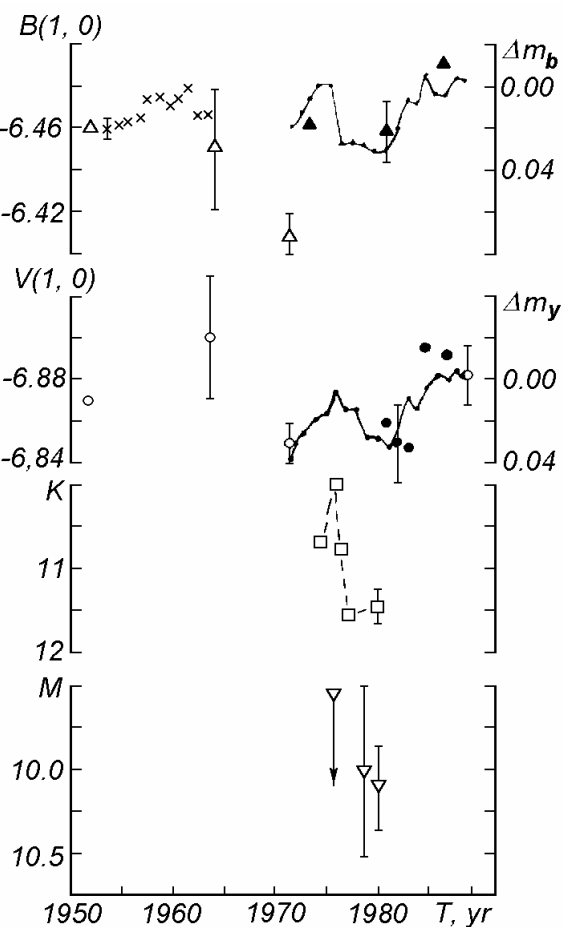


Рис.9. Блиск Нептуна в період 1952–1989 рр. Позначення ті ж що й на рис.8.

блиск Урана в фільтрах "В", "V" досягає максимуму тоді, коли із Землі спостерігаються його північна (в 1946 р.) або південна (в 1985 р.) полярні області. Менш яскравим Уран був в 1971 р., коли планетоцентричне схилення Землі складало майже -22° , що дає значення періоду змін в 40-45 років. Протягом 1952-1989 рр. блиск планети в фільтрах "В", "V" і "R" змінювався відповідно на 0.06, 0.12 і 0.32 зоряної величини (з.в.). В фільтрі "М" між 1975 і 1987 рр. спостерігалось збільшення на 0.5 з.в., а от в фільтрі "К" із 1975 по 1979 рр. було зареєстровано пониження яскравості на 1 з.в. Блиск Нептуна в синій і видимій областях спектра досягав максимуму в 1962-64, 1975-76 і 1985-87 роках, мінімуму – в 1952, 1972 і 1981-83 рр. Період можливих коливань складає приблизно 12-15 років.

Яскравість планети в фільтрах "В", "V" і "R" змінювалася на 0.03, 0.04 і 0.09 з.в., відповідно. В 1975-1976 рр. протягом декількох місяців в фільтрі "К" спостерігалось збільшення потоку на 1.5 з.в., після чого послідував його спад. Максимуми блиску в фільтрах "К" і "у" були зареєстровані в один і той же час. В смузі "М" спостерігалось збільшення потоку на 0.5 з.в. (рис.9).

Таким чином при збільшенні блиску Урана в континуумі (фільтри "b", "у", "В", "V", "R" і "М") спостерігалось зменшення потоків в полосах поглинання метаном (727, 889 і 2200 нм). Очевидно, це пов'язано із зміною розсіюючих властивостей атмосфери. Оптична товщина аерозольного компоненту в тропосфері, певно, збільшувалася, а в стратосфері – зменшувалася. На Нептуні всі зміни в основному відбувалися в стратосфері.

Найбільш значні варіації еквівалентних ширин W полос поглинання метаном, що формуються у ділянці спектра 440-950 нм спостерігалися в полосах 486 і 543 нм (для Урана) і 543 і 579+619 нм (для Нептуна). Дослідження показують, що варіації W для Урана представляють собою суму двох коливань: "повільних" і "швидких". Можливий період "повільних" – складає майже 42 роки, "швидких" – 6-7 років, і не виключено, що останні носять неперіодичний характер [7, 8].

Із спостережень було отримано також, що еквівалентні ширини квадрупольних ліній водню (4-0) S(0) і S(1) в спектрі Урана з 1973 по 1983 рр. зменшилися майже на 40%, а в спектрі Нептуна – на 20-50%.

