

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.018>

УДК 524.4

О. С. Овсак¹, А. М. Карімов², П. Г. Лисенко²

¹Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143
E-mail: ovsak@mao.kiev.ua

²Астрофізичний інститут ім. В. Г. Фесенкова, АН Казахстану,
Алмати, Казахстан, 050020

Про висотну залежність об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолію в атмосфері Сатурна. II. Широтні пояси Північної півкулі

Для п'яти широтних поясів північної півкулі Сатурна визначено висотні залежності об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолію і побудовано ймовірну вертикальну структуру аерозольної складової у діапазоні атмосферного тиску 0.06...10 бар. Для цієї мети використано результати аналізу даних спектрофотометричних вимірювань у 2015 році широтних поясів 17N, 33N, 49N, 66N і 80N планети-гіганта у смугах поглинання метану на 727 нм і 619 нм з нашої попередньої роботи. У дослідженому діапазоні висотних рівнів атмосфери Сатурна виявлено повсюдну наявність аерозолів, без ознак значних чисто газових прошарків. Найбільші значення об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолію $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ отримано для середньоширотного поясу 49N, а найменші — 10^{-8} см^{-1} — для приполярного поясу 80N. У дослідженому висотному діапазоні атмосфери виявлено чотири ділянки аерозольних згущень, у межах яких об'ємний коефіцієнт розсіяння аерозолію досягає максимальних значень. Наявність часток найпотужнішого в атмосфері Сатурна аерозольного шару виявлено на висотному рівні з тиском 0.06 бар. Із зануренням у глибину атмосфери об'ємний коефіцієнт розсіювання аерозолію збільшується до максимальних значень. Тут у всіх досліджених широтних поясах, крім 80N, формуються два найвищі згущення, у яких максимуми об'ємного коефіцієнта розсіяння атмосферного аерозолію розміщені біля висотних рівнів зі значеннями тиску 0.26 бар і 0.45 бар. Ці згущення розділені по висоті прошарком менш щільного аерозолію. При подальшому зануренні в атмосферу у діапазоні тиску 0.45...2 бар об'ємний коефіцієнт роз-

сіяння аерозолію значно зменшується. На цій висотній ділянці атмосфери в усіх широтних поясах, крім 80N, виявлено третє за порядком згущення аерозолію, де максимуми об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолію розміщені біля рівня з тиском 1 бар. Ще глибше, в діапазоні атмосферного тиску 2...6 бар, виявлено четверте за порядком, значно розтягнуте по висоті аерозольне згущення. Воно складається з верхньої та нижньої частин, в яких максимуми об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолію розташовуються доволі рівнів з тиском 2.7 бар й 4.4 бар відповідно. При обчисленнях ми використовували модельні параметри аерозольних часток: ефективний радіус 1.4 мкм і дисперсія 0.07 для функції модифікованого гамма-розподілу часток по розмірах та дійсна частина комплексного показника заломлення 1.44. Ці модельні характеристики аерозолів ймовірно є близькими до усереднених значень параметрів реальних часток у дослідженій висотній частині атмосфери Сатурна в широтному поясі 66N, а також для діапазону тиску 0.06...1.5 бар атмосфери у поясі 33N. Водночас виявлено ознаки ймовірних значних відмінностей модельних та реальних параметрів аерозольних часток на усіх досліджених висотних рівнях атмосфери у широтних поясах 17N і 49N.

Ключові слова: Сатурн, атмосфера, аерозоль, вертикальна структура, широтні пояси.

ВСТУП

Виражений розподіл по диску Сатурна широтних ділянок з різними колірними відтінками, контрастністю і яскравістю вказує на наявність різноманітних фізико-хімічних процесів формування аерозолів в атмосфері цієї планети. Також це відображає складну динамічну структуру глобальних і локальних переміщень гігантських атмосферних мас. Для вивчення *in situ* глибинної структури атмосфери Сатурна розробляються спускові зондувальні апарати майбутніх космічних місій [1]. Але поки що дослідження атмосфери Сатурна ґрунтуються на дистанційних вимірюваннях, виконуваних за допомогою наземних телескопів і навколопланетних орбітальних апаратів, наприклад CASSINI. Інтерпретація дистанційних вимірювань ґрунтується значною мірою на модельних розрахунках, в яких використовується теорія переносу випромінювання. У значній частині публікацій про Сатурн міститься інформація про відбивні та поляризаційні властивості окремих ділянок або областей на диску планети-гіганта, а також аналізуються зміни цих характеристик при зміні умов їхньої освітленості Сонцем і затінення системою кілець протягом 30-річного періоду обертання Сатурна навколо Сонця [3, 5, 6, 12, 14, 15, 21, 22, 24, 29—32, 34]. При цьому в роботах, де приділено увагу саме зональним відмінностям на диску Сатурна, відсутні або ж мінімально представлені

конкретні значення параметрів вертикальної структури і розсіювальні характеристики атмосферних аерозольних шарів, особливо розташованих глибоко в атмосфері. Це пояснюється неоднозначністю розв'язання цієї складної оберненої задачі. Тому виділимо оглядову роботу [8], в якій узагальнено сучасні уявлення про планету-гіганта, сформовані на основі результатів аналізу даних вимірювань, виконаних космічним апаратом CASSINI за півперіод повного орбітального обороту Сатурна навколо Сонця. Зокрема, тут приділено увагу зональним відмінностям фізичних характеристик та ймовірній вертикальній структурі аерозольних шарів у верхній частині атмосфери. Також в цій роботі наведено можливі значення параметрів функції розподілу аерозольних часток по розмірах і описано ймовірну вертикальну структуру стратосферного серпанку й тропосферного туману. Зроблено припущення про висотне розташування та можливу природу часток аерозольних шарів у глибоких шарах тропосфери планети-гіганта.

В одному з перших досліджень зональних відмінностей розсіювальних властивостей аерозолів у атмосфері Сатурна [28] за даними абсолютної фотоелектричної спектрометрії диску Сатурна в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 600 \dots 900$ нм було визначено усереднене значення об'ємного коефіцієнта розсіювання аерозолу $\sigma_a < 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ і приблизний діапазон 1.3...1.8 відношення значень цього коефіцієнта близько екватора і у приполярних областях планети-гіганта. В роботі [7] отримано значення об'ємного коефіцієнта розсіювання в атмосфері Сатурна $\sigma_0 = 2.4 \cdot 10^{-6}$ в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 300 \dots 600$ нм.

