

УДК 523.45

ЗОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СЛАБЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ НА ЮПИТЕРЕ

© 2021 г. В. Д. Вдовиченко^а, *, А. М. Каримов^а, Г. А. Кириенко^а, П. Г. Лысенко^а, В. Г. Тейфель^а, В. А. Филиппов^а, Г. А. Харитонова^а, А. П. Хоженец^а

^аАстрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Республика Казахстан

*e-mail: teif@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 14.09.2020 г.

Принята к публикации 17.09.2020 г.

На материале спектральных наблюдений Юпитера, выполненных в последние годы, мы рассматриваем поведение слабых молекулярных полос поглощения метана и аммиака в диапазоне длин волн 600–800 нм. Прослеживаются достаточно заметно выраженные особенности в широтном ходе интенсивности этих полос, показывающие связь с зональной структурой облачных поясов планеты. Однако широтные положения экстремумов поглощения у разных полос показывают некоторые различия. Измерения зональных спектров демонстрируют ослабление наблюдаемого поглощения к краям диска, которое наиболее вероятно связано с геометрией переноса излучения в оптически активном слое атмосферы. Обращается внимание на важность изучения слабых полос поглощения, поскольку именно они дают возможность исследовать структурные особенности и их вариации в тропосфере Юпитера. При интерпретации наблюдательных данных необходимо рассматривать, как минимум, две альтернативных модели формирования полос поглощения. В одной модели должен рассматриваться оптически толстый слой аммиачных облаков, где основную роль при формировании молекулярных полос поглощения играет многократное рассеяние на частицах в этом слое. Другая модель должна исходить из предположения о малой оптической толщине аммиачного облачного слоя, когда основное поглощение формируется в подоблачной чисто газовой части с малым рассеянием.

Ключевые слова: Юпитер, атмосфера, облака, Большое Красное Пятно, спектрофотометрия, аммиак, молекулярное поглощение, яркостная радиотемпература

DOI: 10.31857/S0320930X21010102

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что аммиак в атмосфере Юпитера играет важную роль как облакообразующая составляющая в верхней части тропосферы планеты. Но оба газа — и метан, и аммиак, несмотря на малое относительное содержание, оказывают весьма значительное влияние на перенос теплового излучения в отдельных участках инфракрасного и микроволнового диапазонов электромагнитного спектра. Действительно, например, в длинах волн около 5 мкм, где находится “окно прозрачности” между полосами поглощения метана, наблюдаемый выход теплового инфракрасного излучения зависит от оптической толщины аммиачного облачного слоя (Orton и др., 1982; 1994). Наиболее заметно это ослабление 5-микронного ИК-излучения в Большом Красном Пятне (Fletcher и др., 2016). В более далеком инфракрасном диапазоне и тем более диапазоне миллиметрового радиоизлучения облачный слой в силу малости размеров частиц кристаллического аммиака не влияет на прохождение теплового излучения. Но поглоще-

ние радиации молекулами газообразного аммиака и метана весьма заметно сказывается на наблюдаемой яркостной температуре отдельных широтных поясов и локальных участков на диске Юпитера. Так, одной из наиболее характерных особенностей в диапазоне миллиметровых радиоволн на частотах 8–12 ГГц представляется пояс широт 15–20 N, приходящийся на границу между Экваториальной зоной (EZ) и Северным Экваториальным поясом (NEB). Именно здесь карты распределения показывают наиболее “горячие” участки на Юпитере (dePater и др., 2019). Вариации яркостной температуры в этом случае связываются с возможными зональными и локальными вариациями содержания газообразного аммиака и метана в тропосфере.

К сожалению, прямые измерения интенсивности полос поглощения аммиака в спектре Юпитера или невозможны, или крайне затруднены из-за того, что все они перекрываются с более сильными и широкими полосами поглощения метана. Вероятно поэтому и слабые полосы по-

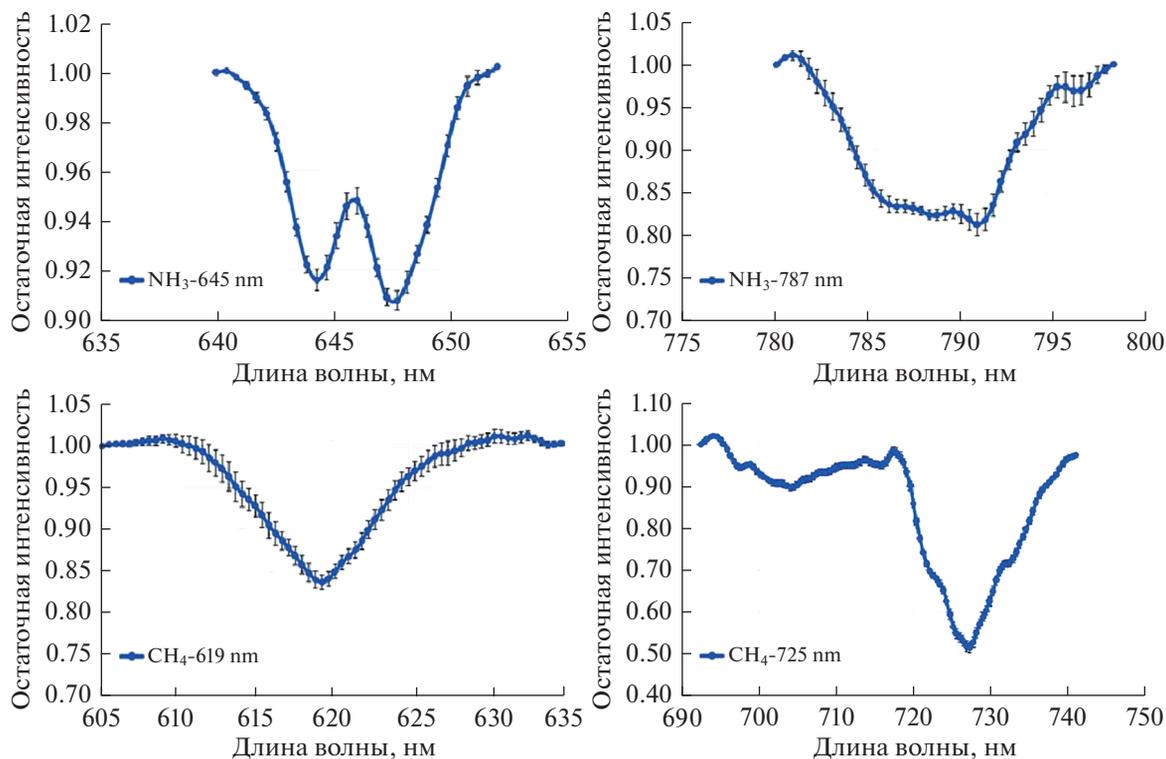


Рис. 1. Примеры контуров полос поглощения аммиака (вверху) и метана (внизу), полученных по измерениям в спектре Юпитера.

глощения аммиака, расположенные в видимой и самой ближней инфракрасной области длин волн, хотя и отмечались в спектре Юпитера, но систематическим исследованиям не подвергались. Можно отметить наблюдения, выполненные в работах (Lutz, Owen, 1980; Karkoschka, 1994; 1998; Cochran, 1980; 1983). Пожалуй, наиболее обстоятельные наблюдения были выполнены испанскими исследователями (Moreno и др., 1988; 1991). Ими же составлен достаточно полный обзор предыдущих исследований (Moreno и др., 1991*) полосы поглощения NH₃ 645 нм. Дело в том, что до 1980-х спектры планет получались только фотографическим способом, и большая часть фотоматериалов по спектральной чувствительности достигала только длин волн до 680 нм. Исследования же полос поглощения метана в спектре Юпитера выполнялись многими и соответствующие обзоры публиковались неоднократно.

