

УДК 524.4

А. С. Овсак¹, А. М. Каримов², П. Г. Лысенко²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
ovsak@mao.kiev.ua

²Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова
Алматы, 050020, Казахстан

Сравнение характеристик вертикальной структуры аэрозольной составляющей атмосферы в широтных поясах Сатурна

По полученным в 2015 г. спектрам в полосах поглощения метана на $\lambda = 727$ и 619 нм отражательной способности широтных поясов Северного полушария Сатурна рассчитаны высотные зависимости аэрозольной и газовой рассеивательных составляющих эффективной оптической глубины. Оценены зональные характеристики вертикальной структуры облачного покрова Сатурна. В широтных поясах обнаружен аэрозоль, относительная концентрация которого монотонно уменьшается вглубь атмосферного столба, без признаков значительных сгущений и разрежений облаков. Наибольшее количество аэрозоля определено для широтной области 49°N , наименьшее — для области 80°N . Выявлены высотные уровни, на которых вероятны изменения размеров или природы аэрозольных частиц. Уровень атмосферы с максимальной относительной концентрацией аэрозольных частиц не был определен, однако характер полученных зависимостей указывает на его вероятное расположение в более высоких слоях атмосферы планеты-гиганта.

Ключевые слова: Сатурн, атмосфера, широтные пояса, облачный покров.

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий опубликовано значительное количество работ, посвященных анализу данных дистанционных измерений и фотоснимков диска Сатурна, а также его отдельных участков

в широком диапазоне длин волн и фазовых углов, полученных наземными обсерваториями, Космическим телескопом им. Хаббла (HST) и КА «Кассини». Тем не менее, реальные характеристики вертикальной структуры и большинство параметров аэрозольных частиц, образующих облачный покров в верхней части атмосферы планеты, все еще достоверно не определены. Первоначальные предположения исследователей о том, что внешняя часть атмосферы Сатурна покрыта многоуровневыми облаками, состоящими из аммиака, гидросульфида (или сульфида) аммония и воды (см., например, [19, 42]), так и не получили подтверждения. Существенное количество аммиака и воды зафиксировано в области формирования Большого шторма в Северном полушарии Сатурна в 2010—2011 гг., вероятно поднявшего эти вещества из нижних уровней атмосферы [33, 35, 36]. Наличие аммиака в глубоких слоях определено при исследованиях в спектральном диапазоне $\lambda = 2.2$ см [17]. Было выявлено обилие аммиака в приэкваториальной области ($10^\circ\text{N} \dots 10^\circ\text{S}$), но также и отмечено его сильное обеднение в узкой широтной полосе около 35S и в нескольких овальных участках на широтах 45°S . В то же время наличие в атмосфере Сатурна сульфида аммония (NH_4SH), способного окрашивать участки видимой поверхности диска в диапазоне оттенков от светло-желтого до красно-коричневого, до настоящего времени не подтверждено и вероятнее всего этому хромофору может быть предложена замена фосфеном [9]. Кроме того, физические условия для конденсации газообразного NH_4SH есть лишь в глубоких слоях атмосферы планеты-гиганта, поэтому согласно оценкам в работе [43] его возможное наличие там не может влиять на цвет видимой поверхности диска Сатурна, поскольку полностью экранируется атмосферными слоями большой оптической толщины, расположенными над уровнем возможной конденсации NH_4SH .

Объяснение зонально-поясной структуры у видимой поверхности диска Сатурна также все еще находится на уровне разработок и предложения идей. Усложняет анализ непостоянство условий освещенности поверхности планеты, определяемое сезонными изменениями, эллипсоидальностью орбиты планеты, а также перекрытием поверхности ее диска системой колец. С высокой вероятностью можно лишь предполагать, что аналогично Юпитеру широтная структура видимой поверхности диска Сатурна отображает глобальные и локальные процессы формирования атмосферы и указывает на различия характеристик облачных покровов на разных широтных участках. Исследования поляризационных свойств деталей диска планеты [1, 16] не показали наличия каких-либо широтных неоднородностей. Этот результат дал основание в [14] утверждать, что действительная часть показателя преломления облачных частиц и их размер в широтных поясах Сатурна практически одинаковы. Исходя из этого был сделан вывод о том, что наиболее вероятными причинами наблюдаемого различия фотометрических свойств широтных поясов могут быть: изменения объем-

ной концентрации аэрозоля, изменения оптической толщины надоблачного чисто газового слоя, изменения спектральных значений мнимой части показателя преломления облачных частиц. Ведь вариации перечисленных характеристик слабо сказываются на поляризационных свойствах атмосферы, но при этом оказывают существенное влияние на ее яркость и окраску.