Ще в 1978 р. вперше було повідомлено про часові варіації потоків Урана в мікрохвильовій області спектра поблизу 3см: з 1966 р. по 1977 р. середня температура диску планети збільшилася приблизно на 60K (від 160 до 220K) [19]. Такі варіації потоків викликані зменшенням кількості аміаку в атмосфері при переході від екватора до полюсу планети і спорадичними варіаціями вмісту аміаку в масштабі всієї планети. Обидва типи коливань пов'язані із зміною швидкості вертикальних потоків в нижніх шарах атмосфери.

Для Урана і Нептуна досліджувались варіації значень яскравісних температур T з часом для двох інтервалів довжин хвиль: ближнього (1.90-3.90см) і дальнього (6.0-6.12см). Оцінки температур приводились до одних і тих же геометричних параметрів планети (тиску і екваторіального радіуса).

Для Урана окрім повільних коливань (з періодом ≈ 40 років і амплітудою майже 15K) були знайдені швидкі зміни з періодом $\approx 7-8$ років. Амплітуда швидких варіацій складає 15-20K, а з врахуванням спектральної залежності температури – 10-15K. Причому, екстремальні значення температури Урана поблизу довжини хвилі в 6 см спостерігаються на 1.5-2 року раніше, ніж біля 3см.

Потоки Нептуна на довжинах хвиль в 2-7см теж змінюються з часом. Середня температура диска планети поблизу 3см в 1970-1982 рр. знизилася на 50K, а до 1990 р. знову зросла до попереднього рівня 191K. Звідси випливає імовірне значення періода в $\approx 15-20$ років із значенням повної амплітуди $\sim 40K$.

Близькі значення періодів варіацій потоків в оптичному і мікрохвильовому діапазонах вказують на існування тісного зв'язку між цими змінами. Дане припущення підтверджується характерними деталями на експериментальних кривих. Наприклад, всі графіки Урана після 1978 р. демонструють схожі різкі зміни, а Нептуна – плавний підйом і послідовний спад. На підставі одержаних оцінок дослідниками зроблено висновок про існування тісного зв'язку між варіаціями у видимому і мікрохвильовому діапазонах. Згідно із спостереженнями, коливання генеруються на глибині з тиском ≈ 50 атм і розповсюджуються нагору до рівня тиску ≈ 2 атм із швидкостями в одиниці см/сек.

6. ВЛАСНІ КОЛИВАННЯ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ.

Земна атмосфера є головним джерелом різноманітних шумів при спробах реєстрації власних коливань блиску небесних об'єктів (зірок, планет, комет і т.п.) із астрономічних спостережень на наземних обсерваторіях. Тому при дослідженні коливань блиску небесних об'єктів необхідно проводити ретельне врахування осциляцій, які викликаються власне атмосферою Землі [4].

Нами була виконана програма по дослідженню змін прозорості земної атмосфери в експедиції на горі Майданак (висота 2750м) із використанням спостережень Полярної зірки, розташування якої на небосхилі залишається практично незмінним [4]. Спостереження виконувалися на протязі декількох ночей в жовтні 1990, в березні і в липні 1991 рр. по 6-11 годин неперервного патрулювання зірки. Спектральний математичний аналіз отриманих рядів по методу максимальної ентропії (ММЕ) показав наявність осциляцій прозорості атмосфери з періодами від 2.5 до 208 хвилин. Існування періодів 48 і 104 хвилин в чималій мірі залежить від наявності, або відсутності вітру в приземному шарі. Амплітуда таких періодичних коливань із збільшенням швидкості вітру інколи зростала до 0.012 з.в. при швидкості вітру ≈ 8 м/с. При цьому, збільшувалася і сумарна потужність і розмаїтість коливань в високочастотній ділянці спектра (з періодами 3-7 хвилин).

Відомо, що періодам від одиниць годин до декількох хвилин відповідають внутрішні гравітаційні хвилі [10], що породжуються, в основному, розшаруванням атмосфери по густині та ентропії, коли середовище стійко стратифіковане гравітаційною силою. Відмічені вище особливості існування коливань з різноманітними періодами дозволяють нам зробити висновок про те, що хвилі з періодами меншими 20 хвилин характерні для верхньої тропосфери і/або стратосфери Землі, тобто знаходяться на висотах $h > 8$ км.