В процессе наших наблюдений в спектре Юпитера исследовались две полосы поглощения аммиака NH₃ 645 и 787 нм, а также три полосы поглощения метана CH₄ 619, 702 и 725 нм (рис. 1).

На этом рисунке в качестве примера показаны отдельные профили полос поглощения, выделяемые в спектре Юпитера после вычисления его отношения к опорному спектру. Одновременные исследования приведенных полос поглощения

были начаты нами в 2004 г. и по ежегодным наблюдениям накоплен материал за более чем 12-ти летний период обращения Юпитера вокруг Солнца.

Хотя наклон экватора Юпитера к направлению на Солнце меняется всего в пределах от +3 до -3°, минимальное и максимальное расстояния планеты от Солнца различаются на 0.5 астрономической единицы или примерно на 10%, т.е. приток солнечной энергии в ней меняется на 20%. Насколько сказывается это различие на климатической обстановке при том, что Юпитер имеет собственный внутренний источник тепловой энергии, пока не ясно. Наблюдаемые изменения в верхней тропосфере и видимом облачном слое Юпитера свидетельствуют о довольно высокой атмосферной активности, но не носят регулярного характера, коррелирующего с гелиоцентрическим расстоянием или с солнечной активностью. Тем не менее, не исключена возможность некоторых сезонных вариаций в тропосфере Юпитера, поэтому многолетние однородные наблюдения могут оказаться бесполезными в этом отношении.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

В течение последних 16 лет, начиная с 2004 г., мы старались придерживаться более или менее

одинаковой методики спектральных наблюдений Юпитера, учитывая необходимость получения достаточно однородного материала за время полного обращения Юпитера вокруг Солнца. Методика наблюдений и выделения полос поглощения аммиака уже была описана в предыдущей статье (Tejfel и др., 2018, А). Основные данные об аппаратуре приведены в табл. 1. Подробнее остановимся здесь на некоторых дополнительных деталях.

Как и ранее, в 2017–2019 гг., наблюдения Юпитера выполнялись двумя способами. Записывались спектры при ориентации щели спектрографа вдоль центрального меридиана. Спектрограмма охватывала при этом весь полярный диаметр Юпитера, и ширина спектра составляла около 160 пикселей. Второй способ заключался в последовательном сканировании диска Юпитера от южного полюса до северного при ориентации щели параллельно экваториальному сечению диска. При продолжительности экспозиции одного спектра в 20 с полный скан состоял из примерно 60–70 зональных спектров. По времени это занимало около 20–25 мин, т.е. Юпитер успевал за это время повернуться приблизительно на 12°. Понятно, что при этом, в отличие от съемки спектров центрального меридиана, не ставилась задача исследования долготных вариаций, как это было сделано при исследованиях Большого Красного пятна (Tejfel и др., 2018, В). Однако при исследованиях широтных вариаций молекулярных полос поглощения зональные спектры обладают некоторым преимуществом. В них вполне допустимо усреднение даже до 20 пикселей вблизи центрального меридиана по долготе для получения более надежного профиля полосы поглощения и ее эквивалентной ширины при незначительных долготных вариациях. На меридиональных спектрах тоже приходится проводить сглаживание, но усреднение допустимо только в пределах 3–5 пикселей.

В последние годы при большом отрицательном склонении Юпитера на пространственном разрешении заметно сказывается турбулентция земной атмосферы.

Обработка спектрограмм состоит в оцифровке и выводе массива в виде электронной таблицы с последующим вычислением отношения к опорному спектру. В качестве опорного используется стандартный спектр кольца Сатурна или Ганимеда для выделения всех полос поглощения кроме полосы аммиака 787 нм, для которой вводится стандартный спектр центра диска Сатурна. Сохранение неизменными этих опорных спектров позволяет относить все наблюдаемые вариации в поглощении на Юпитере к самому исследуемому объекту. Кроме того, для контроля измерялась эквивалентная ширина теллурической полосы поглощения кислорода 760 нм. Отсутствие ее вари-

Таблица 1. Параметры аппаратуры

Телескоп	Zeiss-600 0.6 м
Фокус	Cassegrain 7.5 м
Спектрограф	SGS SBIG
Дисперсия	4.3 Å/pixel
Масштаб	4.08 arcsec/pixel
CCD-камера	ST-7XE SBIG
Матрица	750 × 550 pixels
Размер пикселя	9 × 9 mkm

ций вдоль зоны или меридиана позволяет считать реальными получаемые оценки интенсивности юпитерианских полос поглощения, а не вызванными инструментальными погрешностями. По получаемым профилям полос поглощения вычислялись эквивалентные ширины, как оценка полного поглощения в данной полосе. Некоторые искажения контуров слабых полос поглощения могут вызываться также слабыми теллурическими полосами водяного пара. Но это не влияет на относительный ход интенсивности полосы в разных точках диска планеты. Пример сравнения хода интенсивности полосы поглощения метана 725 нм и теллурической полосы кислорода 760 нм, измеренных на спектрах центрального меридиана Юпитера, показан на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Как и в предыдущие годы, обработка наблюдений 2017–2019 гг. выполнялась по стандартной методике с вычислением эквивалентных ширин всех пяти полос поглощения метана и аммиака в разных точках центрального меридиана Юпитера или в зональных спектрах от одного края диска до другого. На рис. 3 показаны примеры полученных результатов по широтному ходу молекулярного поглощения. На графиках для удобства сравнения показаны вариации нормированных к центру диска в экваториальной зоне эквивалентных ширин в относительных единицах.

Можно видеть, что общий характер поглощения по широте примерно одинаков. Вблизи определенных широтных поясов наблюдаются экстремумы, соответствующие минимальным или максимальным эквивалентным ширинам полос. Общая тенденция заключается в том, что наименьшие значения больше относятся к северному полушарию. Особенно выделяется депрессия в аммиачном поглощении у полосы NH_3 787 нм, приходящаяся приблизительно на область, граничащую с экваториальной зоной и южной стороной Северного экваториального пояса (NEB). Наибольшие величины поглощения приблизительно соответствуют светлым зонам. Обращает

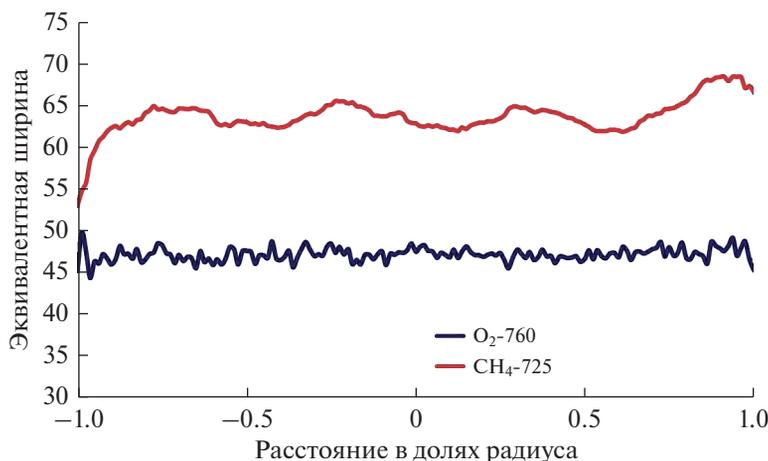


Рис. 2. Меридиональные профили эквивалентных ширин полосы поглощения метана CH_4 725 нм и теллурической полосы кислорода O_2 760 нм.