Детальне вивчення вертикальної структури верхньої атмосфери і характеристик аерозольної складової в широтних поясах диска Сатурна виконано в роботі [33]. Тут у моделі двошарової атмосфери проаналізовано дані спектральних вимірювань відбивної здатності низки широтних поясів в обох півкулях Сатурна. Для цих поясів на довжині хвилі $\lambda = 725$ нм отримано оцінки розсіювальної (σ_s) і поглинальної (σ_0) складових оптичної товщини надхмарного чисто газового шару; об'ємний коефіцієнт розсіювання σ_0 , об'ємна концентрація аерозолу N і уявна частина комплексного показника заломлення аерозольних часток n_i для нижнього півнескінченного однорідного газово-аерозольного шару. Згідно з висновками [33] у верхній частині атмосфери більшості широтних поясів Сатурна наявний аерозоль однієї природи з близьким середнім розміром часток, а спостережувані зональні відмінності фотометричних характеристик визначаються лише змінами значень величин σ_s і N . Винятком є пояси 10 і 40 північної півкулі планети-гіганта, а також 33 її південної півкулі, які додатково розрізняються ще й значеннями величини n_i . Відзначимо, що можливий збіг параметрів аерозольних часток на всіх широтах диску Сатурна розглядався в роботі [21].

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ АНАЛІЗУ І МЕТА РОБОТИ

У нашій попередній роботі [19] з використанням методу ефективно-оптичної глибини [16, 35], а також алгоритмів аналізу [17] і спеціальних комп'ютерних програмних кодів [20], виконано обробку даних вимірювань у квітні 2015 року відбивної здатності широтних поясів 17, 33, 49, 66 і 80 північної півкулі Сатурна (далі по тексту 17N, 33N, 49N, 66N і 80N) у смугах поглинання метану з центрами на довжинах хвиль 727 і 619 нм. Для кожної спектральної точки вихідних даних розрахунки виконано у моделі півнескінченного однорідного газозо-аерозольного середовища, що містить полідисперсний ансамбль сферичних однорідних аерозольних часток з функцією модифікованого гамма-розподілу часток по розмірах. При розрахунках використовувались такі значення модельних параметрів аерозольних часток: ефективний радіус $r_{\text{ef}} = 1.4$ мкм, дисперсія $v_{\text{ef}} = 0.07$, дійсна частина показника заломлення $n_r = 1.44$, які були отримані в роботі [4] і підтверджені результатами робіт [6, 17, 25]. Для зазначених широтних поясів Сатурна в роботі [19] розраховано залежності $a_{\text{ef}}^a(P)$ аерозольної розсіювальної складової ефективно-оптичної товщини атмосфери від тиску, а також величини відносної кількості аерозольних часток $a_{\text{ef}}^a(P) / g_{\text{ef}}^g(P)$, де $g_{\text{ef}}^g(P)$ — газова розсіювальна складова ефективно-оптичної глибини атмосфери. В результаті у вивчених широтних поясах виявлено постійну наявність аерозолів у всьому дослідженому діапазоні висотних рівнів атмосфери. Найбільші значення величини $a_{\text{ef}}^a(P)$ отримано для середньоширотного поясу 49N, а у приполярній області 80N, навпаки, отримано їхні найменші значення.

Підкреслимо, що залежності $a_{\text{ef}}^a(P)$ та $a_{\text{ef}}^a(P) / g_{\text{ef}}^g(P)$ є характеристиками, усередненими на промені зору. Вони відображають якісну картину зміни розсіювальних властивостей у частині вертикального стовпа атмосфери від її умовного зовнішнього краю до висотного рівня атмосфери з тиском P . Також відзначимо, що висотна залежність $a_{\text{ef}}^a(P) / g_{\text{ef}}^g(P)$ визначається спільним впливом розсіювальних властивостей обох — і аерозольного, і газового компонентів атмосфери.

Розсіювальні властивості аерозольного компонента в одиничному об'ємі газозо-аерозольного середовища характеризує об'ємний коефіцієнт розсіювання аерозолію a_a . Його залежність від тиску у планетній атмосфері відображає зміни з висотою розсіювальних властивостей саме аерозольної складової. Ці якості залежності $a_a(P)$ дозволяють визначити наявність і висотне розташування аерозольних шарів в досліджуваній атмосфері планети-гіганта, а також оцінити їхню протяжність і співвідношення об'ємних густин. Тому метою даної роботи було:

а) розрахувати залежність коефіцієнта a_a від тиску в атмосфері широтних поясів 17N, 33N, 49N, 66N і 80N Сатурна, використовуючи результати роботи [19];

б) зіставити отримані для різних поясів залежності між собою і з усередненою по диску планети-гіганта залежністю з [18], а також з результатами робіт [28, 33];

в) виконати порівняння отриманих результатів з іншими сучасними дослідженнями вертикальної структури аерозольної складової в атмосфері Сатурна.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ

Застосовану в даній роботі методику розрахунку залежності від тиску об'ємного коефіцієнта розсіювання аерозолі $\alpha_a(P)$ в атмосфері планети-гіганта (далі по тексту «методика») ми вже застосовували для аналізу інтегральних дисків Юпітера і Сатурна, а також для дослідження характеристик аерозольної складової в широтних поясах Юпітера. Тому ми лише коротко нагадаємо основні положення цієї методики, пропонуючи читачеві ознайомитися з особливостями її застосування з наших публікацій у цьому ж журналі за 2015 і 2016 рр. та роботі [18]. Однак для коректного виконання аналізу саме широтних поясів диску Сатурна необхідні додаткові розрахунки, особливості яких наведено нижче.

Об'ємний коефіцієнт розсіювання аерозолі у планетній атмосфері визначається як

$$\alpha_a = \frac{\alpha_{\text{еф}}^a}{h}, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{еф}}^a$ — зміна аерозольної розсіювальної складової ефективної оптичної глибини атмосфери зі зміною висотного рівня h . З урахуванням адіабатичних властивостей атмосфери Сатурна величина h дорівнює

$$h = \ln(P_{i+1} / P_i) H_g(P), \quad (2)$$

де P_{i+1} і P_i — значення тиску на $(i+1)$ -му та на i -му окремих висотних рівнях атмосфери, $H_g(P)$ — газова шкала висот:

$$H_g(P) = \frac{RT(P)}{g}, \quad (3)$$

де R — універсальна газова стала, $T(P)$ — температура атмосферного шару зі значенням тиску $P = (P_{i+1} + P_i)/2$, m — середня молекулярна маса планетної атмосфери, визначена її хімічним складом, g — прискорення вільного падіння.

Особливістю даної роботи, яка відрізняє її від наших попередніх досліджень, в яких також визначалася висотна залежність об'ємного коефіцієнта розсіювання атмосферного аерозолі, є необхідність врахування відмінностей фізичних характеристик у різних широтних поясів Сатурна.