Про період 104 хвилини можна сказати, що цей тип коливання прозорості атмосфери характерний для нижньої тропосфери. Його першопричиною можуть бути гірські підвітрені хвилі, що утворюються в стійко стратифікованій повітряній течії над гірським пасмом, оскільки коли переміщення повітря над горами нестаціонарне, то воно спроможне генерувати біжучі хвилі [10,11]. При цьому, на гребенях хвиль може утворюватися аерозольна димка. Переміщення такої хвилі в атмосфері і призводить до модуляції блиску спостережуваних небесних об'єктів. На користь такого пояснення говорить також те, що із наших спостережень на протязі року зростання амплітуди таких коливань при збільшенні швидкості вітру відбувалося тільки в осінньо-весняні періоди, коли в атмосфері над досліджуваним об'єктом знаходиться чимала кількість водяної пари. В літній час, коли повітря сухе, амплітуда таких коливань ніколи не перевищувала 0.005 з.в.

Із проведеного математичного спектрального аналізу методом максимуму ентропії, а також із залежності по спектру спостережуваних ефектів, слідує, що внесок аерозолі в хвильові ефекти в екстинкції більший, ніж молекул повітря. Тобто, варіації прозорості земної атмосфери пояснюються, в основному, варіаціями кількості розсіюючих аерозольних часток у вертикальному стовпі атмосфери. Загальний вигляд спектра потужності осциляцій блиску небесних об'єктів дещо варіює як день від дня, так і залежно від місця спостережень. Хоча основні моди присутні по результатах досліджень всіх спостерігачів, але їх характерні особливості в чималій мірі індивідуальні. Деякі коливання зберігаються на протязі досить тривалого інтервалу часу. Найбільш стабільні періоди мають значення 20 і 104 хвилини.

Таким чином, спостереження Полярної зірки дозволили нам зареєструвати коливання прозорості земної атмосфери з періодами близькими до періодів внутрішніх гравітаційних хвиль атмосфери Землі, що вказує на існування зв'язку між гравітаційними хвилями і коливаннями прозорості атмосфери Землі.

Можливість того, що атмосфери Юпітера і інших планет-гігантів спроможні осцилювати так же як і фотосфера Сонця, вперше була запропонована Воронцовим, Жарковим і Любімовим в 1976 р. Спостереження за осциляціями в атмосферах планет-гігантів є потужним інструментом для вивчення внутрішньої будови цих планет, поскільки реєстрація мод низьких порядків дозволяє визначити радіус ядра планети, а мод високих порядків дасть можливість виявити зону переходу молекулярного водню

"рідина/метал", оскільки саме ці моди найбільш підпадають впливу загального кінематичного, динамічного і агрегатного станів зовнішніх шарів планетних атмосфер. Тобто, значення періодів власних коливальних мод планет-гігантів є чутливими до внутрішньої будови планет.

Енергія, випромінювана Юпітером, на шість порядків менша, ніж Сонцем. Оскільки потік акустичної енергії пропорційний квадрату амплітуди швидкості [10], то амплітуда зміни швидкості на Юпітері повинна бути принаймні на три порядки менша, ніж на Сонці (де вона складає $w=500\text{м/сек}$). Ретельні модельні дослідження показали [9], що можливі амплітуди радіальних швидкостей на Юпітері звичайно знаходяться в межах $0.10\text{--}0.50\text{м/сек}$.

Із загальних рівнянь метеорології [11] і приблизних динамічних і кінематичних оцінок фізичних параметрів ясно, що основна маса хмар в атмосферах планет-гігантів утворюється при наявності впорядкованих рухів повітряних мас зі значеннями вертикальних швидкостей w в діапазоні величин від одиниць до сотень см/сек під впливом переносу парів конденсатів в атмосфері. При цьому, геометрична товщина хмар на Юпітері і Сатурні в загальному випадку змінюється при зміні величини і напрямку вертикальної швидкості переміщення повітряних мас. Тому при появі навіть порівняно невеликого градієнту в вертикальній швидкості переміщення повітряних мас відбувається помітна зміна потужності сконденсованих хмарних мас в атмосферах планет-гігантів. В зв'язку з цим, при наявності періодичної зміни в швидкості вертикального переміщення повітряних мас через існування радіальних осциляцій (власних коливань планетних атмосфер) ми повинні спостерігати варіації оптичних властивостей видимого хмарного шару і надхмарового туману. Таким чином, величини вертикальної швидкості ($w=0.1\text{--}0.5\text{м/сек}$) є відмінним індикатором процесів утворення і розпаду хмарових шарів на планеті. При цьому слід чекати змін відбивної здатності хмарових шарів планети з періодами, котрі співпадають зі значеннями, із якими відбуваються зміни вертикальної швидкості.