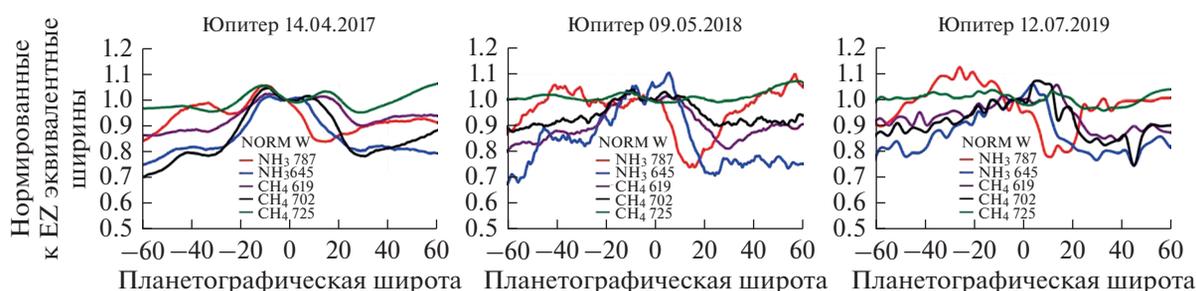


Рис. 3. Широтные вариации нормированных к экваториальной зоне эквивалентных ширин полос поглощения метана и аммиака из наблюдений 2017–2019 гг.

на себя внимание то, что положение экстремумов у разных полос не совпадают точно друг с другом, а обнаруживают хотя и небольшие, но явные смещения по широте. Такая особенность сохраняется от года к году, хотя точного повторения может и не быть, в частности потому, что наблюдались не одни и те же долготы на планете, вдоль которых также возможны вариации интенсивности полос поглощения. Однако определенная репрезентативность получаемых данных сохраняется в пределах одного сезона наблюдений.

В качестве примера приводим результаты измерений широтных вариаций эквивалентных ширин полос поглощения аммиака NH_3 за несколько дат в мае 2018 г.

Подобные особенности, т.е. смещения по широте экстремумов для разных полос поглощения, были отмечены нами ранее по наблюдениям в 1999 г., когда исследовались широтные вариации полос поглощения метана на всех долготах Юпитера (Tejfel и др., 2001). Эти, безусловно, интересные особенности требуют дальнейших систематических исследований.

Исследования широтных вариаций полос поглощения проводились и ранее: измерялись интенсивности полосы NH_3 645 нм в нескольких поясах Юпитера (табл. 2).

В первом столбце табл. 2 даны наименования широтных поясов, второй столбец показывает данные наших наблюдений, выполненных в 2018 г. — значения эквивалентных ширин полосы в ангстремах. Третий и четвертый столбцы содержат средние значения и стандартные отклонения эквивалентных ширин, вычисленные по наблюдениям за период с 2005 по 2015 гг. В пятом столбце приводятся данные по работам испанских исследователей. Lutz и Owen представили свои оценки эквивалентных ширин полосы 645 нм в единицах волновых чисел (шестой столбец), поэтому в седьмом столбце эти значения переведены в ангстремы.

Из таблицы видно, что у разных авторов получаются довольно разные абсолютные оценки эквивалентных ширин полосы, хотя широтные различия имеют сходный характер. Скорее всего, главной причиной этих различий является методика выделения профилей поглощения аммиака на фоне коротковолнового слабого крыла полосы

Таблица 2. Эквивалентные ширины полосы поглощения NH_3 645 нм по наблюдениям Юпитера в разные годы

Область	2018	Tejfel и др. (2018)		Moreno и др. (1988; 1991)	Lutz, Owen (1980)	
	W(A)	W(A)	sW	W(A)	W (cm ⁻¹)	W(A)
SPR	4.2			5.6		
STB	5.1			5.7		
STrZ	5.7	5.92	0.49	7.8	26.4	11.00
SEB	6.0	6.78	0.45	9.8	30.9	12.90
EZ	6.2	6.75	0.32	7.7	23.1–33.0	9.6–13.8
NEB	5.5	6.35	0.35	4.9	20.1	8.30
NTrZ	4.4	5.38	0.36			
NTB	4.7			5.7		
NPR	4.6			7.2		
GRS	4.7				22.2	9.3

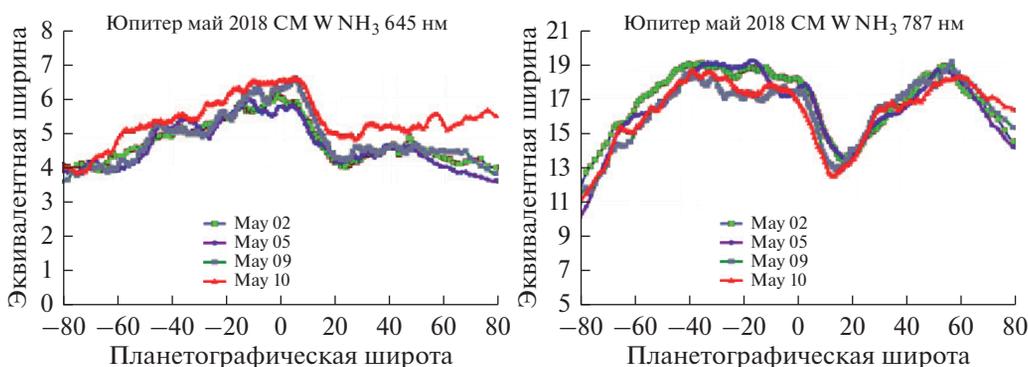
поглощения метана и проведение уровня непрерывного спектра. Можно отметить, что наши оценки эквивалентных ширин этой полосы хорошо согласуются с измерениями (Cochran, 1980), по которым среднее значение эквивалентной ширины полосы NH_3 645 нм равно 6 ± 1 ангстрем.

Особый интерес представляет сравнение диаметрального хода поглощения метана и аммиака вдоль центрального меридиана Юпитера от полюса к полюсу и вдоль экватора от одного края диска до другого. На примере 2018–2019 гг., как показывают рис. 5–9, наблюдается значительная разница между получающимися профилями хода поглощения. На каждом из этих рисунков слева показан нормированный ход поглощения вдоль экватора по наблюдениям в 2019 г. в момент оппозиции планеты. Вид кривых для всех основных облачных зон и полос Юпитера хорошо аппроксимируется соответствующей параболой $Y = 1 - Kx^2$, где x – относительное расстояние от центра диска в долях радиуса. Параметр K , как показывают графики, меняется от полосы к полосе. Такая аппроксимация носит иллюстративный характер

для количественного сравнения хода поглощения у молекулярных полос разной интенсивности. В правой части каждого из рисунков показано сравнение меридионального и экваториального хода эквивалентных ширин каждой полосы поглощения по наблюдениям 2018 г.

Наибольшую крутизну и ослабление к краям диска показывают наиболее слабые полосы. Здесь основную роль играет, скорее всего, геометрический эффект, качественно предсказываемый теорией переноса излучения в оптически толстой среде при многократном рассеянии. Однако, как будет отмечено в следующем разделе, интерпретация не может быть однозначной. То, что меридиональные вариации поглощения оказываются существенно иными, заслуживает особого внимания и рассмотрения в дальнейшем.

Аналогичный параболический вид показывает и ход поглощения вдоль всех широтных зон Юпитера при том, что небольшие искажения профиля могут создаваться локальными вариациями поглощения в долготном направлении. Как видно из этих графиков, геометрический фактор в ши-

**Рис. 4.** Вариации эквивалентных ширин полос поглощения аммиака в 645 и 787 нм вдоль центрального меридиана Юпитера в мае 2018 г.

