

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.05.018>

УДК 523.45+523.46

А. А. Атаї¹, Е. Р. Юзбашов², Х. М. Мікаїлов¹, З. С. Фарзієв¹¹Шамахинська астрофізична обсерваторія ім. Н. Тусі
Національної академії наук Азербайджану²Інститут фізики Національної академії наук Азербайджану
E-mails: atai1951@yahoo.com, eltaj100@yahoo.com,
mikailov.kh@gmail.com, farziyev_zabit@yahoo.com

Молекулярний водень H_2 (4-0) у спектрах Юпітера і Сатурна

*За даними спектروفотометричних вимірювань Юпітера і Сатурна, отриманими у 2014—2017 рр. за допомогою ешелє-спектрометра, оснащеного ПЗС-приймачем і встановленого в касегренівському фокусі 2-м телескопа Шамахинської астрофізичної обсерваторії ім. Н. Тусі Національної академії наук Азербайджану, вивчено слабкі квадрупольні лінії молекулярного водню смуги $H_2(4-0)$ у видимій області спектра зі спектральним розділенням $R = 14000$ і $R = 56000$. По лініях смуги H_2 (4-0) $S(0)$ і $S(1)$ було обчислено значення тиску на рівнях їхнього формування, оберտальна температура, вміст молекулярного водню в надхмарній атмосфері, кількість поглинального газу, що припадає на середню довжину вільного пробігу фотонів між двома актами розсіяння у хмаровому шарі, питомого вмісту газу на одиницю довжини вільного пробігу в різних частинах диска Юпітера і Сатурна. Необхідно було слідкувати за змінами відношення $S_4(2)/S_4(0)$ по диску Юпітера і Сатурна у просторі та часі. По наших вимірюваннях у 2016 г. отримано значення відношення $W(0)/W(2) = 3.5 \pm 0.6$ для Юпітера і $W(0)/W(2) > 2.5 \pm 0.4$ для Сатурна; в цілому Велика Червона Пляма має середню температуру приблизно 124 ± 6 К. **Ключові слова:** Юпітер, Сатурн, атмосфера, спектральні лінії, ешелє-спектрограф, молекулярний водень, квадрупольні лінії.*

Вступ. Водень як основна складова частина зірок, планет-гігантів і міжзоряного газу зустрічається у Всесвіті в різному вигляді (H , H^+ , H^- , H_2 , H_2^+ і H_3^+) і в різних кількостях. Вміст молекулярного водню в газових планетах Сонячної системи такий. Для Юпітера відношення

$H_2:He$ становить 89:11 по об'єму і 80:20 по масі. Вимірювання зі спускного апарата «Галілео» (1995) дали трохи більший вміст гелію, 24 % по масі, а для Сатурна це співвідношення становило 89:11 по масі [2, 3, 17]. Для Урана відношення $H_2:He$ дорівнює 88:12 по об'єму (76:21.5 по масі), 2...2.3 % припадає на метан [2]. У роботі [17] відзначено, що частка гелію становить 26.5 % по масі, що близько до протозоряної масової частки гелію (28.1 %), частка метану, в якому пов'язана структура хмар, близька до 2 % [17].

Метан CH_4 в атмосфері Нептуна складає лише незначну домішку, 1...3 % [2, 3, 17]. Гелію більше на Нептуні, ніж на Урані. Тоді частка молекулярного водню на Нептуні становить 73 %, а гелію — 26 % по масі.

Точні дані про хімічний склад атмосфер планет-гігантів дуже важливі. Без них неможливо зрозуміти процеси хмароутворення, природу деталей на їхніх дисках і т. д. Протягом останніх десятиліть, в основному завдяки космічним місіям до планет-гігантів, отримано багато нових, більш точних даних про хімічний склад атмосфер великих планет Сонячної системи. Перед КА «Джуно», який в даний час продовжує дослідження Юпітера, поряд з іншими завданнями також було поставлено завдання визначення хімічного складу атмосфери планети. Молекулярний водень, незважаючи на його високий вміст, є важко спостережуваним газом через відсутність у нього дипольного спектру. У 1938 році Г. Герцберг [24] передбачив наявність квадрупольних ліній молекулярного водню у спектрах планет-гігантів, а в наступних роботах [25, 28, 30, 39] були виявлені лінії $S(0)$, $S(1)$ обертонів H_2 (3-0) і H_2 (4-0).

Точні дані для квадрупольних ліній молекулярного водню H_2 можуть надати велику можливість для детального аналізу атмосфер планет-гігантів. Ці лінії чутливі до вмісту водню, орто-паравідношення, вертикальної структури атмосфери, розподілу хмар, а також до профілю «тиск — температура» атмосфери планети.

В даний час отримано надійні експериментальні оцінки для молекулярних параметрів, необхідних для модельних розрахунків [10, 11, 27], додаткові результати представлено в роботі [38]. Спостереження багатьох проявів H_2 на Юпітері були описані в літературі (наприклад, в роботі [43] узагальнено спостереження H_2 для Юпітера).

У роботах [8, 19, 43] було обчислено коефіцієнти поглинання квадрупольного переходу H_2 (4-0) $S(1)$ для лінії 636.776 нм. Отримані сили ліній становлять лише 54 % і 60 % від теоретичних значень матричних елементів, обчислених в роботах [42] і [16] відповідно. Ці відмінності дуже важливо зрозуміти, оскільки інтерпретація спектрів планет в цьому переході є дуже важливою для оцінок вмісту H_2 в атмосферах цих планет. Значення вмісту H_2 використовуються у співвідношеннях із вмістом інших молекул (елементів) для порівняння з сонячними величинами. Вміст H_2 має істотне значення для побудови моделі атмосфери великих планет. В роботі [39] були приведені точніші дані

про коефіцієнти поглинання для лінії H_2 (4-0). Коефіцієнт поглинання переходу H_2 (4-0) $S(1)$ становить $(1.54 \pm 0.09) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ амагат}^{-1}$, а для $S(0)$ він дорівнює $0.88 \pm 0.32 \text{ см}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ амагат}^{-1}$ [39, 43]. Ці оцінки добре узгоджуються з теоретично передбаченими значеннями $S_0 = 1.63 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ амагат}^{-1}$ для $S(1)$ і $S_0 = 0.95 \pm 0.14 \text{ см}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ амагат}^{-1}$ для $S(0)$, але розходяться з раніше опублікованими даними лабораторних вимірювань [39].

В роботі [27] було використано виміряну еквівалентну ширину для оцінки ефективного відношення орто-параводню для тропосфери Юпітера. Спостереження молекулярного водню в атмосферах планет, крім коефіцієнта поглинання, вимагають знання ще й точних частот переходів [7, 22, 29]. Обертон молекулярного водню (4-0) виявився найбільш корисним для кількісних досліджень атмосфер планет-гігантів (особливо у спектрах перших двох планет). Його корисність частково пов'язана з його надзвичайно низькою інтенсивністю, внаслідок чого лінії смуги H_2 (4-0) ненасичені навіть у глибоких шарах атмосфери. Наприклад, спостережна еквівалентна ширина лінії $S(1)$, найсильнішої складової смуги H_2 (4-0), становить всього 0.8 пм у спектрі Юпітера [38]. Інша корисна властивість більш високих обертово-коливальних квадрупольних обертонов, передбачена МакКеллар [32], — це великий коефіцієнт зсуву тиску для частот центральної лінії. Зсуви ліній під тиском, утворених в атмосферах гідростатичної рівноваги, перешкоджають настанню насичення. Якщо величина зсуву тиску дорівнює величині, передбаченою в роботі [32] для обертону (4-0), то лінія $S(1)$ повинна бути ненасиченою навіть у спектрі Урана, де її спостережувана еквівалентна ширина становить близько 3 пм [18, 40]. Вплив зсуву тиску на утворення квадрупольних ліній поглинання H_2 в атмосферах великих планет раніше не розглядався. Показано, що хоча зсуви тиску були виміряні для смуг H_2 (3-0) і (4-0), їх можна оцінити з використанням сучасних експериментальних і теоретичних знань. На основі цих оцінок показано, що вплив зсуву тиску незначно для Юпітера і мало для Сатурна, але досить велике для Урана. Врахування зсуву тиску зменшує вміст H_2 , отриманий для Урана, з 25 % до 50 % порівняно з розрахунками, в яких зсув тиску ігнорується. Ефект може бути ще більшим для Нептуна [32].