Зміна прискорення вільного падіння. Форма Сатурна відрізняється від сферичної, і радіус планети біля полюсів є значно меншим, ніж на екваторі. Зазначені фактори призводять до різниці значень прискорення вільного падіння в широтних поясах диску Сатурна. Тому у виразі (3) ми використовували розраховані для висотного рівня з тиском 1.0 бар «широтні» значення $g(\varphi_{pc})$. Визначення цих величин виконано згідно з методикою [15]:

$$g(\varphi_{pc}) = \frac{GM}{R_e^2(1 - a \sin^2 \varphi_{pc})^2} - \frac{4}{T_{rot}^2} R_e (1 - a \sin^2 \varphi_{pc}) \cos R_e^2 \varphi_{pc}, \quad (4)$$

де φ_{pc} — планетоцентричний кут розглянутого широтного поясу на диску планети; $a = (R_e - R_p)/R_e$ — параметр еліптичності форми планети, R_e, R_p, T_{rot}, M — її екваторіальний і полярний радіуси, період обертання і маса відповідно; G — всесвітня гравітаційна стала.

Відмінності висотних залежностей значень температури від глибини в атмосфері. Для врахування зональних відмінностей залежності температури атмосферних шарів від тиску $T(P)$ ми використали результати аналізу даних спостережень Сатурна в 2008—2016 роках космічним апаратом CASSINI [9], а також дані з роботи [13].

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ОБЧИСЛЕНЬ

1. Пари значень величин $P; \alpha_{\text{эф}}(P)$ для кожного досліджуваного широтного поясу Сатурна, визначені в роботі [19] у довго- та короткохвильовому крилі смуг поглинання метану на 727 і 619 нм, об'єднувалися у спільний масив та сортувалися з послідовним зростанням значень тиску.

2. Методом ковзного усереднення при підбраному мінімальному значенні «вікна» з найближчих точок, з отриманого у п. 1 масиву даних формувалася усереднений масив значень, за яким на наступному кроці розраховувався інтерполяційний масив пар $P_{int}; \alpha_{\text{эф}}^{int}(P_{int})$, вже з постійним кроком зміни тиску P_{int} .

3. Згідно з виразом (4) для досліджуваних широтних поясів диску Сатурна розраховувалися значення прискорення вільного падіння $g(\varphi_{pc})$ (див. рис. 1).

4. За даними робіт [9, 13] шляхом усереднення і доповнення формувалися залежності температури атмосферних шарів від тиску $T(P_{int})$ для досліджуваних широтних поясів планети-гіганта, де P_{int} є значеннями, отриманими у п. 2. Для висотних рівнів з тиском, що перевищує 9.0 бар, як і в роботі [3], виконувалось апроксимування значень температури, з урахуванням адіабатичних властивостей атмосфери планети-гіганта. Відзначимо, що у дослідженому нами діапазоні значень тиску в атмосфері Сатурна широтні відмінності між залежностями температури атмосферних шарів від їхньої глибини виявилися незначними (див. рис. 2).

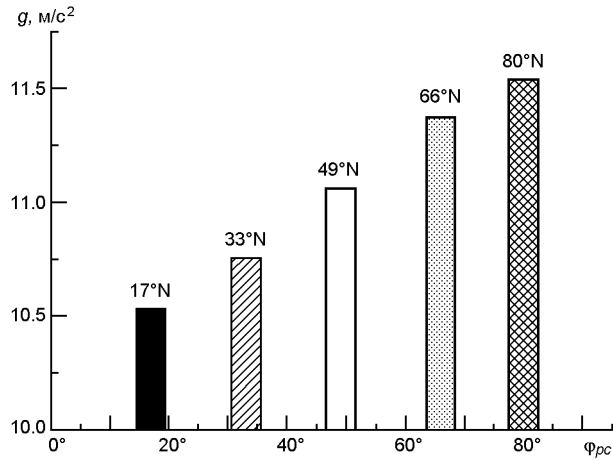


Рис. 1. Значення прискорення вільного падіння в широтних поясах 17N, 33N, 49N, 66N та 80N Сатурна

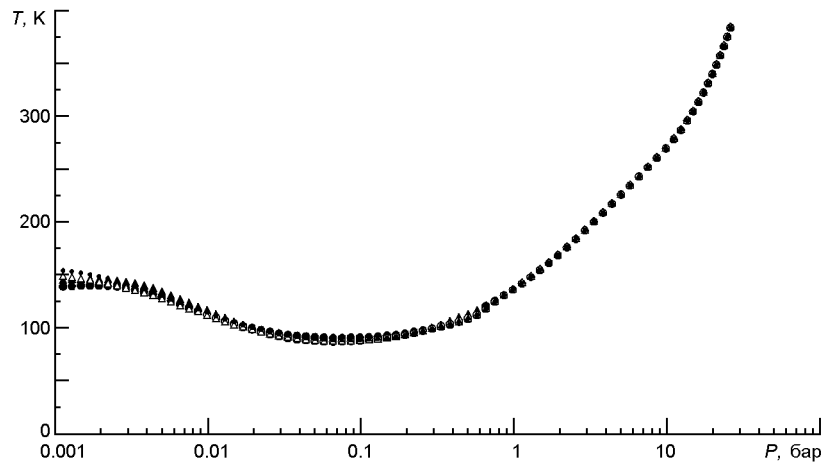


Рис. 2. Залежність температури атмосферних шарів від тиску в широтних поясах 17N (темні кружки), 33N (темні трикутники), 49N (кружки), 66N (світлі трикутники) і 80N (точки) Сатурна, розрахована за даними робіт [9, 13]

5. Для кожного широтного поясу з використанням отриманих у пп. 2...4 масивів пар значень P_{int} ; $\frac{a^{int}}{e\phi}(P_{int})$, величини $g(\varphi_{pc})$ й залежності $T(P_{int})$, за виразами (1)–(3) обчислювалися залежності від тиску об'ємного коефіцієнта розсіювання аерозолі $a(P)$.

6. Після виконання пунктів 1...5 виконувався аналіз отриманих залежностей коефіцієнта $a(P)$ у широтних поясах та їхнє порівняння з висновками робіт [18, 33], а також з результатами аналізу даних багаторічних вимірювань Сатурна космічним апаратом CASSINI [23, 26, 27].