В большинстве опубликованных работ о зонально-поясной структуре диска Сатурна, их результаты имеют скорее описательный характер и содержат сравнительную информацию о данных измерений отражательных и поляризационных свойств у отдельных широтных поясов. При этом мало приводится значений физических параметров облачного покрова для конкретных широтных областей, либо указываются весьма широкие пределы для возможных значений таких параметров.

О наличии увеличенной плотности у, вероятно, аммиачного облака в верхней части тропосферы в экваториальной области ($10^{\circ}\text{S} \dots 10^{\circ}\text{N}$), а также около южного полюса Сатурна свидетельствуют данные работ [3, 15, 32, 43]. Исследование [15] показало также, что в апреле 2006 г. наблюдалось существенное увеличение количества аммиака в широтных участках $23^{\circ} \dots 25^{\circ}\text{S}$ и $42^{\circ} \dots 47^{\circ}\text{N}$, причем последний соседствовал с восходящим вертикальным воздушным потоком в темном широтном поясе около 41°N .

В работе [37] по измерениям 1995 г. вдоль центрального меридиана Сатурна в двух спектральных диапазонах ($\lambda = 1.45 \dots 1.8$ мкм и $\lambda = 1.95 \dots 2.5$ мкм) для диапазона высотных уровней с давлением от 10 до 600 мбар, на всех широтах определено наличие легкой стратосферной дымки и более плотного слоя тропосферной дымки с минимумами плотности выше и ниже этого слоя. Там же выявлено, что на средних широтах в Северной полусфере тропосферная дымка располагалась глубже в атмосфере, чем на таких же широтах в Южной полусфере. Признаки наибольшего рассеяния света тропосферной дымкой определены в области между 10°S и 15°N .

В работе [31] на основе анализа снимков, полученных на HST в диапазоне длин волн $\lambda = 336 \dots 814$ нм в 1996—2001 гг. и в диапазоне $\lambda = 255 \dots 890$ нм в 2002—2004 гг., причиной появления и изменения нешироких (до 3°) широтных поясов в Южной полусфере планеты-гиганта определено изменение альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц.

В работе [38] за 16-летний период (1995—2009 гг.) для различных широтных поясов в обеих полусферах Сатурна определены и проанализированы изменения спектра планеты в полосах поглощения метана в диапазоне длин волн $\lambda = 580 \dots 890$ нм. Возможная корреляция между яркостью широтных участков диска планеты и наличием на них восходящих потоков исследована в работе [41]. Сравнение скорости ветра и характеристик локальных вихрей в широтных поясах диска планеты, а также изучение динамики образования глобальных волн в Се-

верном полушарии, выполнено в работе [7] по фотоснимкам, полученным КА «Кассини» в 2007 и 2012 гг. с применением светофильтров в непрерывном спектре ($\lambda = 752$ нм) и в полосах поглощения метана ($\lambda = 727$ и 890 нм).

В работе [11] проанализированы данные наземных измерений 2002 и 2004 гг. в диапазоне $\lambda = 2.7...5.5$ мкм с целью определения относительного количества аммиака и фосфена в широтных поясах диска Сатурна. Наконец, оригинальной причиной широтных вариаций отражающей способности диска Сатурна в работе [12] называлось осаждение обломков вещества из колец планеты-гиганта вдоль магнитных силовых линий на соответствующие участки пересечения ними видимой поверхности диска планеты. Эта гипотеза «водяного дождя» лишь сравнительно недавно была опровергнута в работе [44].

По нашему мнению, наиболее полными и близкими к проведенным в настоящей работе исследованиям широтных поясов диска Сатурна являются результаты работ [14, 40]. В частности, в работе [40] по данным измерений 1980 г. в рамках модели двухслойной атмосферы для восьми широтных поясов планеты оценены значения параметров вертикальной структуры у верхней части атмосферы. Получено, что большинство широтных поясов Сатурна различаются величиной рассеивательной составляющей оптической толщины у газового надоблачного слоя и объемной концентрацией аэрозоля в нижнем газовой-аэрозольном полубесконечном слое, а участки 10°N , 40°N и 33°S отличаются от других широтных поясов еще и значениями мнимой части показателя преломления облачных частиц.