За результатами спостережень [27] реєструвалися лінії H_2 обертону $S_4(2)$ у спектрі Юпітера. Цю різницю зсувів тиску необхідно пояснити, бо інтерпретація спектрів планет-гігантів в цьому переході є дуже важливою для наших знань про вміст H_2 на цих планетах. Знання фізичних особливостей молекулярного водню в атмосферах планет-гігантів може забезпечити краще розуміння енергетичного балансу планет і структуру їхніх атмосфер. Результати спостережень Сатурна [18] підтверджують, що інтенсивності ліній $S(0)$ і $S(1)$ мають приблизно однакове значення для смуги (4-0), а відношення еквівалентних ширин $W_{S(0)}/W_{S(1)}$ лежить у межах 0.9...1.1. Це також підтверджується результатами спостережень [18, 23], і автори очікували

високого значення для обертальної температури Сатурна. Каркошка в роботі [26] в досить великому обсязі і з достатньою точністю отримав спектри Юпітера і Сатурна в тій області, де містяться квадрупольні лінії $S(0)$ і $S(1)$. Але ці лінії були отримані в різний час і відповідають різним меридіональним значенням на диску планети. Індукована смуга поглинання H_2 (4-0) молекулярного водню має центральну довжину хвилі 642 нм, і в ній помітні дві лінії — $S(1)$ 636.776 нм і $S(0)$ 643.503 нм. Друга лінія поглинання молекулярного водню у спектрі Юпітера 643.503 нм блендується з лінією аміаку NH_3 , і тому при низькій роздільності їх важко помітити окремо. У ці дослідження також включені дослідження молекулярних ліній $S(0)$, $S(1)$ у смугі H_2 (4-0) поглинання у відбитому спектрі планет-гігантів. За спостереженнями [26] чотири лінії квадрупольного поглинання водню у смугах H_2 (3-0) і (4-0) у спектрах екваторіальної зони Юпітера і Сатурна мають асиметрію еквівалентних ширин, яка становить 2 % для Юпітера і 3 % для Сатурна. Крім того, не підтвердилися асиметрії 5 % для $S(0)$ і 15 % для $S(1)$ у поглинанні для лінії H_2 (3-0) для ранкового та вечірнього боків на Юпітері і Сатурні, відмічені в дослідженні [15]. В роботі [26] відзначено, що еквівалентні ширини ліній $S(0)$, $S(1)$ у смугі 4-0 для кожного спостереження дорівнюють для $W_{S(0)} = 0.53...0.57$ пм і $W_{S(1)} = 0.84...0.87$ пм відповідно. У роботах [26, 38] зроблено висновок, що екваторіальні зони Юпітера і Сатурна не показують значних добових коливань в квадрупольному поглинанні водню. Таким чином, дослідження квадрупольних ліній водню в атмосферах планет-гігантів допоможе розкрити суть багатьох явищ, які відбуваються в їхніх атмосферах і відображаються в динаміці хмар на диску планети. Тому проведення спектrophотометричних досліджень ліній поглинання молекулярного водню у спектрах Юпітера і Сатурна і обчислення деяких параметрів атмосфери дуже важливі для з'ясування суті змін на дисках планет і механізму виділення внутрішньої енергії в їхніх атмосферах.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЮПІТЕРА І САТУРНА

У 2014—2017 рр. були отримані спектри Юпітера і Сатурна на 2-м телескопі ШАО з різними значеннями спектрального розділення $R = 14000$ і $R = 56000$ (табл. 1). Спектри з розділенням $R = 14000$ отримано за допомогою ешелє-спектрометра з ПЗС-камерою, встановленою в касегренівському фокусі (580...530 пкл, розмір елемента 24 18 мкм). Спектри з розділенням $R = 56000$ отримано за допомогою оптоволоконного ешелє-спектрографа ShaFES. Як світлоприймач використовувалася ПЗС-камера американського виробництва з матрицею 4К 4К елементів з розміром елемента 15 15 мкм. Про це та про інші спектрометри, встановлені на 2-м телескопі, більш докладно див. у роботах Х. М. Мікаїлова та ін. [4, 33].

При обробці отриманого спостережного матеріалу дисперсійна крива неперервного спектру проводилася по вершинах піків у кож-

Таблиця 1. Дані про спостереження Юпітера і Сатурна

Дата	Деталі диска	Кількість спектрів
	ЮПІТЕР, $R = 14000$	
07/08.02.2014	По меридіану	14
12/13.02.2014	»	14
05/06.03.2014	»	14
	ЮПІТЕР, $R = 56000$	
15/16.03.2016	Центр	10
14/15.06.2016	»	6
24/25.06.2016	ВЧП	6
09/10.06.2017	Центр	12
28/29.06.2017	»	12
	САТУРН, $R = 14000$	
17/18.06.2014	Центр, кільце і Північний полюс	6
25/26.06.2014	»	9
18/19.07.2014	»	8
19/20.06.2015	»	6
20/21.06.2015	»	6
21/22.06.2015	»	6
01/02.08.2015	»	6
02/03.08.2015	»	8
	САТУРН, $R = 56000$	
17/18.07.2016	Центр, кільце і Північний полюс	12
28/29.06.2017	»	6
02/03.07.2017	»	8
03/04.07.2017	»	8
04/05.07.2017	»	6

ному розряді (докладно про деталі даної методики див. роботи [4, 33]). Проведення континууму таким способом полегшує порівняння результатів різних спостережень. Крім того, для контролю точності континууму щоразу вибиралися сонячні лінії близької інтенсивності з досліджуваною лінією у спектрі планети. Тоді точність вимірювань еквівалентних ширин і півширин сонячних ліній будуть однаковими з точністю вимірювань досліджуваних ліній молекулярного водню. Середні помилки при визначенні еквівалентних ширин сонячних ліній [34] в наших вимірах варіюють від 4 % (в центральних областях планети) до 10 % (ближче до приполярних областей). Така точність зберігається і для досліджуваних ліній в атмосферах планет. Проведення континууму — це відповідальний етап операції, від якої залежить подальший результат спектрального дослідження. Лінія континууму, як правило, є гладкою і опуклою. Якщо є сумніви у правильності проведення континууму в даному порядку спектру, можна порівняти розподіл енергії в сусідніх порядках. Інтенсивності сусідніх порядків в ешелеспектрах близькі. Широкі крила лінії H не дозволяють бачити рівень неперервного спектру, і якщо в даному порядку провести помилковий континуум, отримаємо помилкові значення еквівалентних ширин.

Далі вибираємо криві континууму суміжних порядків. Зсуваємо цю криву вгору до максимального значення. Ця крива може служити підказкою положення континууму. В результаті отримаємо відновлений континуум. Для кожної деталі на диску планети були отримані два-три спектри. Отриманий спектр оброблявся. Обробка ешелє-спектрів виконувалася за допомогою пакета програми DECH-20, розробленої в САО РАН [1]. Обробка спектрів провадилася за допомогою нової версії програми DECH. Для виконання обробки, крім спектрів досліджуваного об'єкта, необхідно отримати повний набір калібрувальних кадрів: dark (або bias), flat-field, ThAr або Sky. ПЗС-матрицю охолоджують до дуже низьких температур порядку 130 К, щоб зменшити вплив теплового шуму. При такому охолодженні ПЗС-матриці теплових електронів практично немає, внаслідок чого темновий кадр не відрізняється від кадру bias навіть при експозиціях у десятки хвилин. У цьому випадку немає сенсу витрачати чималий спостережний час на отримання темнових кадрів.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ СПЕКТРІВ ЮПІТЕРА І САТУРНА

У видимій області спектру Юпітера спостерігаються дві лінії молекулярного водню H_2 , 636.776 нм і 643.503 нм у смузі (4-0). Друга лінія блендується лінією аміаку NH_3 643.53 нм (рис. 1).