7. Для розрахунків використано спеціальні комп'ютерні програмні коди, розроблені для реалізації чисельних рішень задач теорії пере-

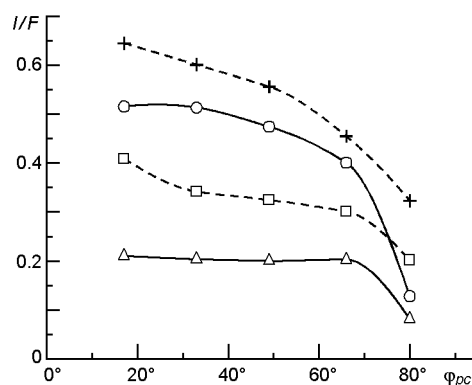
носу випромінювання, а також для обробки і модельного аналізу даних дистанційних спектрофотометричних вимірювань планет-гігантів методами і алгоритмами, створеними в ГАО НАН України.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

У нашій попередній роботі [19] вказувалося на малі значення відбивної здатності широтного поясу 80N Сатурна в обох досліджених смугах поглинання метану. При аналізі цих даних вимірювань методом ефективної оптичної глибини було отримано вкрай малі спектральні значення альbedo однократного розсіяння модельного газозаерозольного середовища у всій смузі на 619 нм, а також за межами околиці центра смуги на 727 нм. Також, на відміну від інших широтних поясів, дані вимірювань для поясу 80N мають вищу дисперсію, а саме 8.0 % у смузі на 727 нм і 3.3 % у смузі на 619 нм. Зазначені фактори не дали можливості виконати розрахунки коефіцієнта відбивання модельного середовища для поясу 80N за межами околиці центра смуги на 727 нм і при обробці всієї смуги на 619 нм. Крім того, ми порівняли абсолютні значення відбивної здатності I/F у центрах досліджуваних смуг поглинання метану з результатами вимірювань I/F Сатурна в 2012—2016 роках з роботи [14]. В результаті виявлено значне розходження значень I/F в центрі смуги на 619 нм для широтного поясу 80N (див. рис. 3). Через перераховані причини характеристики вертикальної структури атмосфери Сатурна у широтному поясі 80N ми дослідили лише в околиці центра смуги на 727 нм.

На рис. 4а...4д показано залежності коефіцієнта $a(P)$ у смугах поглинання метану на 727 нм і 619 нм, розраховані для широтних поясів 17N, 33N, 49N, 66N і 80N Сатурна. На рис. 4е показано об'єднання залежностей $a(P)$ у смугах поглинання метану на 887, 864, 842, 727 і 619 нм, визначені в роботі [18] за даними вимірювань інтегрального диску Сатурна [11]. Як бачимо, залежність коефіцієнта $a(P)$ для широтних поясів Сатурна в загальному вигляді повторює хід залежності

Рис. 3. Значення абсолютної відбивної здатності I/F широтних поясів північної півкулі Сатурна в центрах смуг поглинання метану: кружки і трикутники — дані [19] для $\lambda = 619$ і 727 нм відповідно; хрестики і квадратики — дані [14] для $\lambda = 619$ і 727 нм відповідно



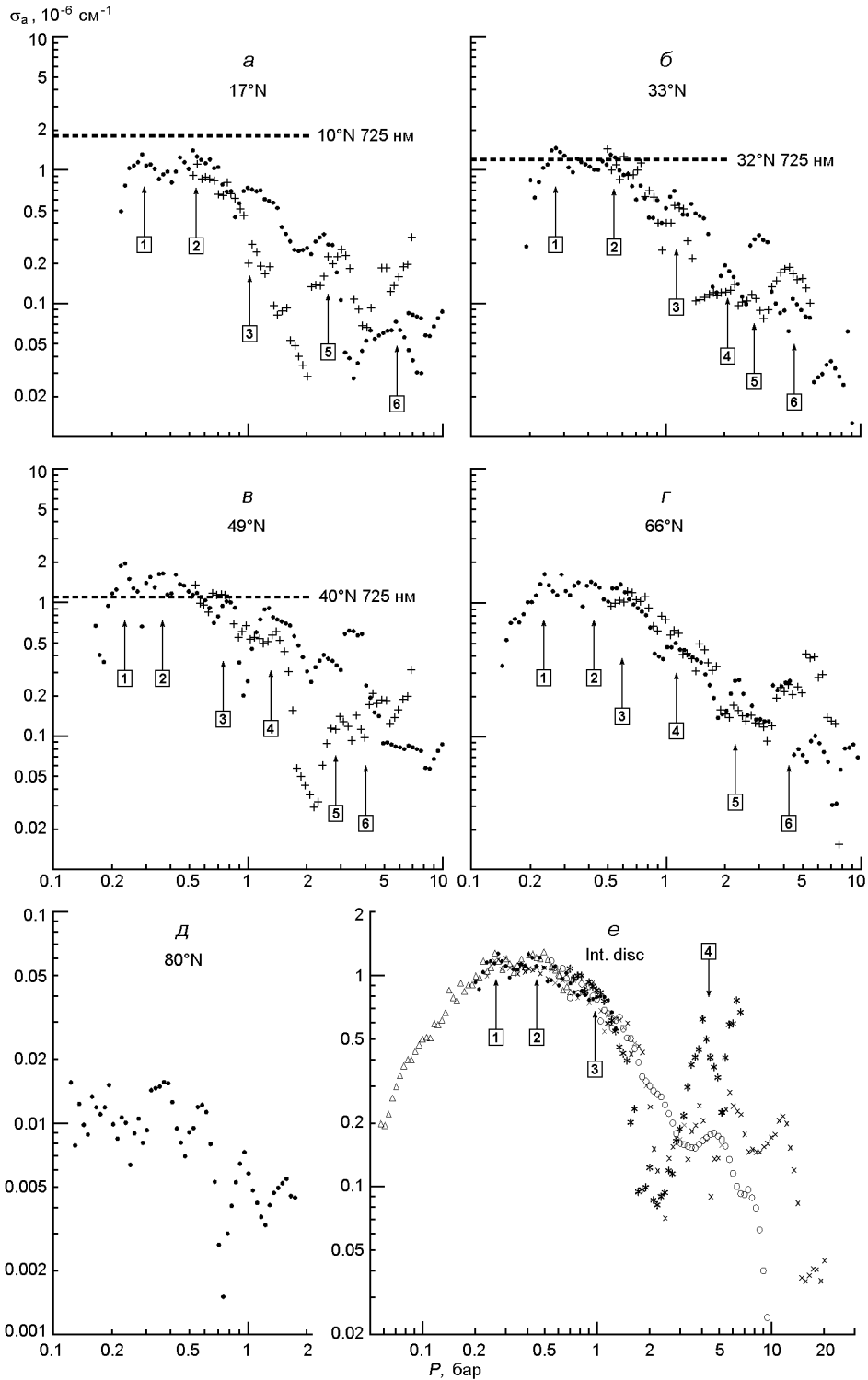


Рис. 4. Спектральні залежності об'ємного коефіцієнта розсіювання аерозолу від тиску: *a...д* — для широтних поясів північної півкулі Сатурна 17N , 33N , 49N , 66N , 80N (хрестики — для $\lambda = 619 \text{ nm}$, точки — для $\lambda = 727 \text{ nm}$); *e* — об'єднана залежність для інтегрального диску Сатурна [18] (зірочки — для $\lambda = 619 \text{ nm}$, хрестики — $\lambda = 727 \text{ nm}$, кружки — $\lambda = 842 \text{ nm}$, точки — $\lambda = 864 \text{ nm}$, трикутники — $\lambda = 887 \text{ nm}$)