В работе [6] на основе анализа в полосах поглощения метана на $\lambda = 619, 727, 842, 864$ и 890 нм данных измерений в 1993 г. спектральных величин геометрического альbedo Сатурна [18], была определена вертикальная структура аэрозольной составляющей у верхней части атмосферы, усредненная по всему диску планеты-гиганта. В высотном распределении верхней части облачного покрова выявлено не менее семи особенностей, определено наличие аэрозоля на уровне с давлением около 0.05 бар и тенденцию его распространения на более высокие уровни, зафиксировано достижение максимального значения относительной концентрации облачных частиц на высотном уровне с давлением около 0.3 бар, определено монотонное убывание этой концентрации, без признаков сгущений и разрежений аэрозоля на каких-либо уровнях атмосферы от уровня 0.44 бар и глубже, вплоть до уровней с давлением, превышающим 20.0 бар. Отметим, что часть результатов [6] соответствует выводам работы [39].

В апреле 2015 г. исследователями из Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (Алматы, Казахстан) были проведены спектрофотометрические измерения Сатурна в полосах поглощения метана на $\lambda = 619$ и 727 нм. Задачей настоящей работы являлась обработка этих данных с целью определения характеристик вертикальной структуры облачных покровов в широтных поясах Северного полушария Сатур-

на, а также их сравнение с результатами обработки в работе [6] данных измерений интегрального диска, полученных при сходных условиях инсоляции планеты-гиганта.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения Сатурна проводились с помощью дифракционного спектрографа SGS с ПЗС-камерой ST-7XE, обладающей плавным ходом спектральной чувствительности. Спектрограф устанавливался в 7.5-м кассегреневском фокусе 60-см телескопа РЦ-600 Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова в Алматы. Масштаб изображения спектра на матрице составлял 0.43 нм/пкл по дисперсии и 4.08 пкл на секунду дуги по изображению объекта. Спектрограммы записывались в ночь с 18 на 19 мая 2015 г. при фазовом угле планеты 0.6° . Для анализа полос поглощения метана использовались результаты измерений их профилей, нормированных к уровню непрерывного спектра.

Применяемая методика наблюдений была такой же, как и в работе [37], и состояла в получении спектрограмм центрального меридиана Сатурна и зональных спектров при ориентации входной щели спектрографа параллельно большой оси кольца. При этом зональные спектры последовательно регистрировались путем сканирования изображения Сатурна от южного до северного лимба. В общей сложности один скан состоял из 35...40 спектров. Сатурноцентрическое склонение Земли в это время было равно 24.5° , так что фактически наблюдениям было доступно только Северное полушарие.

Начальная обработка спектрограмм выполнялась по стандартной программе компании SBIG вывода цифрового массива для данного спектрографа и матрицы. Дальнейшая обработка осуществлялась с помощью электронных таблиц и состояла в вычислениях отношений измеряемых спектров в опорному спектру кольца Сатурна для выделения профилей полос поглощения метана на $\lambda = 619$ и 727 нм, с по-

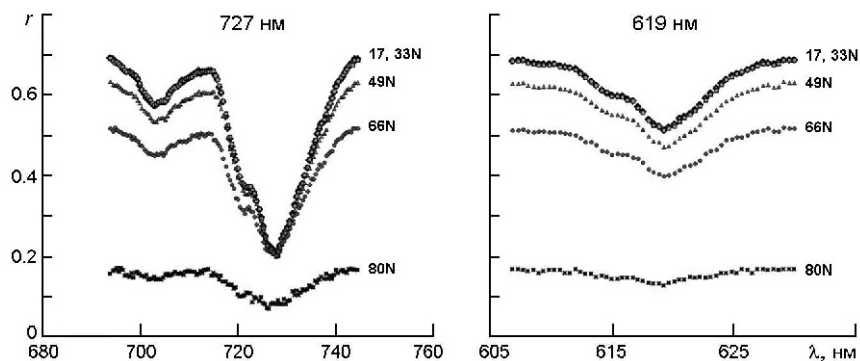


Рис. 1. Спектральные зависимости отражательной способности широтных поясов Сатурна 17N (ромбики), 33N (квадратики), 49N (треугольники), 66N (кружки) и 80N (косые крестики) в полосах поглощения метана на $\lambda = 727$ и 619 нм

следующим определением значений остаточных интенсивностей, центральных глубин и эквивалентных ширин полос в разных участках вдоль центрального меридиана планеты.