У спектрі Юпітера лінія аміаку NH_3 643.53 нм (рис. 1а; $R = 14000$) слабо виділяється і виглядає як звичайна депресія. А на рис. 1б показано лінію поглинання в тій же спектральній області Юпітера, отриману зі спектральним розділенням $R = 56000$ в центральній частині диска планети. При високому спектральному розділенні ($R = 56000$, рис. 1б) чітко видно роздвоєння ліній на 643.53 нм і 643.503 нм. Особливо важливе значення мають спектри Юпітера і Сатурна, отримані зі спектральним розділенням $R = 56000$ (рис. 1в), за якими можна визначити інтенсивності цих двох ліній молекулярного

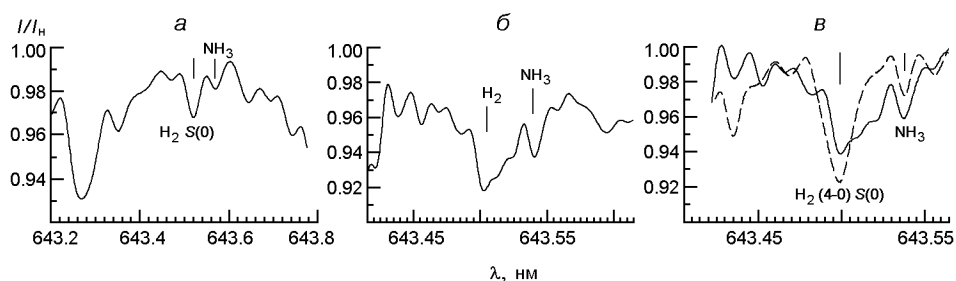


Рис. 1. Лінії поглинання молекулярного водню у смузі (4-0) 643.503 нм і аміаку NH_3 643.53 нм: а — у спектрах ВЧП Юпітера ($R = 14000$), б — у спектрах ВЧП Юпітера ($R = 56000$), в — у спектрах Юпітера і Сатурна ($R = 56000$)

Таблиця 2. Значення еквівалентних ширин і тисків на глибині, де формуються лінії $S(0)$ і $S(1)$ H_2 (4-0) у спектрах Юпітера і Сатурна (2014—2017 рр.)

Рік	W , пм $S(0)$	W , пм $S(1)$	P_0 , атм $S(0)$	P_1 , атм $S(1)$
ЕЗ ЮПІТЕРА				
2014 ($R = 14000$)	0.56	0.81	0.16	0.21
2016 ($R = 56000$)	0.65	0.88	0.18	0.19
2017 ($R = 56000$)	0.7	0.95	0.17	0.19
ЦЕНТР ДИСКА САТУРНА І ПІВНІЧНИЙ ПОЛЮС*				
2014 ($R = 14000$)	0.72 (0.73)	0.86 (0.84)	0.30 (0.36)	0.36 (0.34)
2015 ($R = 14000$)	0.74 (0.7)	0.86 (0.77)	0.28 (0.26)	0.30 (0.34)
2016 ($R = 56000$)	0.7 (0.72)	0.92 (0.87)	0.15 (0.18)	0.21 (0.22)
2017 ($R = 56000$)	0.59 (0.66)	0.73 (0.73)	0.1 (0.13)	0.13 (0.14)

* значення для Північного полюса — у дужках

водню і аміаку. З рис. 1 чітко видно поглинання в лінії NH_3 643.53 нм і в розширеній лінії 643.503 нм H_2 : інтенсивність лінії аміаку на Сатурні значно менша, ніж на Юпітері. Це і дозволяє точніше визначити півширини лінії 643.503 нм H_2 у спектрі Сатурна в 2014—2015 рр. навіть зі спектральним розділенням $R = 14000$.

Крім того, за спостережуваними матеріалами, які були отримані з роздільною здатністю $R = 56000$, визначено півширини і еквівалентні ширини $S(0)$ і $S(1)$ H_2 (4-0) Юпітера і Сатурна. Результати вимірювань показують, що півширини зазначених ліній однакові у межах помилок вимірювань (~ 5 %) (табл. 2). Це ще раз доводить, що лінії $S(0)$ і $S(1)$ H_2 (4-0) у спектрах Юпітера і Сатурна формуються в атмосферах у майже однакових умовах, що дозволяє за їхніми вимірюваннями визначити обертальну температуру.

Спостереження Юпітера на 2-м телескопі зі спектральним розділенням $R = 56000$ дозволило нам виявити інший терм, пов'язаний зі слабким квадрупольним переходом молекулярного водню — H_2 (4-0) $S(2)$. Повідомлення про виявлення лінії поглинання на довжині хвилі 631.34 нм вперше було опубліковано в роботі [18], а пізніше — в роботі [27]. Необхідно відзначити, що в роботі [18] попередньо було оцінено верхню межу поглинання в лінії H_2 (4-0) $S(2)$. Лінію H_2 (4-0) $S(2)$ у спектрі Сатурна було виявлено і під час наших спостережень (рис. 2б). За оцінками Сміта [38] інтенсивність лінії H_2 (4-0) $S(2)$ у спектрі Юпітера дорівнює 0.078 пм, що узгоджується з нашими вимірюваннями (~0.1 пм). Під час обробки спостережуваного профілю лінії H_2 (4-0) $S(2)$ у спектрі Сатурна ми визначили її інтенсивність, яка дорівнювала 0.04 пм.

У спектральній області, де міститься лінія поглинання $S(1)$ 636.776 нм, є слабка телурична лінія = 636.846 нм. При визначенні еквівалентної ширини і корекції доплерівських зсувів для порівняння були враховані відповідні лінії сонячного спектру. У 2014 р. було

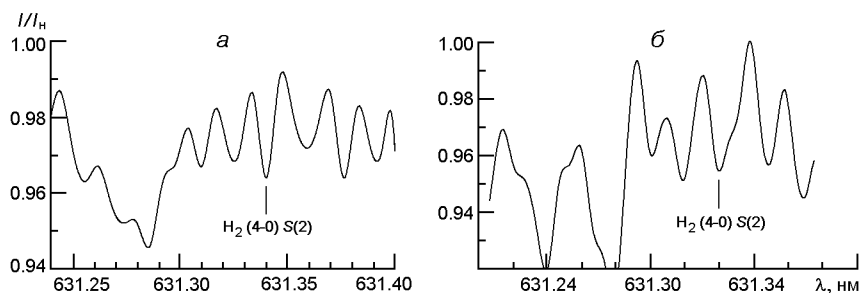
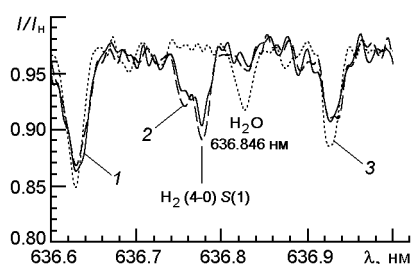


Рис. 2. Профіль лінії H₂ (4-0) S₄(2) у спектрах Юпітера (а) і Сатурна (б), отриманий із спектральним розділенням $R = 56000$

Рис. 3. Спектри Сатурна і Місяця ($R = 14000$) в області лінії молекулярного водню S(1) 636.776 нм (1 — північна, 2 — центральна частини диска Сатурна, 3 — спектр Місяця)



отримано спектр уздовж меридіана в напрямку до півночі у двох областях диска Сатурна — в центрі і полярному регіоні (рис. 3).