$\alpha_a(P)$ для інтегрального диску планети. Однак у цієї залежності є відмінності як між широтними поясами, так і між поясами та усередненою по диску залежністю $\alpha_a(P)$. Аналогічно до висновків роботи [18], де розраховувалась вертикальна структура атмосфери для інтегрального диску Сатурна, можна констатувати, що у широтних поясах планети-гіганта аерозоль також поширений на всіх досліджених висотних рівнях, без ознак наявності там значних чисто газових шарків.

Відзначимо, що серед вивчених широтних поясів Сатурна найбільші значення коефіцієнта α_a отримано для поясу 49N, причому на всіх досліджених висотних рівнях (див. рис. 4в). І навпаки, найменші величини α_a отримано для приполярного поясу 80N (див. рис. 4д), де в діапазоні тиску 0.13...2.0 бар $\alpha_a \approx 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, тобто значно менше, ніж в інших широтних поясах Сатурна. Цей результат відповідає даним [8] про оптично товстий шар тропосферного туману у всіх широтних поясах диску планети-гіганта, для якого у приполярних областях виявлено значне збільшення прозорості. Також і в роботі [26] для південної півкулі Сатурна відмічено значне опускання висотного рівня формування тропосферного туману від 600 ± 200 мбар на помірній широті 53S до 1000 ± 300 мбар у приполярній області 90S, що зменшує його кількість на промені зору від зовнішнього краю атмосфери. В інших широтних поясах залежність $\alpha_a(P)$ на всіх висотних рівнях приблизно однакова за ходом та абсолютними значеннями, за винятком окремих ділянок в діапазоні атмосферного тиску 0.6...8.0 бар, які мають виражені широтні відмінності.

Слід зазначити відсутність помітних спектральних відмінностей для залежностей $\alpha_a(P)$, отриманих від верхніх рівнів атмосфери Сатурна до висотного рівня з тиском близько 1.5 бар в широтному поясі 33N і аж до рівня близько 4.5 бар у поясі 66N (див. рис. 4б, 4з). Це може вказувати на збіг значень параметрів реальних аерозольних часток з використаними нами при розрахунках модельними значеннями на відповідних висотних рівнях атмосфери. Натомість розраховані у смугах поглинання метану на 727 нм і 619 нм залежності $\alpha_a(P)$ в широтних поясах 17N і 49N демонструють значні відмінності (див. рис. 4а, 4в). Можливість зміни радіуса і/або уявної частини коефіцієнта заломлення аерозольних часток у глибоких шарах атмосфери Сатурна ми досліджували раніше (див. публікацію у № 1 цього ж журналу за 2019 р.). Ґрунтуючись на результатах цієї роботи, можна припустити, що зазначені спектральні розбіжності залежностей $\alpha_a(P)$ відображають відмінності параметрів реальних аерозольних часток в поясах 17N і 49N від прийнятих нами при розрахунках модельних значень. При цьому в обох широтних поясах відмічені відмінності параметрів часток можливі починаючи вже з рівня близько 0.5 бар, на якому формується центр смуги поглинання метану на 619 нм, а потім вони збільшуються із зануренням у глибину планетної атмосфери.

Відзначимо, що отримані в даній роботі абсолютні значення коефіцієнта α_a в широтних поясах, крім 80N, відповідають оцінкам цієї величини в роботі [28]. Крім того, на рис. 4а...4в штриховими лініями нанесено значення об'ємного коефіцієнта розсіювання атмосферного середовища α_0 на довжині хвилі 725 нм, отримані в роботі [33]. Через відносно малий вклад від розсіювання сонячного світла на газовій складовій атмосфери Сатурна, значення коефіцієнтів α_a і α_0 практично збігаються. Рис. 4б показує, що розрахована для широтного поясу 33N залежність $\alpha_a(P)$ у верхній частині атмосфери Сатурна до висотного рівня з тиском біля 0.7 бар збігається з отриманим у [33] значенням коефіцієнта α_0 для поясу 32N. У широтних поясах 17N і 49N залежність $\alpha_a(P)$ на тих же висотних рівнях зміщена вгору і вниз від ліній значень коефіцієнта α_0 у поясах 10N і 40N відповідно, що, ймовірно, пояснюється значною різницею широтного положення порівнюваних поясів (див. рис. 4а...4в).

На залежності $\alpha_a(P)$ в усіх досліджених широтних поясах, а також для інтегрального диску Сатурна, є ділянки зигзагоподібної зміни значень коефіцієнта α_a при монотонному зростанні тиску (див. рис. 4). Висотні рівні з максимальними значеннями коефіцієнта α_a в цих ділянках позначено стрілками і послідовно пронумеровані від зовнішнього краю в глибину атмосфери. Ми вважаємо, що на таких ділянках атмосфери змінюється об'ємна концентрація аерозольних часток, оскільки з монотонним зростанням значень атмосферного тиску можливість послідовного зменшення, а потім збільшення розмірів часток однієї природи суперечить фізиці процесу висотної стратифікації часток аерозолію. Висотна структура і розташування визначених таким чином ділянок згущення аерозолів в атмосфері широтних поясів виявилися близькими до аналогічних характеристик, отриманих для інтегрального диску планети-гіганта [18] (див. рис. 4е).