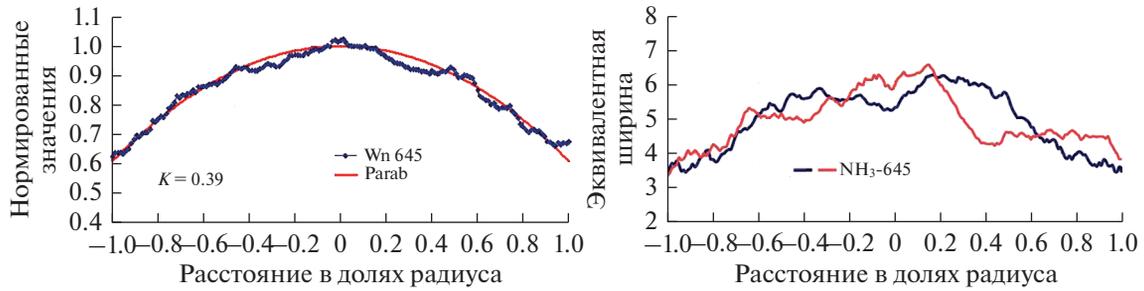


Рис. 5. Слева – нормированный к центру диска относительный ход эквивалентной ширины полосы NH₃ 645 нм вдоль экватора Юпитера в 2019 г. и его параболическая аппроксимация. Показан коэффициент параболы. Справа – ход эквивалентной ширины полосы поглощения NH₃ 645 нм вдоль центрального меридиана Юпитера и вдоль экватора в 2018 г.

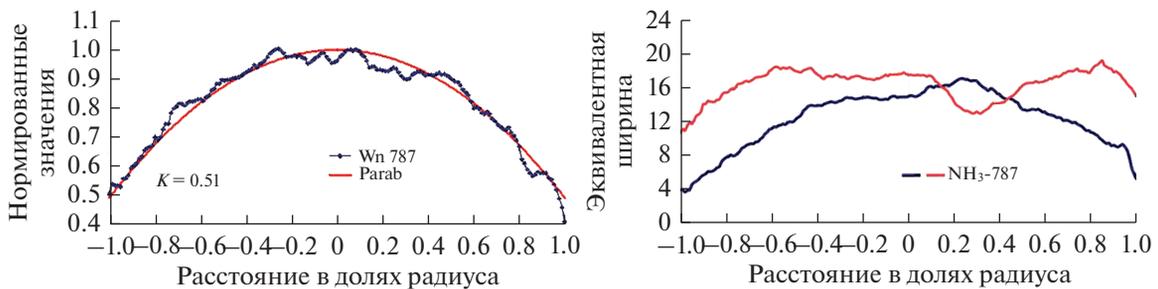


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для полосы поглощения NH₃ 787 нм.

ротном направлении выражен гораздо слабее, чем в направлениях к восточному и западному краям диска.

СРАВНЕНИЕ С ТЕПЛОВЫМ ДИАПАЗОНОМ

Как уже было отмечено выше, молекулярные полосы поглощения метана и аммиака играют весьма существенную роль не только в оптическом диапазоне, но и в диапазонах теплового инфракрасного и микроволнового излучения. Если в видимом диапазоне спектра молекулярное поглощение проявляет себя в формировании диффузно отраженного атмосферой Юпитера солнечного излучения, то уже начиная с длин волн

около 4 мкм и далее, его влияние проявляется в модуляции теплового излучения, выходящего из глубинных слоев планеты. Это обнаруживается по вариациям яркостной температуры, характеризующей интенсивность наблюдаемых потоков выходящего теплового излучения в разных участках Юпитера.

Исследования в этих областях излучения весьма обширны и описаны в большом числе публикаций, основанных на наблюдениях с помощью крупнейших оптических и радиотелескопов. Не обращаясь к обзору всех этих публикаций, отметим самые недавние, в которых речь идет не только об анализе отдельных участков планеты, но и о построении полных карт распределения яркостной

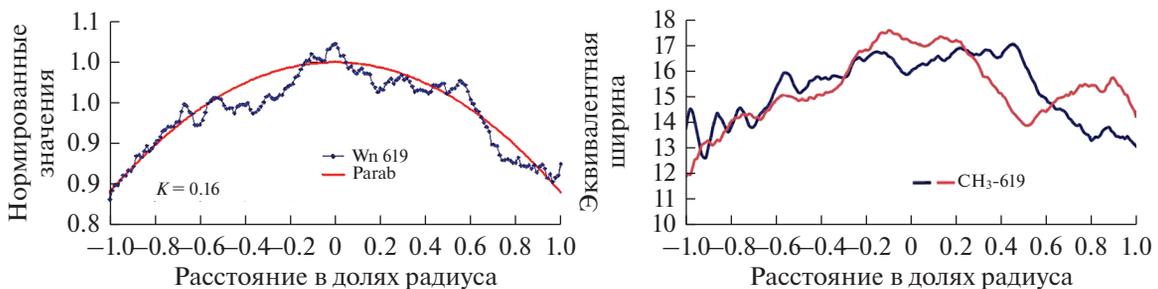


Рис. 7. То же, что на рис. 5, но для полосы поглощения CH₄ 619 нм.

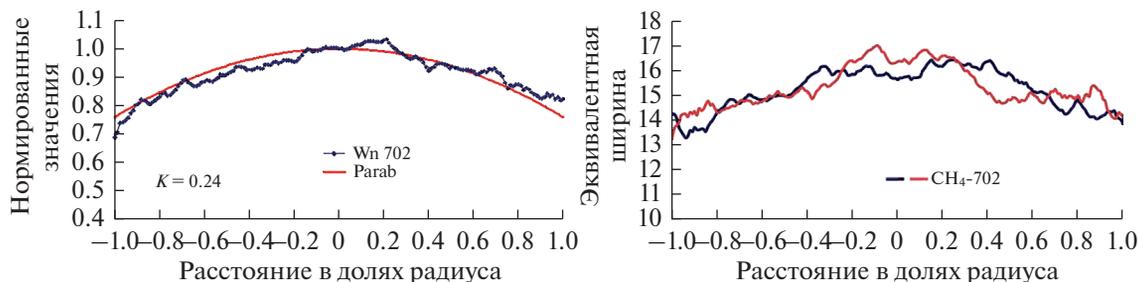


Рис. 8. То же, что и на рис. 5, но для полосы поглощения CH_4 702 нм.

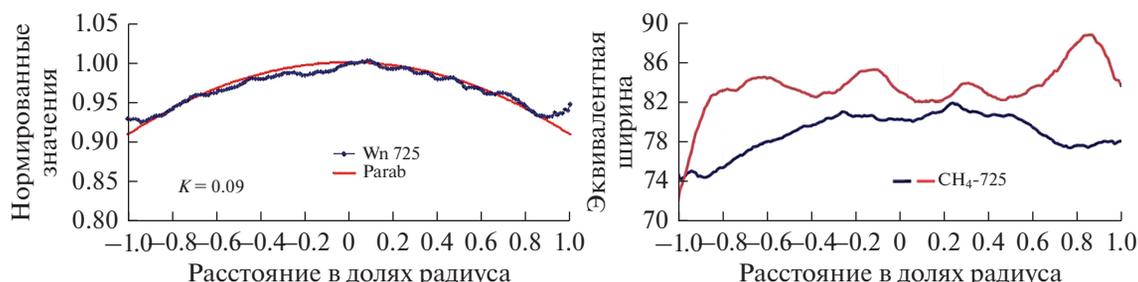


Рис. 9. То же, что и на рис. 5, но для полосы поглощения CH_4 725 нм.