Інтенсивності $S(0)$ 643.503 нм і $S(1)$ 636.776 нм квадрупольної лінії молекулярного водню на Юпітері були визначені вздовж меридіана, тобто в різних деталях планети. Для точнішого аналізу атмосфери необхідно вибрати неблендовані лінії, наприклад $S(1)$ 636.776 нм для Юпітера (табл. 3).

За даними табл. 3 можна зробити висновок, що для різних деталей диска планети значення тиску, при якому формуються лінії молекулярного водню $S(0)$ 643.503 нм, розрізняються. Через два роки такі

Таблиця 3. Значення тиску в різних деталях на диску Юпітера, обчислені у припущенні, що атмосфера складається лише із молекулярного водню (P_0 — по $S(0)$, P_1 — по $S(1)$); $n_{H_2-H_2} = 0.84 \text{ см}^{-1}$, $T = 160 \text{ К}$)

Деталі	P_0 , атм	P_1 , атм	W_0/W_1	, %
2014 р. ($R = 14000$)				
NPR	0.21	0.3	0.714	5.7
NTrZ	0.17	0.26	0.714	3
NEB	0.2	0.3	0.721	3.1
EZ	0.16	0.21	0.722	4.3
ВЧП	0.18	0.25	0.714	7.3
STrZ	0.21	0.31	0.753	5
SPR	0.3	0.38	0.73	8
2016 р. ($R = 56000$)				
EZ	0.19	0.18	0.71	~3
ВЧП	0.23	0.19	0.72	~5

спостереження виконувалися тільки для Великої Червоної Плями (ВЧП) і EZ. З'ясувалося, що значення тиску, при яких формується лінія $S(1)$ 636.776 нм, майже однакові. Ясно, що для точного виявлення відмінностей фізичних умов у глибині атмосфери, де формуються лінії молекулярного водню, бажано мати спостережний матеріал кращої якості.

У різних деталях на диску Юпітера по значеннях півширини ліній 636.776 і 643.503 нм у смузі H_2 (4-0) молекулярного водню з урахуванням інструментальної півширини були оцінені значення тиску на глибині формування цих ліній (табл. 2 і 3). Для визначення тиску по значеннях півширини квадрупольних ліній водню $S(0)$ 643.503 нм і $S(1)$ 636.776 нм, з урахуванням інструментального контуру, було використано формулу [5], у якій півширина лінії (см⁻¹) виражається через ширину при нормальних умовах:

$$c = (P / P_0)(T_0 / T)^{1/2}, \quad (1)$$

$$P = (c / c_0)(T / T_0)^{1/2}, \quad (2)$$

де P_0, T_0 — тиск і температура при нормальних умовах (за даними [5] $T = 160$ К). У формулі (1) $c_0 = 0.84$ см⁻¹ — півширина лінії при нормальному тиску $P_0 = 1$ атм і температурі $T_0 = 300$ К.

Використовуючи виміряні півширини ліній для $S(1)$ і $S(0)$ H_2 (4-0) у спектрах Юпітера і Сатурна, а також дані [5], ми оцінили верхня межа тиску на рівні формування цих ліній.

Отримане значення тиску P розраховано у припущенні, що атмосфера складається тільки з молекулярного водню. У нашому випадку використовувався доплерівський контур, тому що в умовах атмосфер Юпітера і Сатурна при значеннях тиску $P < 1$ атм відношення лоренцівської і доплерівської півширини водневих ліній [18] $\Delta \lambda / \lambda_0 \approx 2.0 P(T / 273) \approx 125$ набагато менше від одиниці, так що при розрахунку профілів і кривих росту у двошаровій моделі можна скористатися чисто доплерівським виразом. Ясно, що для різних деталей на диску Юпітера, а також Сатурна значення тиску повинні відрізнятися. Це чітко видно з табл. 2 і 3. Розбіжності значень тисків для атмосфери Юпітера пов'язані з неточністю визначення півширини слабкої лінії $S(0)$ 643.503 нм, довгохвильове крило якої перекривається лінією аміаку 643.530 нм.

Квадрупольні лінії молекулярного водню у видимій області спектрів Юпітера і Сатурна є слабкими, ненасиченими, і різні обертальні рівні молекулярного водню населені неоднаково. Ясно, що зіткнення під час теплових рухів, характерні для атмосфер планет, і є причиною збудження обертальних рівнів. Крім того, незалежні від вимірювань теплового випромінювання планети оцінки температури її атмосфери можна визначити за інтенсивністю обертальних ліній у молекулярних смугах поглинання за спектрами відбивання. Якщо частота переходів при зіткненні (без випромінювання) перевищує частоту спонтанних

Таблиця 4. Вміст H_2 U , A_L , w_s ($g = 0.5$, $r_c = 0.75$, $b^* = 2$) і обертальна температура в різних деталях на диску Юпітера

Деталі	$W(0)/W(1)$	A_L , км·амага	U , км·амага	w_s , 10^{-6} км·амага·см $^{-1}$	T , К	, %
NPR	0.714	3.64	7.28	3.17	124.4	5.7
NTrZ	0.7	6.27	8.3	5.45	124.4	5.4
NEB	0.721	8.5	12.6	7.4	123.5	3.5
EZ	0.722	4.32	12.08	3.76	123.4	4.5
GRS	0.714	3.34	8.3	2.9	124.4	7.3
STrZ	0.753	5	10.6	4.34	123	5
SPR	0.73	7.2	13.1	6.23	127	
EW1 [26], вранішня півсфера диска Юпітера					134 ±2.5	
EW2 [26], вечірня півсфера диска Юпітера					136 ±3.3	

переходів, населеність обертальних рівнів визначається формулою Больцмана [23]. Знаючи відношення заселеності двох обертальних рівнів, які визначаються по еквівалентних ширинах цих ліній, можна визначити обертальну температуру того шару атмосфери, в якому формується основне поглинання в даних лініях [38]:

$$T \ln[5.49W_{S(0)} / W_{S(1)}] = 170, \quad (4)$$

де $W_{S(0)}$ і $W_{S(1)}$ — еквівалентні ширини ліній $S(0)$ і $S(1)$ відповідно.

Після цього по значеннях відношення інтенсивностей $S(0)$ 643.503 нм і $S(1)$ 636.776 нм, які (за нашими даними) змінюються від 0.69 до 0.725, було обчислено обертальну температуру для спостережуваних вздовж меридіана деталей Юпітера (табл. 4). Попередньо обчислені значення температури на Юпітері за даними ІК-спостережень «Вояджер-1» і «Вояджер-2» уздовж планетографічної довготи L (EW) у березні 1979 р. і липень 1979 г., що відповідають рівню 150 мбар, дорівнюють $T = 107...112$ К [20]. За нашими розрахунками на диску Юпітера уздовж меридіана значення температури дорівнюють $T = 122...127$ К, а тиск — 150...300 мбар. Як відомо, спостережуваний хід молекулярного поглинання по диску Юпітера непогано інтерпретується в рамках двошарової моделі формування лінії (або смуги) поглинання, яка враховує роль багаторазового розсіювання і поглинання всередині оптично щільного хмарового шару. Для визначення вмісту молекулярного водню в атмосферах Юпітера і Сатурна у випадку двошарової моделі атмосфери було використано криву росту, побудована В. Г. Тейфелем [6] для квадрупольних ліній H_2 . Розрахунки для зазначеної моделі були виконані при різних індикатрисах розсіювання хмарового шару: $b^* = a_0 H_0$, (H_0 — шкала висот), a_0 — об'ємний коефіцієнт аерозольного розсіювання. За допомогою цієї кривої росту по вимірних значеннях інтенсивності лінії $S(1)$ 636.776 нм (лінії H_2 (4-0) — ненасичені [6, 10, 12, 23]) було визначено вміст U молеку-