У таблиці наведено значення максимумів коефіцієнта α_a і відповідні їм значення тиску P , розташовані у послідовно пронумерованих чотирьох аерозольних згущеннях (Clusters) в атмосфері широтних поясів Сатурна. Пари значень (P ; $\alpha_a(P)$) — у згущеннях з порядковими

Максимуми об'ємного коефіцієнта розсіювання аерозолію та відповідні значення тиску у згущеннях атмосферного аерозолію у широтних поясах північної півкулі та для інтегрального диску Сатурна

Clusters	$\alpha_a, 10^{-6} \text{ cm}^{-1}; P, \text{ бар}$				
	Інтегральний диск	17N	33N	49N	66N
1	1.29; 0.27	1.29; 0.286	1.46; 0.273	1.96; 0.23	1.6; 0.24
2	1.3; 0.42	1.3; 0.535	1.4; 0.512	1.7; 0.37	1.4/1.3; 0.41/0.62
3	0.8; 1.0	0.51; 1.02	0.92; 0.94	1.1/0.79; 0.77/1.35	0.56; 1.11
4a	—	0.29; 2.73	0.16/0.23; 2.07/2.87	0.28; 2.7	0.22; 2.3
4b	0.62; 4.0	0.14; 5.45	0.15; 4.3	0.39; 4.1	0.26; 4.2

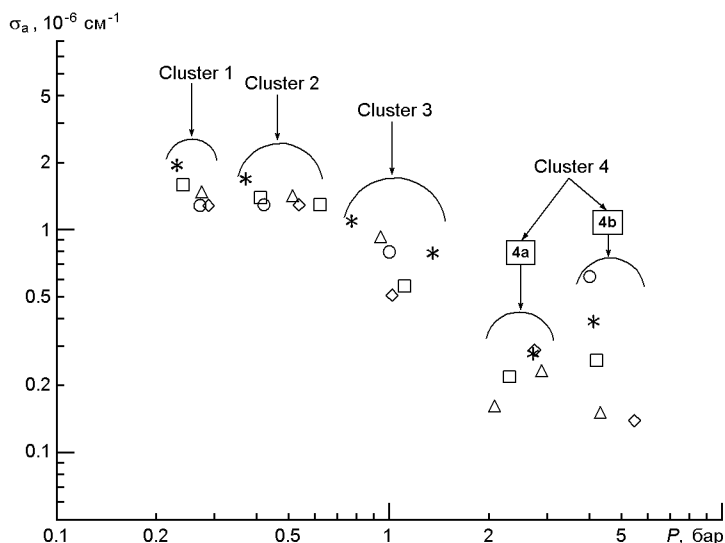


Рис. 5. Розташування максимумів коефіцієнта σ_a і ймовірна вертикальна структура згущень аерозольних шарів у широтних поясах 17N (ромбики), 33N (трикутники), 49N (зірочки), 66N (квадратики) і для інтегрального диску Сатурна (кружки)

номери 1 і 2 в усіх вивчених широтних поясах, а також у згущенні 3 поясу 17N, визначені лише у смузі поглинання на 727 нм, через відсутність цих особливостей у смузі на 619 нм. Через вже зазначені вище значні спектральні відмінності залежностей $\sigma_a(P)$, розрахованих для поясів 17N і 49N, а також появи таких відмінностей від рівня 1.5 бар і глибше у поясі 33N, виявилось неможливим однозначно визначити висотне положення максимумів величини σ_a в аерозольних згущеннях з порядковим номером вище за 2. Тому наведені в таблиці значення $\sigma_a(P)$ та P в аерозольних згущеннях з порядковим номером 3 і вище є оціночними. Ми отримали їх методом арифметичного усереднення відповідних величин, визначених окремо в смугах на 727 нм і 619 нм для кожної пари значень $(P; \sigma_a)$ у аерозольних згущеннях з порядковим номером 3 і вище. У таблиці також наведено пари значень $(P; \sigma_a)$, визначені для інтегрального диску Сатурна в роботі [18].

На рис. 5 представлено ймовірну вертикальну структуру згущень аерозольних шарів у широтних поясах Сатурна, сформовану на основі результатів даної роботи. Як бачимо, ця структура містить чотири рознесені по висоті аерозольні згущення, позначені як 'cluster 1', 'cluster 2', 'cluster 3' і 'cluster 4'.

— Для вивчених широтних поясів Сатурна, крім 80N, найбільші значення коефіцієнта розсіювання атмосферним аерозолем отримано на двох висотних ділянках. Це ділянка 'cluster 1', на якій максимуми значень коефіцієнта σ_a лежать у діапазоні тиску 230...290 мбар, та ділянка 'cluster 2' з розташуванням максимумів у діапазоні 370...620 мбар.

При цьому на висотній ділянці 'cluster 2' широтного поясу 66N виявлено два максимуми значень коефіцієнта α .

— У діапазоні значень атмосферного тиску 0.9...1.4 бар виявлено проміжне аерозольне згущення 'cluster 3', у якому у досліджених широтних поясах Сатурна поблизу рівня з тиском 1 бар зареєстровано по одному максимуму коефіцієнта α . Тільки у поясі 49N це згущення містить два максимуми коефіцієнта α .

— Висотне розташування максимумів коефіцієнта α у глибоких шарах атмосфери в усіх досліджених широтних поясах планети-гіганта визначає розтягнуту по висоті у діапазоні значень тиску 2...6 бар потужну хмарну систему 'cluster 4', яка в широтних поясах 17N, 33N, 49N і 66N складається з двох частин, 4a і 4b. У частині 4a поясу 33N, біля висотних рівнів 2.1 бар і 2.9 бар, виявлено два максимуми коефіцієнта α . Частина 4b в усіх широтних поясах, а також для інтегрального диску планети-гіганта має по одному максимуму коефіцієнта α . У цій висотній ділянці атмосфери в усіх широтних поясах максимуми α розташовані біля одного висотного рівня з тиском 4.2 бар. Винятком тут є лише пояс 17N, у якому максимум α в частині 4b виявлено на глибшому рівні — з тиском приблизно 5.5 бар. Додамо, що в частині 4b спостерігається значна різниця абсолютних значень максимумів коефіцієнта α (див. таблицю).

Наведена на рис. 5 вертикальна структура аерозольної складової атмосфери в широтних поясах Сатурна, яка містить чотири рознесені по висоті згущення, виявилася близькою до результатів інших сучасних досліджень. Зокрема, для моделі висотної структури атмосфери північної приполярної області Сатурна згущення 'cluster 1' відповідає рівню утворення тропосферного серпанку, сформованого частками дифосфину, а згущення 'cluster 2' — висотному рівню шару максимальної щільності аміачного туману [27]. Згідно з узагальненими даними в роботі [8], на висотному інтервалі згущення 'cluster 1' і 'cluster 2' формується тропосферний туман, щільність і висота якого змінюються з широтою і виявляють помітні сезонні варіації. Такої ж думки дотримуються автори моделі вертикальної структури атмосфери у широтних поясах південної півкулі Сатурна в роботі [23]. Про тропосферний туман, який формується на рівні 0.6 бар у середніх широтах Сатурна, що відповідає рівню 'cluster 2' і опускається до рівня 1 бар у приполярній області, йдеться в роботі [26]. Згущення 'cluster 3' близьке до розташованого на висотному рівні з тиском 1.5 бар аерозольного шару, ймовірно сформованого частками замерзлого аміаку з добавками поки що невідомих компонентів [8, 27]. Згущення 'cluster 4' близьке до висотних рівнів з діапазоном тиску 2...5 бар, на яких можливе формування аерозольного шару, що містить суміш часток гідросульфиду амонію та замороженої води [8, 27].