Окончательные профили полос поглощения вычислялись путем усреднения пяти соседних зональных спектров, так как широтные вариации молекулярных полос поглощения в умеренных широтах Сатурна незначительны [4].

В результате для анализа были подготовлены характеристики отражательной способности, усредненные по широтным поясам около 17°, 33°, 49°, 66° и 80° Северной полусферы Сатурна, обозначаемые далее по тексту 17N, 33N, 49N, 66N и 80N соответственно (рис. 1).

МЕТОДИКА АНАЛИЗА, ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ, МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ И ПАРАМЕТРЫ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Для анализа данных спектрофотометрических измерений планеты-гиганта нами применен метод эффективной оптической глубины (ЭОГ) [5, 10], позволяющий определять вид зависимости от давления в атмосфере величин аэрозольной и газовой рассеивательных составляющих эффективной оптической глубины. Процесс выполнения анализа данных методом ЭОГ детально описан в работах, посвященных исследованию Юпитера [22, 24—30], а также Сатурна [6, 22]. Отметим, что в отличие от работы [6], в данном исследовании обрабатываются данные измерений отражательной способности деталей диска планеты-гиганта, аналогично тому, как в работе [29] был выполнен анализ характеристик облачного покрова в широтных поясах диска Юпитера. Используемые нами исходные предпосылки, модельные параметры и характеристики атмосферы Сатурна детально уже были изложены в работе [6], поэтому здесь мы лишь коротко перечислим наиболее существенные из них, отсылая читателя за подробностями к указанной работе.

Для атмосферы Сатурна нами применяется модель полубесконечной однородной газовой-аэрозольной среды, содержащей полидисперсный ансамбль однородных сферических аэрозольных частиц. Характеристики аэрозоля усреднены по всему атмосферному столбу от внешнего края атмосферы до высотного уровня, расположенного на эффективной оптической глубине $\tau_{\text{эф}}(\lambda_i)$. Величина $\tau_{\text{эф}}(\lambda_i)$, в свою очередь, определяется по данным измерений отражательной способности широтной детали диска планеты на длине волны λ_i , согласно методике, подробно изложенной в перечисленных выше работах.

В соответствии с результатами работ [2, 6, 8, 13, 14, 35, 39] параметры аэрозольных частиц в атмосфере Сатурна, используемые нами для выполнения модельных расчетов, имеют следующие значения: эффективный радиус $r_{\text{эф}} = 1.4$ мкм и дисперсия $v_{\text{эф}} = 0.07$ для модифицированного гамма-распределения частиц по размерам, а значение де-

йствительной части показателя преломления частиц $n_r = 1.44$. Относительная концентрация метана принята нами неизменной на всех исследуемых высотных уровнях атмосферы Сатурна и имеет значение $= 0.0021$. Согласно выводам работы [28] при расчете количества поглощающего газа мы используем объемные монохроматические коэффициенты поглощения метана, переопределенные с учетом физических условий в атмосфере Сатурна в работе [21]. Учет поглощения света в непрерывном спектре выполнялся согласно методике [23].

Для расчетов использовался комплекс специальных компьютерных программных кодов, объединяющий в единое решение ряд разработанных в ГАО НАН Украины методов для решения задач теории переноса излучения, а также выполнения анализа и обработки данных дистанционных измерений планет-гигантов. Для вычислений фазовой функции и объемного коэффициента рассеяния модельной среды в комплекс интегрирован модуль программных кодов М. И. Мищенко [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Низкая отражательная способность приполярного широтного пояса 80N диска Сатурна в обеих исследованных нами полосах поглощения метана (рис. 1) соответствует малым спектральным значениям альbedo однократного рассеяния модельной среды.

Напомним, что для вычисления азимутальных гармоник коэффициента отражения моделируемой нами планетной атмосферы решением уравнения переноса излучения необходимо определить спектральные значения коэффициента диффузии k . Расчеты значений коэффициента k для газовой-аэрозольной среды с малой величиной выполняются с использованием коэффициентов разложения индикатрисы рассеяния среды по полиномам Лежандра. Значения этих коэффициентов быстро увеличиваются от ядра полосы к ее крыльям из-за увеличения вклада молекулярного рассеяния.