Таблиця 5. Еквівалентні ширини W ліній молекулярного водню $S(0) \text{ H}_2 (4-0) = 643.503 \text{ нм}$ і $S(1) \text{ H}_2 (4-0) = 636.776 \text{ нм}$, обчислені значення тиску P на рівнях їхнього формування, оберտальна температура T , вміст H_2 U , A_L , w_s ($b^* = 1.5$; $g = 0$, $n_{\text{H}_3-\text{H}_2} = 0.84 \text{ см}^{-1}$) в атмосфері Сатурна

Параметри	Деталь		2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
			$R = 14000$	$R = 14000$	$R = 56000$	$R = 56000$
W , пм	Центр	$S(0)$	0.72	0.74	0.7	0.59
		$S(1)$	0.86	0.86	0.92	0.73
W , пм	Північ	$S(0)$	0.73	0.7	0.72	0.66
		$S(1)$	0.84	0.77	0.87	0.73
P , атм	Центр	$S(0)$	0.30	0.28	0.15	0.10
		$S(1)$	0.36	0.30	0.21	0.13
P , атм	Північ	$S(0)$	0.45	0.26	0.18	0.13
		$S(1)$	0.34	0.34	0.22	0.14
T , К	Центр		111.5	109.5	119	113
T , К	Північ		109	106	112	106
A_L , км амага	Центр		9.7	9.7	10.7	7.7
A_L , км амага	Північ		9.5	10.8	14.2	18.4
U , км амага	Центр		14.6	14.6	16	11.6
U , км амага	Північ		14.3	16.3	21.3	27.7
w_s , 10^{-6} км амага см^{-1}	Центр		6.3	6.3	6.9	5.0
w_s , 10^{-6} км амага см^{-1}	Північ		6.2	7.0	9.2	12.0
, %			~8	~7	6	6

лярного водню в надхмарній атмосфері (H_2), кількість поглинального газу, що припадає на середню довжину вільного пробігу фотонів між двома актами розсіювання у хмаровому шарі A_L і питомий вміст газу на одиницю довжини вільного пробігу w_s для атмосфер Юпітера і Сатурна (табл. 4 і 5). Крім того, використано криві росту, побудовані для значень косинуса кутів падіння і відбиття при нульовій фазі $\mu = 1$ (центр диска) і $\mu = 0.5$ (край диска). Відмінності становили 10 % для значень A_L і $U(\text{H}_2)$.

З табл. 4 видно, що відношення інтенсивностей ліній лежить у вузьких межах, і значення оберտальної температури в різних частинах диска Юпітера близькі у межах помилок вимірювань до температури на тій глибині атмосфери, де формуються лінії поглинання $S(0)$, $S(1)$. Найменше значення вмісту водню спостерігається в області ВЧП.

За спостереженнями [26] квадрупольних ліній $\text{H}_2 (4-0) S(0) 643.503 \text{ нм}$ і $S(1) 636.776 \text{ нм}$ для ранкової та вечірньої півсфери за формулою (4) визначено оберտальні температури в атмосферах Юпітера (відповідно 134 ± 2.5 , $136 \pm 3.5 \text{ К}$) і Сатурна (138 ± 3 , $133 \pm 3 \text{ К}$). Значення U вмісту молекулярного водню в надхмарній атмосфері, кількість A_L поглинального газу, що припадає на середню довжину вільного пробігу фотонів між двома актами розсіювання у хмаровому шарі і питомий вміст w_s газу на одиницю довжини вільного пробігу

Таблиця 6. Обчислені значення тиску P на рівнях формування ліній H_2 (4-0) $S(0)$, $S(1)$, обертальна температура T , вміст H_2 U , A_L , w_s ($b^* = 2$; $g = 0.5$) в атмосфері Юпітера (центр диска)

Деталь	P_0 , атм $S(0)$	P_1 , атм $S(1)$	$W(0)/W(1)$	T , К	A_L , км амага	U , км амага	w_s , 10^{-6} км амага cm^{-1}	, %
2014 р., $R = 14000$								
EZ	0.16	0.21	0.722	123.4	4.3	8.6	3.76	>4.3 %
ВЧП	0.25	0.24	0.714	124.4	3.4	6.7	2.9	~7.3 %
2016 р., $R = 56000$								
EZ	0.18	0.19	0.71	125	4.0	7.9	3.45	>3.6 %
ВЧП	0.23	0.24	0.72	123.7	3.7	7.5	3.25	>3.6 %
2017 р., $R = 56000$								
EZ	0.17	0.19	0.73	122.7	4.4	8.76	3.8	~7

для атмосфери Юпітера, визначені по лінії $S(1)$ H_2 (4-0) 636.776 нм в різних деталях, у межах помилки вимірювань однакові.

Наявні ряди спостережень для Сатурна охоплюють чотирирічний сезон. Перший дворічний ряд отримано зі спектральним розділенням $R = 14000$, а наступні — з розділенням $R = 56000$. Для Сатурна було обрано два регіони для спостережень: центральний і північний. З табл. 5 видно, що за винятком 2017 р. значення еквівалентних ширин і півширину ліній молекулярного водню $S(0)$, $S(1)$, обчислені значення тиску P , обертальної температури T не змінювалися. Цікаво, що у 2017 р. в обох регіонах Сатурна знизився тиск і збільшилося значення обертальної температури. Значення вмісту H_2 U , A_L , w_s ($b^* = 1.5$; $g = 0$) в атмосфері Сатурна, отримані з високим спектральним розділенням, різні для 2016 і 2017 рр.

ОБГОВОРЕННЯ

У роботах [18, 23, 41] наводяться спостережені значення еквівалентних ширин ліній $S(0)$, $S(1)$ для Сатурна. Для смуги H_2 (4-0) результати обчислень Каркошка [26] узгоджуються з даними Гівера і Спінрада [23]. Такого характеру дослідження виконувалися в роботі [26] для різних ліній смуги H_2 (4-0) у східній і західній частинах диска планети. Вимірювання ліній $S(0)$, $S(1)$ в роботі [26] виконувалися для Юпітера і Сатурна в різний час і на різних меридіанах, що зменшує впевненість у результатах. А в наших спостереженнях вимірювання $S(0)$, $S(1)$ виконувалися по одному і тому ж меридіану. Як видно з результатів спостережень (див. табл. 2...4, 6), відношення інтенсивностей $W(0)/W(1)$ для центрів дисків планет змінюється в невеликих межах. Для Юпітера зі спектральним розділенням $R = 14000$ значення відношення інтенсивностей $S(0)/S(1)$ змінюється у межах 0.69 – 0.06 (2014 г.), а для центральної частини і Північного полюса диска Сатурна — у межах

(0.760...0.904) \approx 0.05. За спектрами центра дисків Юпітера і Сатурна зі спектральним розділенням $R = 56000$ значення відношення інтенсивностей $W(0)/W(1)$ для Юпітера дорівнювало (0.716...0.716) \approx 0.06, (2016—2017 рр.), а для Сатурна — приблизно (0.76...0.904) \approx 0.06. Для північної частини диска Сатурна значення інтенсивностей змінюються у межах (0.76...0.904) \approx 0.06. Результати наших спостережень узгоджуються з даними робіт [18, 20].

При вивченні переважно водневої атмосфери планет-гігантів необхідно знати міру теплової рівноваги між пара- і ортостанами молекулярного водню H_2 , тому що від внутрішньої енергії атмосферного газу залежить співвідношення $f_p = 1 - W_0 / W_1$ кількості пара-ортостанів [14, 38].