температуры по широтам и долготам Юпитера. В области инфракрасного теплового излучения в диапазонах 8–14 мкм такие карты опубликованы в работах (Orton и др., 2017; Fletcher и др., 2016). Карты демонстрируют хорошо выраженный зональный характер яркостных температур с заметными локальными более холодными или более горячими областями. Особо выделяется коротковолновая область теплового диапазона вблизи длины волны 5 микрон. В этой области, хотя и в меньшей степени, чем в видимой области спектра, заметную роль в переносе излучения еще играет облачный покров Юпитера, поскольку размеры частиц аммиачных облаков, достигающие одного и более микрона, могут влиять на прохождение этого излучения. Показательно в этом отношении Большое Красное Пятно (GRS). На картах и изображениях Юпитера в длине волны около 5 мкм оно кажется наиболее темным по сравнению с другими областями планеты, несмотря на то, что именно в этой длине волны практически отсутствует поглощение молекулами метана, создавая своеобразное окно прозрачности. Известно, что в сильной полосе поглощения метана CH_4 887 нм Большое Красное Пятно выделяется как самый яркий объект на диске Юпитера. По нашим измерениям интенсивность аммиачного поглощения в полосах 645 и 787 нм в Большом Красном Пятне значительно понижена по сравнению с соседними областями планеты (Tejfel и др., 2018, В). В совокупности все эти результаты, скорее всего, свидетельствуют о существенно более высокой плот-

ности облачной среды в Большом Красном Пятне.

На рис. 10 показан долготный ход поглощения в полосе 787 нм для двух поясов Юпитера: для Южного экваториального пояса на широте Большого Красного Пятна и в Северном экваториальном поясе (NEB).

Как можно видеть, на всех долготах в указанном диапазоне заметного различия аммиачного поглощения нет. В Южном экваториальном поясе выделяется ослабление поглощения в Красном Пятне, тогда как на всех долготах пояса NEB поглощение в этой полосе заметно ниже. Для сравнения в правой части рис. 10 показан фрагмент одной из карт распределения яркостных температур в длине волны 4.7 мкм, взятый из работы Fletcher и др. (2017) для той области долгот, где находится Большое Красное Пятно. На этом фрагменте и сопутствующей ему карте в видимых лучах долготы даны в третьей системе, тогда как слева: долготы даны во второй системе.

Начиная с работы de Pater и др. (2016) по наблюдениям с помощью системы радиотелескопов Very Large Array получают результаты радиоизмерений Юпитера с высоким пространственным разрешением, на основе которых создаются карты распределения яркостной температуры в диапазонах микроволнового радиоизлучения 12–18 ГГц. Первое сравнение наших наблюдений широтного хода аммиачного поглощения на Юпитере с такими картами (Tejfel и др., 2016) показало, что отме-

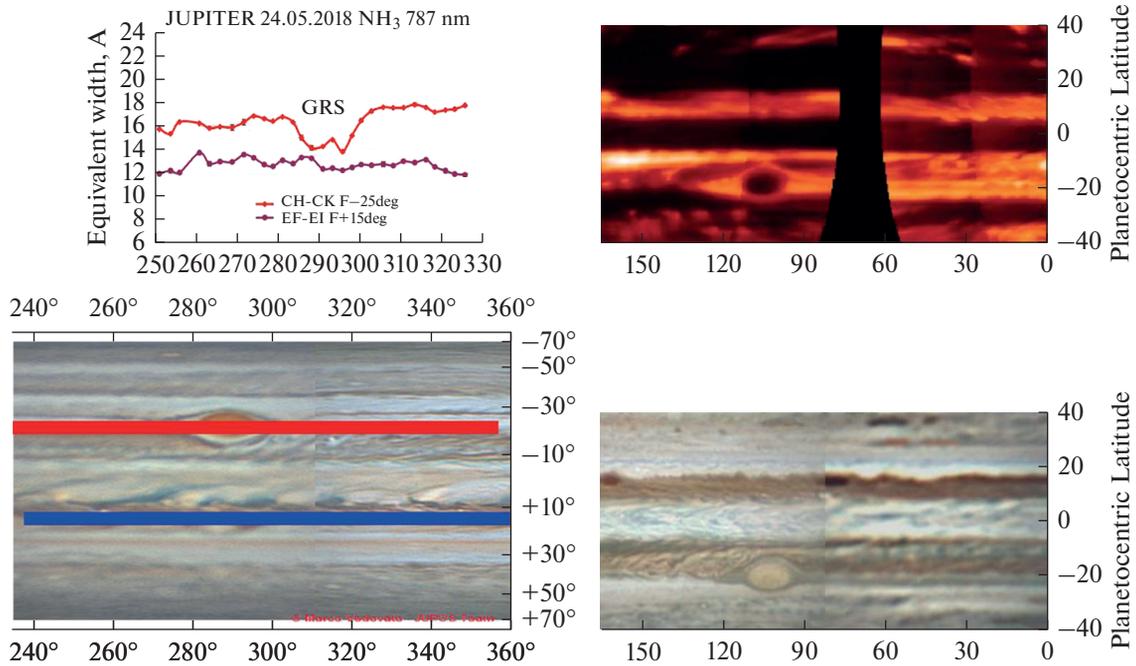


Рис. 10. Слева: сравнение долготного хода аммиачного поглощения в поясах SEB и NEB для полосы NH₃ 787 нм. Справа: фрагмент карты распределения яркостных температур на Юпитере в длине волны 4.7 мкм (Fletcher и др., 2017). Пояснения в тексте.

чаемая нами депрессия интенсивности полосы аммиака 787 нм вблизи северного экваториального пояса практически совпала по положению с зоной максимальной яркостной радиотемпературы. Поскольку выход теплового радиоизлучения на этих частотах модулируется поглощением аммиака, а облачный слой не влияет на прохождение радиоволн, из этого следует, что вариация аммиачного поглощения на Юпитере связана не только с оптическими эффектами, но и с реальными вариациями содержания аммиака в разных областях Юпитера. В последующих публикациях (de Pater и др., Wong и др.) помещаются новые карты яркостной радиотемпературы на разных частотах. Вариации теплового радиоизлучения, демонстрируемые на этих картах, отражают вместе с тем вариации аммиачного и метанового поглощения, влияющего на положение эффективной глубины выходящего радиоизлучения. Мы попробовали сравнить наши данные о широтном ходе интенсивностей полос поглощения метана и аммиака с серией широтных профилей яркостной радиотемпературы, опубликованных в работе de Pater и др. (2019, В). На рис. 11 в верхней части показаны графики, взятые из этой работы, по наблюдениям в 2017 г. В нижней части графика представлен относительный ход эквивалентных ширин полос поглощения метана и аммиака по нашим наблюдениям в начале 2017 г. Все кривые представляют нормированные к экваториальной зоне значения эквивалентных ширин в относительных

единицах, но нанесены они со сдвигом по вертикали. Пространственное разрешение на этих кривых, конечно, значительно хуже. Однако хорошо заметно, что депрессия аммиачного поглощения в полосе 787 нм по положению совпадает с резким максимумом яркостной температуры, наблюдаемым на широте около 15°, т.е. вблизи северного экваториального пояса.