Также отметим, что исходные данные участка 80N отличаются от других широтных поясов значительной дисперсией (около 3.3 % в полосе $\lambda = 727$ нм и 8.0 % в полосе $\lambda = 619$ нм). Перечисленные факторы приводят к невозможности выполнить для области 80N расчеты азимутальных составляющих коэффициента отражения модельной среды, при отходе от окрестности ядра к крыльям полосы поглощения $\lambda = 727$ нм и при обработке данных во всей полосе $\lambda = 619$ нм. Поэтому характеристики этого широтного участка диска Сатурна определены нами только в окрестностях ядра полосы поглощения метана на $\lambda = 727$ нм.

Полученные зависимости от давления P аэрозольной рассеивательной составляющей $\alpha_{эф}^a$ и относительной концентрации аэрозольных частиц $\ln(\alpha_{эф}^a / \alpha_{эф}^g)$ в полосах поглощения метана $\lambda = 619$ и 727 нм

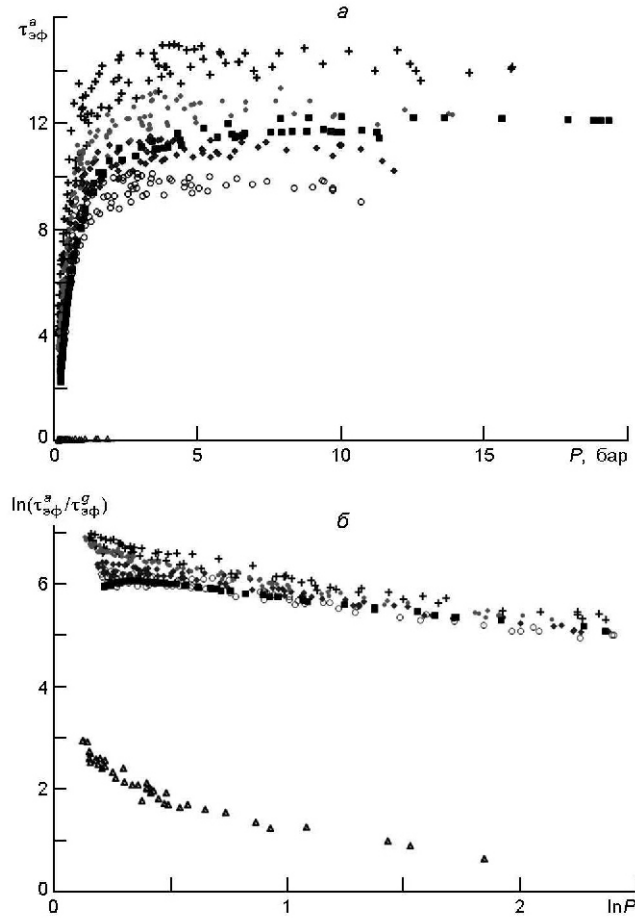


Рис. 2. Зависимости аэрозольной рассеивательной составляющей $\tau_{эф}^a$ от давления P (а) и относительной концентрации аэрозоля $\ln(\tau_{эф}^a / \tau_{эф}^g)$ от $\ln P$ (б), рассчитанные в полосе поглощения метана $\lambda = 727$ нм по данным 2015 г.: кружки — 17N, ромбики — 33N, крестики — 49N, точки — 66N, треугольники — 80N; квадратики — данные [6] за 1993 г.

для широтных поясов Сатурна 17N, 33N, 49N, 66N и 80N приведены на рис. 2—4 и в таблице. На этих рисунках также приведены полученные в 1993 г. аналогичные зависимости для интегрального диска Сатурна [6]. Видно, что характер зависимостей $\tau_{эф}^a$ и $\ln(\tau_{эф}^a / \tau_{эф}^g)$ в исследованных нами широтных поясах планеты-гиганта в целом одинаков, и в общем виде повторяет результаты работы [6].