В роботі [38] виявлено лінії $H_2 S_4(2)$ у спектрі Юпітера і отримано, що відношення $W_4(1)/W_4(0) = 1.4...1.7$, тоді як номінальне значення становить приблизно 2. По знайденому значенню для центра диска планети із номінального відношення $S_4(2)/S_4(0)$ і було обчислено ефективну температуру (≈ 150 K), що відповідає глибині атмосфери, на якій формуються ці квадрупольні лінії поглинання. Було виявлено, що для центра диска Юпітера номінальне відношення $S_4(2)/S_4(0)$ залежить від фракції f_p -співвідношенню орто-параводню для рівноважної тропосфери. Аналіз послідовностей глобальних картографічних даних від «Вояджер-1, -2» показує, що парафракція найменша в екваторіальних широтах і наближається до рівноваги у високих широтах [22, 36, 37]. Відібраний атмосферний рівень відповідає температурі 125 K, а екваторіальна парафракція буде представляти теплову рівновагу при температурі близько 160 K. Виявлено, що низькоширотний мінімум f_p значно зміщений на північ від екваторіального мінімуму температури, на відміну від градієнтів, виявлених у більш ранніх вимірах космічного корабля «Вояджер» і наземних вимірах [13, 14, 35]. В роботі [40] відзначається, що в області Великої Червоної Плями значення фракції f_p (параводню) зменшуються приблизно від 0.320 до 0.305. Варто зазначити, що за результатами наших спостережень вміст молекулярного водню мав найменше значення в області ВЧП: $f_p = 0.286$ і 0.28 у 2014 і 2016 рр. відповідно (усереднені значення по всьому ВЧП). З порівняння видно, що U_{H_2} (ВЧП) $<$ U_{H_2} (EZ) $<$ U_{H_2} (STrZ). Крім того, аналіз вертикальної структури атмосфери на основі даних КА «Галілео» та «Вояджер» про поля вітру і температури підтверджує гіпотезу про те, що верхня частина ВЧП — це нахилений «млинець», що змінює з часом свій нахил [21, 35—37]. Коли температура наближається до 300 K, відношення f_p орто-параводню буде прагнути зберегти своє «нормальне» значення, тобто 3:1 [9, 13, 15]. Тому необхідно стежити за зміною відношення $S_4(0)/S_4(2)$ по диску Юпітера і Сатурна у просторі і часі. За нашими вимірами в 2016 р. для Юпітера відношення $W(0)/W(2)$ становило 3.5 ± 0.6 , а для Сатурна — приблизно 2.5 ± 0.4 . Аналіз механізмів рівноваги показує, що через неоднорідність поля, пов'язаного з домішкою молекул водню H_2 , домінує пара-

магнітна взаємодія H_2 - H_2 . Тоді *a priori* не очевидно, якою мірою може реалізуватися рівновага в атмосфері водню при наявності вертикального перенесення від високих до низьких температур? Конверсія орто-параводню значно збільшує ефективність конвекції. У межах стабільно стратифікованої верхньої тропосфери Юпітера, де починають формуватися інфрачервоні спектри, глобальна зміна парафракції, найімовірніше, викликана апвелінгом на екваторіальних широтах у відповідь на сонячне нагрівання. Якщо це так, то у полярних регіонах є компенсаторний рух вниз [36]. Звідси випливає, що на полюсах Юпітера і Сатурна роль конверсії повинна зростати, і це проявляється зростанням температури на полюсах до значень, порівнянних з екваторіальною температурою.

Обчислення пара-ортоспіввідношення водню f_p , яке вказує на відношення інтенсивностей $S(0)$ і $S(1)$ в атмосфері Юпітера, може мати значення при вимірюванні швидкості дифузії і конвективних процесів [13].

Вимірювання відбивної здатності в областях спектру, де поглинання газу обмежує глибину проникнення фотонів, дозволяє проводити вертикальне зондування хмарової структури. Особливості поглинання метаном і воднем добре підходять для цієї мети, тому що ці компоненти добре перемішані в атмосфері [21].

Дані в ІК-діапазоні [35], отримані за допомогою великих наземних телескопів, таких як інфрачервоний телескоп NASA на Гавайях, масив телескопів VLT Європейської південної обсерваторії, японський телескоп Subaru на Гавайських островах і обсерваторії Gemini показали, що найчервоніше області Великої Червоної Плями відповідають відносно теплому ядру урагану, який має середню температуру, близьку до 110 K [21], а в його оточенні є більш холодні вихори. Стало відомо, що найбільш яскрава оранжево-червона частина ВЧП приблизно на три-чотири градуси тепліша від навколишньої області, і середня температура, що відповідає теплому ядру урагану, близька до 110 K [21], що узгоджується з низьким значенням тиску (табл. 3). Крім того, в роботі [37] за вимірюваннями «Вояджер-1» і «Вояджер-2» при $P = 0.15$ бар отримано температуру 106.5...112.5 K і 107...112 K відповідно. Було б ще цікавіше, якби ми змогли стежити за зміною відношення $S_4(2)/S_4(0)$ в області Великої Червоної Плями Юпітера, яка має складну динаміку і розвивається, з часів спостережень в XIX столітті, з коливаннями. Вона показала тенденції до зменшення довжини, уповільнення швидкості дрейфу і, можливо, прискорення внутрішньої циркуляції. На відміну від земної атмосфери, циркуляція на Юпітері і Сатурні в основному зумовлена висхідними внутрішніми потоками тепла. Для того щоб знайти відповіді на безліч запитань, пов'язаних з динамікою атмосфер планет-гігантів (зокрема з виникненням і еволюцією ВЧП та інших овальних утворень), необхідно протягом тривалого часу виконувати їхні спостереження за допомогою наземних і космічних телескопів. Ці спостереження повинні проводитися з високим

просторовим і спектральним розділенням для виявлення закономірності атмосферних явищ на дисках планет.

Автори висловлюють щире подяку Л. Ф. Голубевій за корисні критичні зауваження.

1. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшелле-спектров ДЕСН-20. Препринт РАН. Нижний Архыз: Спец. астрофиз. обсерватория, 1992. № 92. 53 с.
2. Ксанфомалити Л. В. *Солнечная система*. Ред. В. Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2012. 398 с.
3. Маров М. Я. *Космос: От Солнечной системы вглубь Вселенной*: 2-е изд. М.: Физматлит, 2018. 544 с.
4. Микаилов Х. М., Халилов В. М., Алекперов И. А. Эшелле-спектрометр фокуса Кассегрена 2-м метрового телескопа ШАО НАН Азербайджана. *Циркуляр ШАО*. 2005. № 109. С. 21—29.
5. Мороз В. И. *Физика планет*. М.: Наука, 1967. 495 с.
6. Тейфель В. Г. *Физические свойства атмосфер Юпитера и Сатурна*. Докторская диссертация. Алма-Ата, 1980. 530 с.
7. Beck S. C., Lacy J. H., Geballe T. R. Detection of 12.28 micron rotational line of molecular hydrogen in the Orion molecular cloud. *Astrophys. J. Lett.* 1979. 234. L213—L216.
8. Bergstralh J. T., Margolis J. S., Brault J. W. Intensity and pressure shift of the H₂ (4-0) S(1) quadrupole line. *Astrophys. J. Lett.* 1978. 224. L39—L41.
9. Bliesner R. M. *Parahydrogen-orthohydrogen conversion for boil-off reduction from space stage fuel systems*. A thesis for the degree of Master of Science Washington State University School of Mechanical and Materials Engineering, July 2013.
10. Bragg S. L., Brault J. B., Smith W. H. Line positions and strengths in the H₂ quadrupole spectrum. *Astrophys. J.* 1982. 263. P. 999—1004.
11. Brault J. B., Smith W. H. Determination of the H₂ 4-0 S(1) quadrupole line strength and pressure shift. *Astrophys. J.* 1980. 235. L177—L178.
12. Cochran W. D., Smith W. H. Desaturation of H₂ quadrupole lines in the atmospheres of the outer planets. *Astrophys. J.* 1983. 271. P. 859—864.
13. Conrath B. J., Gierasch P. J. Global variation of the para hydrogen fraction in Jupiters atmosphere and implications for dynamics on the outer planets. *Icarus*. 1984. 57. P. 184—204.
14. Conrath B. J., Gierasch P. J., Herter T., Wang J. Temperature and para hydrogen gradients on Jupiter observed from the FORCAST camera on SOFIA. *Icarus*. 2018. 215. P. 1—6.
15. Cunningham C. C., Hanten D. M., Tomasko M. G. H₂ spectroscopy and diurnally changing cloud on Jupiter. *Icarus*. 1988. 75. P. 324—350.
16. Dalgarno A., Allison A. C., Browne J. C. Rotation-vibration quadrupole matrix elements and quadrupole absorption coefficients of the ground electronic states of H₂, HD and D₂. *J. Atmos. Sci.* 1969. 26. P. 946—951.
17. de Pater I., Lissauer J. J. *Planetary Sciences*. Hardcover, 2010. 280 p.
18. Encrenaz T., Owen T. New observations of the hydrogen quadrupole lines on Saturn and Uranus. *Astron. and Astrophys.* 1973. 28. P. 119—124.
19. Fink U., Wiggins T. A., Rank D. H. Frequency and intensity measurements on the quadrupole spectrum of molecular hydrogen. *J. Mol. Spectrosc.* 1965. 18. P. 384—395.