Разумеется, корректного сравнения двух систем графиков в отдельных деталях пока провести невозможно ввиду различий в пространственном разрешении, но можно отметить некоторую, хотя и не очень четко выделяющуюся, тенденцию повышения яркостных радиотемператур к высоким широтам. При этом у полос поглощения метана и аммиака прослеживается обратная тенденция - уменьшение к высоким широтам. Это можно рассматривать как согласие результатов радионаблюдений и оптических наблюдений, поскольку повышение яркостных радиотемператур как раз и должно быть связано с уменьшением содержания метана и аммиака и ослаблением их поглощения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Слабые полосы поглощения метана и аммиака, наблюдаемые в видимой и самой ближней инфракрасной области спектра Юпитера, могут служить неплохим средством для дистанционного оптического зондирования юпитерианской тропосферы, включая аммиачный облачный слой и

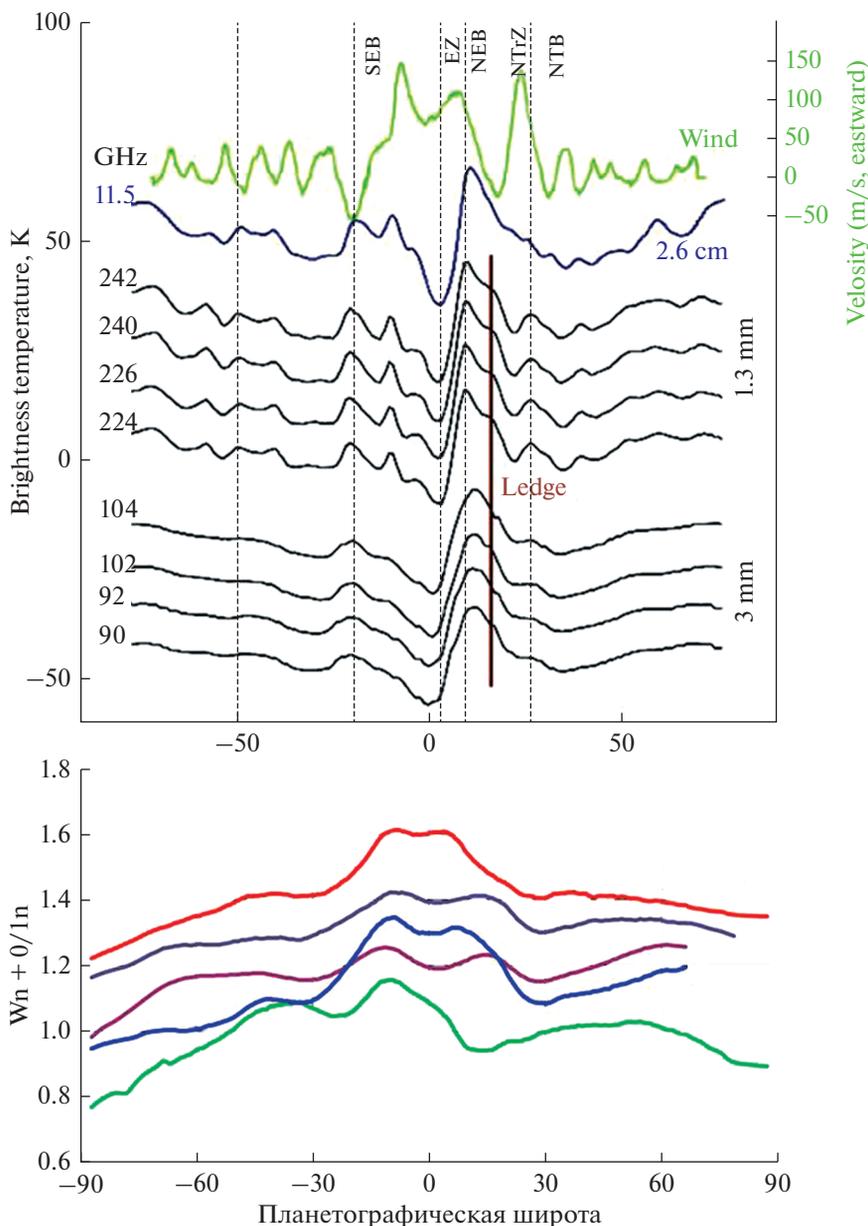


Рис. 11. Сравнение широтных вариаций яркостных температур в ряде диапазонов микроволнового радиоизлучения (de Pater и др., 2019, В) и нормированных к экватору эквивалентных ширин полос поглощения метана и аммиака в видимой области спектра. 1 – NH_3 645 nm, 2 – CH_4 619 nm, 3 – CH_4 702 nm, 4 – CH_4 725 nm, 5 – NH_3 787 nm.

более глубокие ее участки. К сожалению, пока трудно говорить о корректной интерпретации всех наблюдаемых вариаций интенсивностей этих полос в разных областях Юпитера, поскольку, несмотря на многочисленные наблюдения и теоретические расчеты, в представлениях о реальной структуре облачного покрова и нижележащей тропосферы пока нет определенной картины.

Как уже было отмечено выше, наблюдаемые вариации молекулярных полос поглощения должны рассматриваться как свидетельства наличия зональных и локальных неоднородностей в

структуре той части тропосферы Юпитера, которая участвует в формировании этих полос. Как крайние случаи можно назвать две альтернативные модели. Первая предполагает существование геометрически и оптически толстого аммиачного облачного слоя. Сквозь этот слой вглубь атмосферы может проникать только часть рассеянного излучения, тогда как прямой солнечный свет сквозь этот слой не проходит. В таком случае теория переноса излучения может рассматривать этот слой как полубесконечный (в принятой терминологии). Практически все наблюдаемое поглощение

в слабых и умеренных молекулярных полосах формируется в процессе многократного рассеяния внутри этой облачной среды. Небольшая доля поглощения у полос метана может создаваться в надоблачной атмосфере, тогда как концентрация аммиака над облачным слоем резко уменьшается на несколько порядков. В этой модели наблюдаемые вариации поглощения могут быть связаны с вариациями концентрации и объемного коэффициента рассеяния облачных частиц и некоторых других факторов, влияющих на эффективный путь поглощения. Величина этого пути оценивается по интенсивности абсорбционных полос и не может считаться оценкой относительного содержания поглощающего газа в тропосфере.

В альтернативной модели предполагается, что аммиачный облачный слой имеет относительно небольшую геометрическую толщину и пропускает значительную часть прямой солнечной радиации вглубь атмосферы. В таком случае прямой солнечный свет, по меньшей мере, доходит до более глубокого облачного слоя. Таким слоем, согласно большинству моделей атмосферы Юпитера, является слой гидросульфида аммония NH_4SH . Это вещество обладает значительной окраской, но его альbedo пока не известно. Если оно не слишком близко к нулю, то некоторая часть диффузно отраженного этим слоем солнечного света может выходить наружу. При этом интенсивность наблюдаемых полос поглощения будет определяться двойным прохождением через толщу газа, находящуюся между двумя облачными слоями. При очень темной подложке из гидросульфида аммония мы не могли бы наблюдать поглощения в чистом газе. В таком случае требуется наличие рассеивающих частиц внутри газового слоя.

Даже эти две идеализированные модели указывают на сложность процесса формирования полос молекулярного поглощения, наблюдаемых в видимой и ближней инфракрасной области спектра Юпитера. В более далекой области теплового инфракрасного и микроволнового радиационного излучения картина носит совершенно иной характер, так как аэрозольная составляющая для этих излучений прозрачна. Зональные и локальные яркостные температуры выходящего теплового излучения определяются другими факторами, как это обсуждается в целом ряде работ исследователей Юпитера в этих диапазонах электромагнитных волн.