ВИСНОВКИ

Ймовірну висотну структуру аерозольної складової в атмосфері Сатурна визначено в цій роботі за даними спектрофотометричних вимірювань широтних поясів північної півкулі планети-гіганта, отриманих на 60-см телескопі Астрофізичного інституту ім. В. Г. Фесенкова (Алмати, Республіка Казахстан). Для аналізу цих даних вимірювань був застосований метод ефективної оптичної глибини, а також ряд інших методик і алгоритмів, розроблених в Головній астрономічній обсерваторії НАН України. Вертикальна структура й висотне розташування областей з максимальним згущенням аерозолів у атмосфері широтних поясів у загальному вигляді відповідають параметрам, розрахованим за даними вимірювань інтегрального диску Сатурна. У досліджених широтних поясах чисельні та якісні відмінності вертикальної структури аерозольної складової виявляються в діапазоні атмосферного тиску 0.6...8.0 бар. Наші результати підтверджують і доповнюють оцінки характеристик атмосферної аерозольної складової, отримані іншими дослідниками за даними вимірювань Сатурна за допомогою набагато потужнішого і дорожчого обладнання. Таким чином, матеріали даної роботи демонструють можливість отримання результатів сучасного рівня при виконанні вимірювань за допомогою невеликих наземних телескопів і застосуванні спеціальних методів аналізу спектрофотометричних даних планет-гігантів.

Автори вдячні О. В. Мороженку за консультації та рекомендації з обробки використаних в роботі даних вимірювань й методики виконання їхнього аналізу.

REFERENCES

1. Atkinson D. H., Mousis O., Spilker T. R., Venkatapathy E., Poncy J., Coustenis A., Reh K. R. (2015) Hera — an ESA M-class Saturn Entry Probe Mission Proposal. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, abstract ID P11B-2086.
2. Atreya S. K., Romani P. N. (1985) Photochemistry and clusters of Jupiter, Saturn, and Uranus. *Recent Advances in Planetary Meteorology*. Ed. G. E. Hunt, 17—68. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
3. Atreya S. K., Wonga M. H., Owen T. C., Mahaffy P. R., Niemann H. B., de Pater I., Drossart P., Encrenaz Th. (1999) A comparison of the atmospheres of Jupiter and Saturn: deep atmospheric composition, cluster structure, vertical mixing, and origin. *Planet. Space Sci.* 47. 1243—1262.
4. Bugaenko O. I., Morozhenko A. V. (1981) Physical characteristics of the upper layers of Saturn's atmosphere. *Adv. Space Res.* 1. 183—186.
5. Chanover N. J., Bjoraker G. L., Glenar D. A., Hewagama T., Baines K. H. (2005) Latitudinal variations of Saturn's near-infrared spectrum. *Proc. Amer. Geophys. Union 2005 Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec. 5—9*. Abstract no. P11C-0135.
6. Courtin R., Gautier D., Marten A., BeÂzard B., Hanel R. (1984) The composition of Saturn's atmosphere at Northern temperate latitudes from Voyager IRIS spectra:

- NH₃, PH₃, C₂H₂, C₂H₆, CH₃D, CH₄, and the Saturnian D/H ratio. *Astrophys. J.* 287. 899—916.
7. Dlugach J. M., Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P., Yanovitskij E. G. (1983) Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main Astronomical Observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. *Icarus*. 54. 319—336.
 8. Fletcher L. N., Sromovsky L., Hue V., Moses J. I., Guerlet S., West R. A., Koskien T. (2020) *Saturn's Seasonal Atmosphere at Northern Summer Solstice*. arXiv: 2012.09288v1 [astro-ph.EP] 16 Dec 20.
 9. Fletcher L. N., Guerlet S., Orton G. S., Cosentino R. G., Fouchet T., Irwin P. G. J., Li L., Flasar F. M., Gorius N., Morales-Juberías R. (2017) Disruption of Saturn's quasi-periodic equatorial oscillation by the great northern storm. *Nature Astron.* 1. 765—770.
 10. Karkoschka E., Tomasko M. (2005) Saturn's vertical and latitudinal cluster structure 1991—2004 from HST imaging in 30 filters. *Icarus*. 179. 195—221.
 11. Karkoschka E. (1994) Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000 nm wavelength: The methane spectrum. *Icarus*. 111. 967—982.
 12. Kuznyetsova Yu., Matsiaka O., Shliakhetskaya Ya., Krushevska V., Vid'machenko A., Andreev M., Sergeev A. (2014) Spectral researches of solar system giant planets using 2-m telescope at the Peak Terskol. *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso*. 43. 461—461.
 13. Lindal G. F. (1992) The atmosphere of Neptune: an analysis of radio occultation data with Voyager 2. *Astron. J.* 103. 967—982.
 14. Mendikoa I., Sánchez-Lavega A., Pérez-Hoyos S., Hueso R., Rojas J. F., López-Santiago J. (2017) Temporal and spatial variations of the absolute reflectivity of Jupiter and Saturn from 0.38 to 1.7 m with PlanetCam-UPV/EHU. *Astron. and Astrophys.* 607, A72.
 15. Mendikoa I., Pérez-Hoyos S., Sánchez-Lavega A. (2012) Probing clusters in planets with a simple Radiative Transfer model: the Jupiter case. *Eur. J. Phys.* 33. 1611—1624.
 16. Morozhenko A. V. (1984) Jovian cluster stratification. *Sov. Astron. Lett.* 10. 323—325. (in Russian).
 17. Ovsak A. S. (2018) On determining the vertical structure of the aerosol component in the atmosphere of Saturn. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 34. 37—51.
 18. Ovsak A. S. (2018) The altitudinal dependence of aerosol volume scattering coefficient in the atmosphere of Saturn in 1993. *49th Lunar and Planetary Science Conference*, ID 1069.
 19. Ovsak A. S., Karimov A. M., Lysenko P. G. (2018) Aerosol component of the atmosphere of Saturn: Comparison of the vertical structure characteristics in latitudinal belts. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 34. 88—97.
 20. Ovsak O., Kostogryz N. (2013) The method of computer analysis a vertical structure of aerosol component in the atmospheres of the Giant planets. *AGU Chapman Conference on Crossing Boundaries in Planetary Atmospheres: From Earth to Exoplanets*, Annapolis, Maryland, abstract #1677256.
 21. Pérez-Hoyos S., Sanz-Requena J. F., Sánchez-Lavega A., Irwin P. G. J., Smith A. (2016) Saturn's tropospheric particles phase function and spatial distribution from Cassini ISS 2010—11 observations. *Icarus*. 277. 1—18.
 22. Pérez-Hoyos S., Sánchez-Lavega A., French R. G. (2006) Short-term changes in the belt/zone structure of Saturn's southern hemisphere (1996—2004). *Astron. and Astrophys.* 460. 641—645.