20. Flasar F. M. Global dynamic and thermal structure of Jupiter's atmosphere. *Icarus*. 1986. 65. P. 280—303.
21. Fletcher L. N., Orton G. S., Mousis O., et al. Thermal structure and composition of Jupiter's Great Red Spot from high-resolution thermal imaging. *Icarus*. 2010. 208. P. 306—328.
22. Gautier T. N., Fink U., Treffers R. R., Larson H. P. Detection of molecular hydrogen quadrupole emission in the Orion nebula. *Astrophys. J. Lett.* 1976. 207. P. L129—L132.
23. Giver L. P., Spinrad H. Molecular hydrogen features in the spectra of Saturn and Uranus. *Icarus*. 1966. 5. P. 586—589.
24. Herzberg G. On the possibility of detecting molecular hydrogen and nitrogen in planetary and stellar atmospheres by their rotation-vibration spectra. *Astrophys. J.* 1938. 87. P. 428—437.
25. Herzberg G. Spectroscopic evidence of molecular hydrogen in the atmospheres of Uranus and Neptune. *Astrophys. J.* 1952. 115. № 3. P. 337—340.
26. Karkoschka E. Diurnal variations on Jupiter and Saturn? *Icarus*. 1992. 97. P. 182—186.
27. Keffer C., Conner C. P., Smith W. H. A low temperature cell for laser photoacoustic spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.* 1985. 56. P. 2161—2163.
28. Kiess C. C., Corliss C. H., Kiess H. K. High-dispersion spectra of Jupiter. *Astrophys. J.* 1960. 132. P. 221—231.
29. Knacke R. F., Young E. T. Detection of the $S(9)$, $z;v = 0 \rightarrow 0$ Rotation line of the hydrogen molecule in ORION. *Astrophys. J.* 1980. 242. L183—L186.
30. Kuiper G. P. New absorptions in the Uranus atmosphere. *Astrophys. J.* 1949. 109. P. 540—541.
31. Lutz B. L. Molecular hydrogen on Uranus: observation of the 3-0 quadrupole band. *Astrophys. J.* 1973. 182. P. 989—998.
32. McKellar A. R. W. The significant of pressure shifts for the interpretation of H_2 quadrupole lines in planetary spectra. *Icarus*. 1974. 22. P. 212—219.
33. Mikayilov Kh. M., Musayev F. A., Alakbarov I. A., Rustamov B. N., Khalilov O. V. ShaFES: Shamakhy Fibre Echelle Spectrograph. *Azerbaijani Astron. J.* 2017. 12 (1). P. 4—27.
34. Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å National Bureau of Standards Monograph 61, Second Revision of Rowlands preliminary table of solar spectrum wavelengths. 1966. P. 350.
35. Sada P. V., Beebe R. F., Conrath B. J. Comparison of the structure and dynamics of Jupiter's Great Red Spot between the Voyager 1 and 2 encounter. *Icarus*. 1996. 119. P. 311—335.
36. Simon-Miller A. A., Banfield D., Gierasch P. J. Color and the vertical structure in Jupiter's belts, zones, and weather systems. *Icarus*. 2001. 154. P. 459—474.
37. Simon-Miller A., Gierasch P., Beede R., et al. New observational results concerning Jupiter's Great Red Spot. *Icarus*. 2002. 158(1). P. 249—266.
38. Smith W. H., Conner C. P., Simon J., Schempp W. V., Macy W. The H_2 4-0 $S(0, 1$ and $2)$ quadrupole features in Jupiter. *Icarus*. 1989. 81. P. 429—440.
39. Spinrad H., Trafton L. M. High-dispersion spectra of outer planets: I. Jupiter in the visual and red. *Icarus*. 1963. 2 (1). P. 19—28.
40. Trafton L. M. Neptune: observations of the H_2 quadrupole lines in the (4-0) band. *IAUS*. 1974. 65, 497T.
41. Trafton L. M. Paper presented at the AAS-DPS Meeting, Neptune: observations of the H_2 quadrupole lines in the (4-0) band, Tucson, Arizona, March 1973.

42. Trauger J. T., Mickelson M. E., Larson L. E. Laboratory absorption strengths for the H₂ (4,0) and (3,0) S(1) lines, *Astrophys. J. Lett.*, 1978. 225. P. L157—160.
43. West R. A., Strobel D. F., Tomasko M. G. Clouds, aerosols and photochemistry in the Jovian atmosphere. *Icarus*. 1986. 65. P. 161—217.

REFERENCES

1. Galazutdinov G. A. (1992). System for processing stellar echelle spectra of DESN-20. *Preprint RAS. Nizhny Arkhyz: Special Astrophys. Observ.*, № 92. 53.
2. Ksanfomality L. V. (2012). *Solar system*. Ed. V. G. Surdin. M.: Fizmatlit. 398.
3. Marov M. Ya. (2018) *Cosmos: From the Solar System deep into the Universe: 2nd ed.* Moscow: Fizmatlit. 544.
4. Mikailov Kh. M., Khalilov V. M., Alekperov I. A. (2005). Echelle-spectrometer of the Cassegrain focus of the 2-meter telescope of the Shao National Academy of Sciences of Azerbaijan. *Circular ShAO*. 109. 21—29.
5. Moroz V. I. (1967). *Physics of planets*. Moscow: Nauka. 495.
6. Teifel V. G. (1980). *Optical properties of the atmospheres of Jupiter and Saturn*. Doctoral dissertation. Alma-Ata. 530.
7. Beck S. C., Lacy J. H., Geballe T. R. (1979). Detection of 12.28 micron rotational line of molecular hydrogen in the Orion molecular cloud. *Astrophys. J. Lett.* 234. L213—L216.
8. Bergstralh J. T., Margolis J. S., Brault J. W. (1978). Intensity and pressure shift of the H₂ (4-0) S(1) quadrupole line. *Astrophys. J. Lett.* 224. L39—L41.
9. Bliesner R. M. (2013). *Parahydrogen-orthohydrogen conversion for boil-off reduction from space stage fuel systems*. A thesis for the degree of Master of Science Washington State University School of Mechanical and Materials Engineering, July 2013.
10. Bragg S. L., Brault J. B., Smith W. H. (1982). Line positions and strengths in the H₂ quadrupole spectrum. *Astrophys. J.* 263. 999—1004.
11. Brault J. B., Smith W. H. (1980). Determination of the H₂ 4-0 S(1) quadrupole line strength and pressure shift. *Astrophys. J.* 235. L177—L178.
12. Cochran W. D., Smith W. H. (1983). Desaturation of H₂ quadrupole lines in the atmospheres of the outer planets. *Astrophys. J.* 271. 859—864.
13. Conrath B. J., Gierasch P. J. (1984). Global variation of the para hydrogen fraction in Jupiters atmosphere and implications for dynamics on the outer planets. *Icarus*. 57. 184—204.
14. Conrath B. J., Gierasch P. J., Herter T., Wang J. (2018). Temperature and para hydrogen gradients on Jupiter observed from the FORCAST camera on SOFIA. *Icarus*. 215. 1—6.
15. Cunningham C. C., Hanten D. M., Tomasko M. G. (1988). H₂ spectroscopy and diurnally changing cloud on Jupiter. *Icarus*. 75. 324—350.
16. Dalgarno A., Allison A. C., Browne J. C. (1969). Rotation-vibration quadrupole matrix elements and quadrupole absorption coefficients of the ground electronic states of H₂, HD and D₂. *J. Atmos. Sci.* 26. 946—951.
17. de Pater I., Lissauer J. J. (2010). *Planetary Sciences*. Hardcover. 280.
18. Encrenaz T., Owen T. (1973). New observations of the hydrogen quadrupole lines on Saturn and Uranus. *Astron. and Astrophys.* 28. 119—124.
19. Fink U., Wiggins T. A., Rank D. H. (1965). Frequency and intensity measurements on the quadrupole spectrum of molecular hydrogen. *J. Mol. Spectrosc.* 18. 384—395.