В зв'язку з викладеним вище, ми припустили, що спостереження за процесами коливань хмаро-творчої діяльності дозволяють зареєструвати періодичні зміни оптичних характеристик в атмосферах планет дистанційним методом. Тропосфери Юпітера і Сатурна мають багатий елементний склад, деякі із компонент якого (особливо вода, гідросульфід аміаку і аміак) конденсуються на певних рівнях в атмосфері, змінюючи, тим самим, оптичні характеристики хмарового шару в цілому.

Саме такі періодичні варіації ми зареєстрували при спектroeлектро-фотометричних спостереженнях планетних атмосфер з підрахунком фотонів в діапазоні спектра $390\text{--}420\text{ нм}$.

Всі отримані значення періодів, можна умовно розбити на дві групи. До першої ми віднесли значення періодів $T=104, 130$ і 208 хвилин, які мають вірогідність $>90\%$ і природа цих періодичностей закладена в зміні прозорості земної атмосфери. До другої групи періодичностей ми віднесли ті із них, які присутні тільки для Юпітера ($T=103$ і 142 хвилини) і для Сатурна ($T=137$ і 179 хвилин); причому, їх вірогідність перевищує 95% . Найімовірніше, їх можна віднести до власних коливань планет [4], оскільки одержані значення періодів практично співпадають з теоретично вирахованими величинами.

1. Видьмаченко А.П. Фотометрические особенности распределения яркости вдоль экваториальной области Сатурна в ультрафиолете. // Астрон. циркуляр. – 1982. – №1227. – С.1–3.
2. Видьмаченко А.П. Проявление сезонных изменений в атмосфере Сатурна // Кинематика и физика неб. тел. – 1987. – Т.3, №6. – С.10–12.
3. Видьмаченко А.П. Планеты–гиганты: теоретические и наблюдательные аспекты // Астрон. вестник. – 1991. – Т.25, №3. – С.277–292.
4. Видьмаченко А.П. Изменение блеска небесных объектов при астрономических наблюдениях на горе Майданак // Кинемат. и физика неб. тел. – 1994. – Т.10, №5. – С.62–68.
5. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. – Л.: Гидрометеиздат. 1976. – 351 с.
6. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеиздат. 1981. – 319 с.
7. Дементьев М.С., Мороженко А.В. Атмосферные приливы на Нептуне? // Письма в Астрон. журнал. – 1989. – Т.15, №11. – С.1044–049.
8. Дементьев М.С., Мороженко А.В. О вертикальной неоднородности атмосфер Урана и Нептуна // Астрон. вестник. – 1990. – Т.24, №2. – С.127–133.
9. Ибрагимов К.Ю. Численное моделирование слоисто-образной облачности в атмосферах планет–гигантов. – Алма-Ата: Наука. 1990. – 240с.

10. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях: Пер. с англ. – М.: Мир. 1981. –598с.
11. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы – Л.: Гидрометеиздат. 1973. –260с.
12. Мирошниченко Л.И. Солнечная активность и Земля. – М.: Наука. 1981. –144с.
13. Морской Г.И. О конвекционной теории изменения давления // Метеорология и гидрология. –1967.–№1.–С.123–142.
14. Стеклов А.Ф., Видьмаченко А.П., Миняйло Н.Ф. Сезонное изменение в атмосфере Сатурна. // Письма в астроном. журнал. – 1983. – Т.9, №4. – С.250–252.
15. Тейфель В.Г. Оптические свойства атмосфер Юпитера и Сатурна: Дис... докт. физ.–мат. наук: 01.03.02. – Алма-Ата. 1980. –529с.
16. Dlugach Zh.M., Morozhenko A.V., Yanovitskiy E.G., Vid'machenko A.P. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main astronomical observatory of the Ukrainian Academy of sciences // Icarus. – 1983. – V. 54, №2. – P. 319–336.
17. Lockwood G. M. Secular brightness increases of Titan, Uranus and Neptune // Icarus. – 1977. – V.32, №4. – P.413–430.
18. Lockwood G. W. Analysis of photometric variations of Uranus and Neptune since 1953 // Icarus. – 1978. – V.35, №1. – P.79–92.
19. Lockwood G. W., Thompson D. T., Lutz B. L., and Howel E.S. The brightness, albedo, and temporal variability of Neptune // Astrophys. J. –1991. – V.368, №1. – P. 287–297.
20. Reese E.J. Jupiter: its Red Spot and other features in 1969–1970 // Icarus. – 1971. – V.14, № 3. – P.343–354.

Надійшла до редакції 11.05.99