Трехоблачная модель тропосферы Юпитера рассматривается многими авторами, начиная с публикации Lewis (1969), Weidenschilling and Lewis (1973). Мы рассмотрели ряд публиковавшихся моделей такого рода авторов, приведенных в табл. 3, различающихся в основном принимаемыми исходными значениями содержания кон-

денсифицирующихся газов. Оценки максимальных значений концентрации частиц в аммиачном облачном слое в этих моделях, как правило, относятся к основанию облачного слоя и колеблются от 1×10^{-6} до 7×10^{-6} г/см³. Во всех моделях плотность облаков убывает с высотой, но полная толщина аэрозольного слоя может составлять 10 и более км. Однако следует отметить несоизмеримость горизонтального и вертикального масштаба деталей облачного покрова Юпитера, поскольку даже самые мелкие детали, различимые на лучших наземных снимках планеты, имеют горизонтальную протяженность в 1000 и более километров. Поэтому вполне возможны значительные локальные вариации толщины и плотности у аммиачного облачного слоя.

Что касается вопроса о наличии рассеивающей среды в пространстве между аммиачным и гидросульфидным облачными слоями, то пока можно сослаться лишь на уникальный эксперимент по прямому зондированию атмосферы Юпитера спускаемым аппаратом в проекте Galileo Jupiter Mission (1998). Хотя считается, что зонд попал в не совсем типичную область планеты. Судя по данным нефелометра зонда, существует малоплотная аэрозольная дымка, поднимающаяся над облачным слоем из гидросульфида аммония.

Для интерпретации результатов исследований поведения молекулярных полос на диске Юпитера кроме теории необходимы и лабораторные данные об этих полосах. Аммиачные полосы в видимой области спектра исследовались в работах (Giver и др., 1975; Lutz, Owen, 1980). А также обсуждались в недавних работах (Bowles и др., 2008; Bowles, 2009, Irwin и др., 2018; 2019). Что касается полос поглощения метана упомянем Fink и др. (1977), а также работу Karkoschka (1994), в которой по спектру Юпитера выведены коэффициенты поглощения для полос метана. Для нас представляют интерес кривые роста, показывающие зависимость между эквивалентной шириной полосы поглощения от эквивалентного пути поглощения в единицах — м-амаго, которые можно получить в лаборатории. Такие кривые роста были получены Lutz and Owen (1980) для полос поглощения аммиака 645 нм и метана 619 нм. Слабые и умеренные полосы приходятся на линейную часть кривой роста, так что для полосы 645 нм один ангстрем эквивалентной ширины соответствует эквивалентному пути 4 м-амаго, а для полосы 619 нм — эквивалентная ширина в один ангстрем требует эквивалентного пути в 22 м-амаго. Используя средние данные по перечисленным выше моделям атмосферы, можно показать, что при формировании этих полос внутри межоблачного газового слоя их эквивалентные ширины могут быть близкими или даже совпадать с наблюдаемыми. Это означает, что разделить две обсуждаемые выше модели формирования полос

Таблица 3. Граничные характеристики межоблачного пространства на Юпитере по моделям разных авторов

Авторы	Аммиак, облака, P_1 – P_2 , границы	Гидросульфид, P_3 – P_4 , границы	Температура T_2 – T_3
Weidenschilling–Lewis 1973	0.60–0.80	1.10–2.40	157–170
Moreno–Molina 1991	0.30–0.60	1.00–2.10	140–160
Sanchez–Lavega 2003	0.50–0.80	1.58–2.50	150–
Atreya и др. 2005	0.40–0.85	1.32–2.20	155–190
Wong и др. 2015	0.50–0.82	1.31–2.30	150–190
Fletcher и др. 2017	0.60–0.80	1.50–2.50	150–
Cosentino R.G. 2017	0.55–0.70	1.62–2.00	148–
Bjoraker G.L. 2018	0.30–0.70	1.10–2.00	147–165
Grassi D. 2018	0.50–0.75	1.31–2.25	148–190
de Pater и др. 2019	0.20–0.80	1.18–2.50	150–170
Ragen и др. 1998	0.50–0.53	1.00–2.30	140–160

молекулярного поглощения может быть довольно сложно без дополнительного анализа большого комплекса наблюдательных данных. В этот комплекс должны входить как измерения в видимой области спектра, так и успешно ведущиеся сейчас исследования в области теплового инфракрасного и микроволнового излучения.

Вопрос о некоторых свойствах верхнего облачного слоя на Юпитере, состоящего из кристаллов замерзшего аммиака, до сих пор остается предметом дискуссии. Довольно разнообразные световые оттенки облачных деталей говорят о присутствии в этих кристаллах или отдельно некоторого вещества – хромофора или нескольких веществ, влияющих на окраску самих по себе бесцветных аммиачных кристаллов. Обсуждаются даже модели с находящимся внутри облачного слоя отдельного слоя хромофоров (Braude и др., 2020), а красный цвет центральной части Большого Красного Пятна предлагается объяснить наличием некой окрашенной пленки над основным облаком в Пятне (Baines и др., 2019). В свете этих предположений хотелось бы обратить внимание на появление очень редких и небольших по размерам темно-коричневых облачных образований, появляющихся в основном в Северной Тропической зоне и именуемых “баржами”, за их специфическую конфигурацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы не ставили целью данной статьи подробный отчет о проведенных в последние годы спектральных наблюдениях Юпитера, материал которых измеряется тысячами полученных спектрограмм. Мы хотели обратить особое внимание на необходимость и важность дальнейшего изучения поведения слабых и умеренных полос поглощения метана и аммиака в видимой области

спектра Юпитера, как составляющей комплекса исследований планеты в широком диапазоне длин волн. Такие дистанционные исследования, по-видимому, еще многие годы будут оставаться основным источником информации о свойствах юпитерианской атмосферы и происходящих на планете процессах.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования МОН РК 0073/ГФ4 и AP05131266.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Atreya S.K., Wong A.S., Baines K.H., Wong M.H., Owen T.C.* Jupiter’s ammonia clouds—localized or ubiquitous? // *Planet. and Space Sci.* 2005. V. 53. № 5. P. 498–507.
- Baines K.H., Sromovsky L.A., Carlson R.W., Momary T.W., Fry P.M.* The visual spectrum of Jupiter’s Great Red Spot accurately modeled with aerosols produced by photolyzed ammonia reacting with acetylene // *Icarus.* 2019. V. 330. P. 217–229.
- Bjoraker G.L., Wong M.H., de Pater I., Hewagama T., Ádámkóvics M., Orton G.S.* The gas composition and deep cloud structure of Jupiter’s Great Red Spot // *Astron. J.* 2018. V. 156. № 3. P. 101–124.
- Bowles N.* 2009. Private communication.
- Bowles N., Calcutt S., Irwin P., Temple J.* Band parameters for self-broadened ammonia gas in the range 0.74 to 5.24 μm to support measurements of the atmosphere of the planet Jupiter // *Icarus.* 2008. V. 196. P. 612–624.
- Braude A.S., Irwin P.G.J., Orton G.S., Fletcher L.N.* Colour and tropospheric cloud structure of Jupiter from MUSE/VLT: Retrieving a universal chromophore // *Icarus.* 2020. V. 338 P. 113589–113607.
- Cochran W.D., Cochran A.L.* Longitudinal variability of methane and ammonia bands on Jupiter // *Icarus.* 1980. V. 42. P. 102–110.
- Cochran W.D., Cochran A.L.* Longitudinal variability of methane and ammonia bands on Jupiter. II. Temporal variations // *Icarus.* 1983. V. 56. P. 116–121.