20. Flasar F. M. (1986). Global dynamic and thermal structure of Jupiter's atmosphere. *Icarus*. 65. 280—303.
21. Fletcher L. N., Orton G. S., Mousis O., et al. (2010). Thermal structure and composition of Jupiter's Great Red Spot from high-resolution thermal imaging. *Icarus*. 208. 306—328.
22. Gautier T. N., Fink U., Treffers R. R., Larson H. P. (1976). Detection of molecular hydrogen quadrupole emission in the Orion nebula. *Astrophys. J. Lett.* 207. L129—L132.
23. Giver L. P., Spinrad H. (1966). Molecular hydrogen features in the spectra of Saturn and Uranus. *Icarus*. 5. 586—589.
24. Herzberg G. (1938). On the possibility of detecting molecular hydrogen and nitrogen in planetary and stellar atmospheres by their rotation-vibration spectra. *Astrophys. J.* 87. 428—437.
25. Herzberg G. (1952). Spectroscopic evidence of molecular hydrogen in the atmospheres of Uranus and Neptune. *Astrophys. J.* 115. N 3. 337—340.
26. Karkoschka E. (1992) Diurnal variations on Jupiter and Saturn? *Icarus*. 97. 182—186.
27. Keffer C., Conner C. P., Smith W. H. (1985). A low temperature cell for laser photoacoustic spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.* 56. 2161—2163.
28. Kiess C. C., Corliss C. H., Kiess H. K. (1960). High-dispersion spectra of Jupiter. *Astrophys. J.* 132. 221—231.
29. Knacke R. F., Young E. T. (1980). Detection of the $S(9)$, $z;v=0-0$ rotation line of the hydrogen molecule in ORION. *Astrophys. J.* 242. L183—L186.
30. Kuiper G. P. (1949). New absorptions in the Uranus atmosphere. *Astrophys. J.* 109. 540—541.
31. Lutz B. L. (1973). Molecular hydrogen on Uranus: observation of the 3-0 quadrupole band. *Astrophys. J.* 182. 989—998.
32. McKellar A. R. W. (1974). The significance of pressure shifts for the interpretation of H_2 quadrupole lines in planetary spectra. *Icarus*. 22. 212—219.
33. Mikayilov Kh. M., Musayev F. A., Alakbarov I. A., Rustamov B. N., Khalilov O. V. (2017). ShaFES: Shamakhy Fibre Echelle Spectrograph. *Azerbaijani Astron. J.* 12. N. 1. 4—27.
34. Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. (1966). The Solar spectrum 2935 Å to 8770 Å National Bureau of Standards Monograph 61, Second Revision of Rowlands Preliminary Table of Solar Spectrum wavelengths. 350.
35. Sada P. V., Beebe R. F., Conrath B. J. (1996). Comparison of the structure and dynamics of Jupiter's Great Red Spot between the Voyager 1 and 2 encounter. *Icarus*. 119. 311—335.
36. Simon-Miller A. A., Banfield D., Gierasch P. J. (2001). Color and the vertical structure in Jupiter's belts, zones, and weather systems. *Icarus*. 154. 459—474.
37. Simon-Miller A., Gierasch P., Beede R., et al. (2002). New Observational Results Concerning Jupiter's Great Red Spot. *Icarus*. 158(1). 249—266.
38. Smith W. H., Conner C. P., Simon J., Schempp W. V., Macy W. (1989). The H_2 4-0 $S(0, 1$ and $2)$ quadrupole features in Jupiter. *Icarus*. 81. 429—440.
39. Spinrad H., Trafton L. M. (1963). High-dispersion spectra of outer planets: I. Jupiter in the visual and red. *Icarus*. 2. № 1. 19—28.
40. Trafton L. M. (1974). Neptune: observations of the H_2 quadrupole lines in the (4-0) band. *IAUS*. 65. 497T.
41. Trafton L. M. (1973). Paper presented at the AAS-DPS Meeting, Neptune: observations of the H_2 quadrupole lines in the (4-0) band, Tucson, Arizona, March.

42. Trauger J. T., Mickelson M. E., Larson L. E. (1978). Laboratory absorption strengths for the H₂ (4,0) and (3,0) S(1) lines. *Astrophys. J. Lett.* 225. L157—160.
43. West R. A., Strobel D. F., Tomasko M. G. (1986). Clouds, aerosols and photochemistry in the Jovian atmosphere. *Icarus.* 65. 161—217.

*A. A. Atai*¹, *E. R. Yuzbashov*², *Kh. M. Mikailov*¹, *Z. S. Farziev*¹

¹Shamakhi Astrophysical Observatory named after N. Tusi
of the National Academy of Sciences of Azerbaijan

²Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan

MOLECULAR HYDROGEN H₂ (4-0) IN THE SPECTRA OF JUPITER AND SATURN

According to the spectrophotometric measurements of Jupiter and Saturn, obtained in 2014—2017, on the echelle spectrometer equipped with a CCD receiver at the Cassegrain focus of the 2-m telescope of the ShAO, weak quadrupole lines of molecular hydrogen of the H₂ (4-0) band in the visible region of the spectrum with spectral resolutions $R = 14000$ and $R = 56000$. Some parameters were determined from the lines of the H₂ (4-0) S(0) and S(1) band, i.e. the values of the pressure at the levels of their formation, the rotational temperature, the values of the content of molecular hydrogen in the above-cloud atmosphere, the amount of absorbing gas per average length free path of photons between two scattering events in the cloud layer, specific gas content per unit free path in different parts of the disk of Jupiter and Saturn. It was necessary to monitor the change in the ratio $S_4(2)/S_4(0)$ along the disk of Jupiter and Saturn in the spatial and temporal intervals. According to our measurements in 2016 for Jupiter, the ratio $W(0)/W(2) = 3.5 \pm 0.6$, and for Saturn $W(0)/W(2) > 2.5 \pm 0.4$; in general, the GRS has an average temperature of about 124 ± 6 K.

Key words: Jupiter, Saturn, atmosphere, spectral lines, echelle spectrograph, molecular hydrogen, quadrupole line.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2021

Після доопрацювання 14.05.2021

Прийнята до друку 20.05.2021