В полосе на $\lambda = 727$ нм от высотного уровня с давлением 2.0 бар и глубже рассчитанные для интегрального диска Сатурна зависимости можно считать усреднением характеристик для широтных участков, за исключением пояса 80N, об особенностях обработки данных которого уже было сказано выше. Однако на высотных уровнях с давлением менее 2.0 бар значения величин $\ln(\tau_{эф}^a / \tau_{эф}^g)$ в широтных поясах продолжают увеличиваться с уменьшением давления, вплоть до уровня формирования ядра полосы на $\lambda = 727.6$ нм. Поэтому, в отличие от

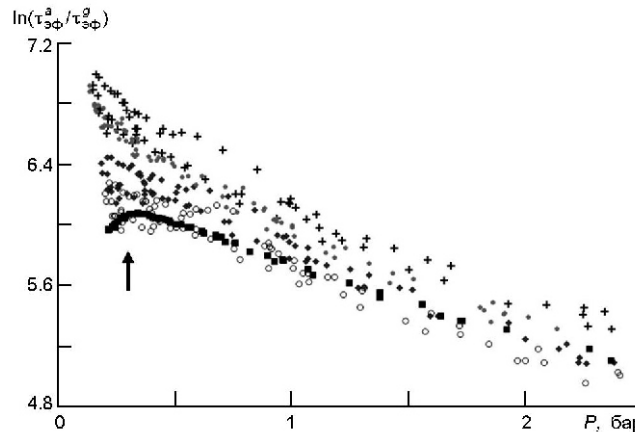


Рис. 3. Увеличенный фрагмент рис. 2б. Стрелкой отмечен высотный уровень с максимальной относительной концентрацией аэрозольных частиц в 1993 г. [6]

расчетов для интегрального диска [6], где у зависимости $\ln\left(\frac{a}{\tau_{эф}} / \frac{g}{\tau_{эф}}\right)$ определен максимум на высотном уровне с давлением около 0.3 бар, у зависимостей для широтных поясов этот максимум не достигается, а их характер указывает на его вероятное расположение в более высоких слоях атмосферы (рис. 3). Для определения с помощью метода ЭОГ высотного расположения такого максимума необходимо использовать исходные спектральные данные в более мощной полосе поглощения метана, содержащей информацию о слоях атмосферы, расположенных выше уровня формирования ядра полосы поглощения метана = 727 нм.

Зависимости, полученные в полосе поглощения = 619 нм, повторяют характеристики в полосе = 727 нм. То есть в исследованных широтных областях вид этих зависимостей на высотных уровнях от 2.0 бар и глубже напоминает характеристику полосы = 619 нм 1993 г., а на меньших глубинах, вплоть до уровня формирования ядра полосы, наблюдается продолжающееся с уменьшением давления увеличение значений относительной концентрации частиц $\ln\left(\frac{a}{\tau_{эф}} / \frac{g}{\tau_{эф}}\right)$ (рис. 4).

Аналогично результатам работы [6], методом учета поглощения в непрерывном спектре компенсировать загибы на краях обоих крыл полосы поглощения метана = 619 нм в широтных поясах Сатурна нам не удалось. Причиной этого, по нашему мнению, является влияние аммиака, имеющего полосы поглощения с ядрами на = 604 и 645 нм, с которыми пересекаются коротко- и длинноволновое крыло полосы метана на = 619 нм. Отметим, что у зависимостей $\ln\left(\frac{a}{\tau_{эф}} / \frac{g}{\tau_{эф}}\right)$ для широтных поясов 17N, 33N и 49N от уровня формирования ядра полосы до высотного уровня $P \sim 1.0$ бар наблюдается выраженное разделение коротко- и длинноволнового крыльев полосы на = 727 нм (рис. 3). Мы предполагаем, что эта особенность свидетельствует об отличии параметров аэрозольных частиц в верхних слоях атмосферы