23. Roman Michael T., Banfield D., Gierasch P. J. (2013) Saturn's cluster structure inferred from Cassini ISS. *Icarus*. 225. 93—110.
24. Sánchez-Lavega A., Hueso R., Pérez-Hoyos S. (2007) The three-dimensional structure of Saturn's equatorial jet at cluster level. *Icarus*. 187. 510—519.
25. Santer R., Dollfus A. (1981) Optical reflectance polarimetry of Saturn's globe and rings: IV. Aerosols in the upper atmosphere of Saturn. *Icarus*. 48. 496—518.
26. Sanz-Requena J. F., Pérez-Hoyos S., Sánchez-Lavega A., Antuñaño A., Irwin Patrick G. J. (2018) Haze and cluster structure of Saturn's North Pole and Hexagon Wave from Cassini/ISS imaging. *Icarus*. 305. 284—300.
27. Sromovsky L. A., Baines K. H., Fry P. M. (2020) Modeling the Evolution of North Polar Color and Cluster Structure on Saturn. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. Page 204.03. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, vol. 52. e-ID 2020n6i204p03.
28. Tejfel V. G., Usoltzeva L. A., Kharitonova G. A. (1969) The Spectral Characteristics and Probable Structure of the Cluster Layer of Saturn // Planetary Atmospheres, Proceedings from 40th IAU Symposium held in Marfa, Texas, Oct. 26-31, 1969. Eds C. Sagan, T. C. Owen, H. J. Smith. International Astronomical Union. Symposium no. 40, Dordrecht, Reidel. P. 375.
29. Temma T., Chanover N. J., Simon-Miller A. A., Glenar D. A., Hillman J. J., Kuehn D. M. (2005) Vertical structure modeling of Saturn's equatorial region using high spectral resolution imaging. *Icarus*. 175. 464—489.
30. Vidmachenko A. P. (2015) Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964—2012. *Astronomical School's Report*. 11(1). 1—14.
31. Vidmachenko A. P. (2015) Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption. *Astronomical School's Report*. 11(1). 15—23.
32. Vid'machenko A. P. (2015) Seasonal changes of methane absorption in the Saturn atmosphere. *46th Lunar and Planetary Science Conference*. ID 1051.
33. Vidmachenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V. (1984) Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk. *Sol. Syst. Res.* 17, 164—171.
34. Vincent M. B., Clarke J. T., Trauger J. T. (2000) The correlation of zonal bands and zonal winds in HST/STIS images of Jupiter and Saturn. Proc. American Astronomical Society, 32th DPS Meeting, Pasadena, CA, Oct. 23—27, ID 10.11; *Bull. Amer. Astron. Soc.* 32, 1008.
35. Yanovitskij E. G., Ovsak A. S. (1997) Effective optical depth of absorption line formation in semi-infinite planetary atmospheres. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 13. 1—19.

*O. S. Ovsak*¹, *A. M. Karimov*², *P. G. Lysenko*²

¹Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

²Fesenkov Astrophysical Institute, Academy of Sciences of Kazakhstan
Almaty, Kazakhstan

ALTITUDINAL DEPENDENCE OF AEROSOL VOLUMETRIC
SCATTERING COEFFICIENT IN THE SATURN'S ATMOSPHERE.
II. THE NORTHERN HEMISPHERE LATITUDINAL BELTS

The altitude dependences of volumetric aerosol scattering coefficient have been determined for the five latitudinal belts of the Saturn Northern Hemisphere. A probable vertical structure of the aerosol component in the range of atmospheric pressure 0.06...10 bar has

been constructed. For this purpose, we have used the our previous work analyzing results of 2015 spectrophotometric measurements data of giant planet latitudinal belts 17N, 33N, 49N, 66N and 80N in the absorption bands of methane at 727 nm and 619 nm. In the studied range of altitude levels of Saturn's atmosphere, the ubiquitous presence of aerosols was found, without signs of the presence of purely gas interlayers there. The largest values of the volumetric aerosol scattering coefficient $2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ are determined in the midlatitude belt 49N, and the smallest 10^{-8} cm^{-1} in the circumpolar belt 80N. In the studied altitude range of the atmosphere, four areas of aerosol thickening were identified, within which the volumetric aerosol scattering coefficient reaches its maximum values. The presence of particles of the most powerful aerosol layer in the atmosphere of Saturn was found at altitude with a pressure of 0.06 bar. With immersion in the atmosphere depth, the scattering coefficient of this layer increases to maximum values. In all the studied latitudinal belts, except for 80N, two highest clusters are formed, in which the maxima of the volumetric scattering coefficient of atmospheric aerosol are located near altitudinal levels with averaged pressures of 0.26 bar and 0.45 bar. These thickenings are separated in height by an interlayer of less dense aerosol. When immersed in the atmosphere, the aerosol volumetric scattering coefficient is reduced significantly in the 0.45...2 bar pressure range. The third in order of magnitude aerosol thickening was found in this altitude region of the atmosphere in all latitudinal belts, except 80N. The maxima of the volumetric aerosol scattering coefficient are located here near the level with a pressure of 1 bar. Even deeper we revealed in the range of atmospheric pressure 2...6 bar the fourth in order of magnitude stretched in height aerosol thickening. It consists of an upper and a lower part, with maxima of the volumetric scattering coefficient of aerosol located near the levels of 2.7 bar and 4.4 bar, respectively. The model parameters of aerosol particles were used in the calculations are: an effective radius of 1.4 μm and a dispersion of 0.07 for the modified gamma particle size distribution function, as well as the real part of the complex refractive index of 1.44. These model characteristics of aerosols are probably close to the averaged parameters of real particles in the studied altitude part of the Saturnian atmosphere in the 66N latitudinal belt, as well as for the pressure range of 0.06...1.5 bar atmosphere in the 33N belt. At the same time, signs of a possible significant difference between the model and real parameters of aerosol particles at all studied altitude levels of the atmosphere in the 17N and 49N belts of the giant planet were revealed.

Key words: Saturn, atmosphere, aerosol, vertical structure, latitudinal belts.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2021

Після доопрацювання 15.04.2021

Прийнята до друку 19.04.2021