- Cosentino R.G., Butler B., Sault B., Morales-Juberías R., Simon A., De Pater I.* Atmospheric waves and dynamics beneath Jupiter's clouds from radio wavelength observations // *Icarus*. 2017. V. 292. P. 168–181.
- Giver L.P., Miller J.H., Boese R.W.* A laboratory atlas of the 5v1 NH₃ absorption band at 6475 Å with applications to Jupiter and Saturn // *Icarus*. 1975. V. 25. P. 34–48.
- Grassi D.* Atmospheric physics and atmospheres of Solar System bodies // *Astrophys. of Exoplanetary Atmospheres*. Springer, 2018. P. 135–199.
- Irwin P.G.J., Bowles N., Braude A.S., Garland R., Calcutt S.* Analysis of gaseous ammonia (NH₃) absorption in the visible spectrum of Jupiter // *Icarus*. 2018. V. 302. P. 426–436.
- Irwin P.G., Bowles N., Braude A.S., Garland R., Calcutt S., Coles P.A., Tennyson J.* Analysis of gaseous ammonia (NH₃) absorption in the visible spectrum of Jupiter-Update // *Icarus*. 2019. V. 321. P. 572–582.
- Fink U., Benner D.Ch., Dick K.A.* Band model analysis of laboratory methane absorption spectra from 4500 to 10500 Å // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 1977. V. 18. P. 447–457.
- Fletcher L.N., Greathouse T.K., Orton G.S., Sinclair J.A., Giles R.S., Irwin P.G.J., Encenaz T.* Mid-infrared mapping of Jupiter's temperatures, aerosol opacity and chemical distributions with IRTF/TEXES // *Icarus*. 2016. V. 278. P. 128–161.
- Fletcher L.N., Orton G.S., Rogers J.H., Giles R.S., Payne A.V., Irwin P.G.J., Vedovato M.* Moist convection and the 2010–2011 revival of Jupiter's South equatorial belt // *Icarus*. 2017. V. 286. P. 94–117.
- Karkoschka E.* Spectrophotometry of Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm Wavelength: The Methane spectrum // *Icarus*. 1994. V. 111. P. 174–192.
- Karkoschka E.* Methane, ammonia, and temperature measurements of the Jovian Planets and Titan from CCD-spectrophotometry // *Icarus*. 1998. V. 133. № 1. P. 134–146.
- Lewis J.S.* The clouds of Jupiter and the NH₃-H₂O and NH₃-H₂S systems // *Icarus*. 1969. V. 10. № 3. P. 365–378.
- Lutz B.L., Owen T.* The visible bands of ammonia: band strengths, curves of growth, and the spatial distribution of ammonia on Jupiter // *Astron. J.* 1980. V. 235. P. 285–293.
- Moreno F., Rorigdo R., Sanchez-Lavega A., Molina A.* Spectroscopic observations of the CH₄ 6190 Å and NH₃ 6450 Å absorption bands at different regions of the jovian disk // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1988. V. 74. P. 233–238.
- Moreno F., Molina A.* Jupiter's atmospheric parameters derived from spectroscopic observations in the red region during the 1988 opposition // *Astron. and Astrophys.* 1991. V. 241. P. 243–250.
- Orton G.S., Appleby J.F., Martonchik J.V.* The effect of ammonia ice on the outgoing thermal radiance from the atmosphere of Jupiter // *Icarus*. 1982. V. 52. P. 94–116.
- Orton G.S., Friedson A.J., Yanamandra-Fisher P.A., Caldwell J., Hammel H., Baines K.H., Bergstralh J.T., Martin T.Z., West R.A., Veeder G.J., Lynch D.K., Russell R., Malcom M.E., Golisch W.F., Griep D.M., Kaminski C.D., Tokunaga A.T., Baron R., Herbst T., Shure M.* Thermal maps of Jupiter: Spatial organization and time dependence of tropospheric temperatures 1980–1993 // *Science*. 1994. V. 265. P. 625–631.
- Orton G.S., Hansen C., Janssen M.A., Bolton S., Brown S., Eichstaedt G., Rogers J., Ingersoll A.P., Li Ch., Momary T.W., Tabataba-Vakili F., Fletcher L., Fujiyoshi T., Greathouse T.K., Kasaba Y., Simon A.A., Sinclair J.A., Stephens A.W., Wong M.H., Donnelley P., Sanchez-Lavega A.M., Hueso R.* Juno-Support Observing Team. Characterization of the Great Red Spot from observations by Juno and the Earth-based supporting campaign // *Amer. Astron. Soc.* 2017. 49-th DPS AASMeeting. Abstract 205.2.
- de Pater R.J., Sault B., Butler D., DeBoer M.H., Wong.* Peering through Jupiter's clouds with radio spectral imaging // *Science*. 2016. V. 352. ISSUE 6290. P. 1290–1294.
- de Pater I., Sault R.J., Wong M.H., Fletcher L.N., DeBoer D., Butler B.* Jupiter's ammonia distribution derived from VLA maps at 3–37 GHz // *Icarus*. 2019a. V. 322. P. 168–191.
- de Pater I., Sault R.J., Moeckel C., Moullet A., Wong M.H., Goullaud C., Cosentino R.* First ALMA Millimeter-wavelength Maps of Jupiter, with a Multiwavelength Study of Convection // *Astron. J.* 2019b. V. 158. № 4. P. 139–145.
- Ragen B., Colburn D.S., Rages K.A., Knight T.C.D., Avrin P., Orton G.S., Yanamandra-Fisher P.A., Grams G.W.* The clouds of Jupiter: Results of the Galileo Jupiter mission probe nephelometer experiment // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 22891–22910.
- Sanchez-Lavega A.* Observations and models of the general circulation of Jupiter and Saturn // *Lectures given at*. 2003. P. 41–63.
- Tejfel' V.G., Vdovichenko V.D., Karimov A.M., Lysenko P.G., Kirienko G.A., Bondarenko N.N., Kharitonova G.A., Filippov V.A.* On the NH₃ absorption depression observable at Northern low latitudes of Jupiter // *Amer. Astron. Soc.* 2016. 48-th DPS /EPSC 11 Meeting.
- Tejfel' V.G., Vdovichenko V.D., Lysenko P.G., Karimov A.M., Kirienko G.A., Bondarenko N.N., Filippov V.A., Kharitonova G.A., Khozhenets A.P.* Ammonia in Jupiter's atmosphere: spatial and temporal variations of the NH₃ absorption bands at 645 and 787 nm // *Sol. Syst. Res.* 2018a. V. 52. P. 480–494.
- Tejfel' V.G., Vdovichenko V.D., Lysenko P.G., Karimov A.M., Kirienko G.A., Filippov V.A., Kharitonova G.A., Khozhenets A.P.* The Great Red Spot on Jupiter: some features of the ammonia absorption // *Izvestija NAN RK, ser. fiz.-mat.* 2018b. № 3. P. 23–31.
- Tejfel' V.G., Kharitonova G.A., Glushkova E.A., Sinyaeva N.V.* Variations of the methane absorptions on Jupiter's disk from zonal CCD spectrofotometry data // *Sol. Syst. Res.* 2001. V. 35. № 4. P. 261–277.
- Weidenschilling S.J., Lewis J.S.* Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets // *Icarus*. 1973. V. 20. P. 465–476.
- Wong M.H., Atreya S.K., Kuhn W.R., Romani P.N., Mihalka K.M.* Fresh clouds: A parameterized updraft method for calculating cloud densities in one-dimensional models // *Icarus*. 2015. V. 245. P. 273–281.