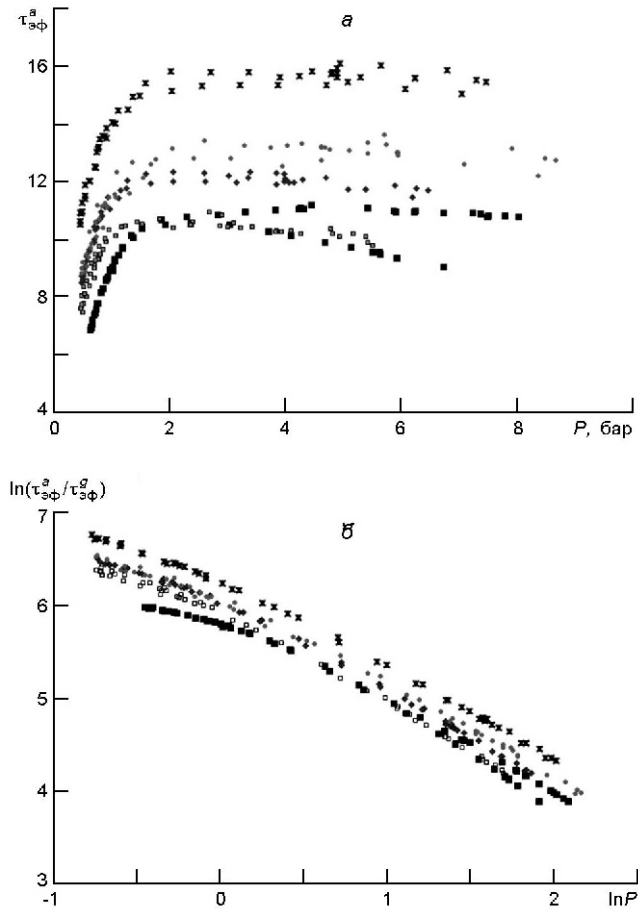


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для полосы поглощения метана $\lambda = 619$ нм (кружки — 17N, ромбики — 33N, крестики — 49N, точки — 66N, треугольники — 80N; квадратики — данные [6] за 1993 г.)

этих широтных областей от принятых нами модельных значений. В то же время характеристики широтных поясов 66N и 80N не содержат указанного разделения на аналогичных высотных уровнях. Вероятно, в этих областях модельные параметры аэрозольных частиц близки к реальным значениям.

Отмеченное на зависимости $\tau_{эф}^a(P)$ в работе [6] разделение крыльев в обеих полосах поглощения от высотного уровня с давлением 1.5 бар и глубже также проявляется для всех исследованных нами широтных участков (см. рис. 2а), за исключением пояса 80N. Однако в полосе на $\lambda = 727$ нм в широтных поясах 17N, 33N и 49N оно «замаскировано» более сильным разделением на меньших уровнях давления, а в полосе на $\lambda = 619$ нм это разделение выражено менее заметно, особенно в поясе 17N, и начинается с меньших значений давления (рис. 4а). Указанное разделение характеристик по крыльям полос поглощения для всех широтных поясов не позволило нам исследовать тонкую вертикальную структуру их облачного покрова.

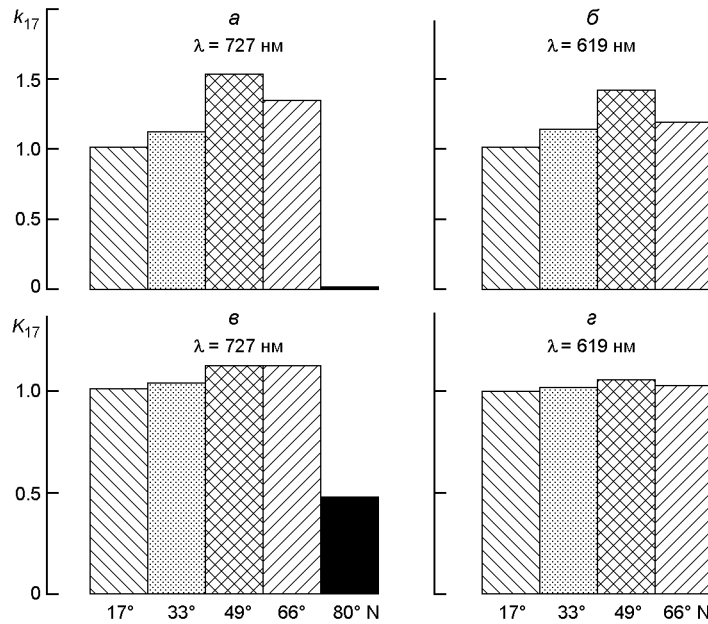


Рис. 5. Отношение k_{17} значений величины $\frac{a}{\text{эф}}$ в каждом широтном поясе диска Сатурна к значению этой величины для пояса 17N, а также аналогичное отношение K_{17} для величины $\ln(\frac{a}{\text{эф}} / \frac{g}{\text{эф}})$: а, в — в ядре полосы $\lambda = 727$ нм, б, г — в ядре полосы $\lambda = 619$ нм

По рис. 5 можно оценить различия в исследуемых широтных поясах Сатурна значений аэрозольной рассеивательной составляющей и относительной концентрации аэрозольных частиц в ядрах полос на $\lambda = 727$ и 619 нм, относительно соответствующих величин для широтного пояса 17N. Отметим, что в ядрах обеих исследованных полос поглощения метана величина $\frac{a}{\text{эф}}$ в 2015 г. имела наибольшее значение в широтной области 49N, постепенно уменьшаясь при перемещении по широте к экватору и практически скачкообразно исчезая при переходе от пояса 66N к приполярной области 80N (только для полосы $\lambda = 727$ нм). Согласно рис. 5в, г относительная концентрация аэрозольных частиц в обеих полосах поглощения также была наибольшей в поясе 49N, но лишь незначительно изменялась при переходе от одной широтной области к другой, за исключением приполярной области

Различия характеристик облачного слоя у широтных поясов диска Сатурна в ядрах полос поглощения метана $\lambda = 727$ и 619 нм

Широтный пояс	P, бар		$\frac{a}{\text{эф}}$		$\ln(\frac{a}{\text{эф}} / \frac{g}{\text{эф}})$	
	727.6 нм	619.2 нм	727.6 нм	619.2 нм	727.6 нм	619.2 нм
17N	0.204	0.491	2.630	7.485	6.154	6.324
33N	0.188	0.484	2.928	8.497	6.343	6.464
49N	0.150	0.471	4.021	10.536	6.889	6.708
66N	0.132	0.474	3.513	8.847	6.879	6.526
80N	0.123	—	0.064	—	2.950	—

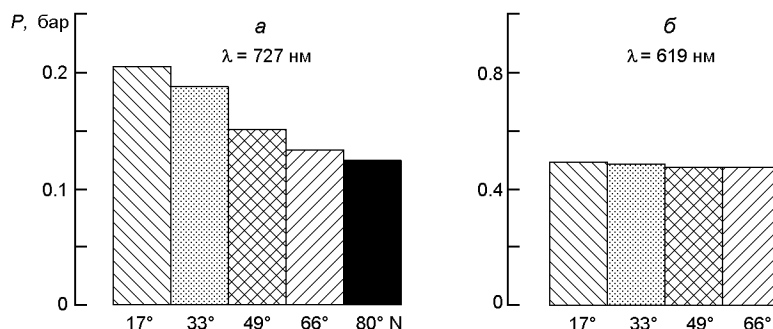


Рис. 6. Значения давления на высотных уровнях формирования ядер поглощения метана в широтных поясах: *a* — для полосы $\lambda = 727$ нм, *б* — для полосы $\lambda = 619$ нм

80N, где ее значение уменьшилось вдвое. Такие результаты указывают на однородность облачного покрова в большей части Северного полушария Сатурна, а также о резком уменьшении количества аэрозоля в его приполярной области.

Таким образом, в 2015 г. в широтном поясе 49N содержалось наибольшее количество аэрозоля, в поясе 80N — наименьшее, а в остальных поясах — промежуточное. Отметим, что полученные для пояса 49N характеристики подтверждают результаты анализа данных измерений 2006 г. в работе [15], что свидетельствует об относительной устойчивости характеристик облачной структуры в этой широтной области диска Сатурна.

Эффективные уровни формирования излучения в полосе $\lambda = 727$ нм в спектральных характеристиках исследованных широтных поясов диска планеты в 2015 г. расположились на различных глубинах (см. таблицу и рис. 6). Так, ядро полосы $\lambda = 727$ нм в поясе 17N сформировалось на уровне атмосферы с давлением около 0.2 бар. В остальных исследованных широтных поясах диска планеты ядро этой полосы формировалось на более высоких высотных уровнях, у которых разница давления с уровнем формирования в поясе 17N составила 0.016 бар для 33N, 0.054 бар для 49N, 0.072 бар для 66N и 0.081 бар для 80N.

То есть, при переходе от экватора к полюсу планеты-гиганта, глубина уровня формирования ядра полосы $\lambda = 727$ нм уменьшается, когда падающие под все большим углом к атмосферному столбу световые лучи поглощаются в толще более высоких слоев атмосферы. В то же время в полосе $\lambda = 619$ нм эффективный высотный уровень формирования спектра планеты находился на уровне около 0.5 бар в поясе 17N и лишь незначительно (в пределах 0.02 бар) уменьшился в других широтных областях. Полученные особенности свидетельствуют о том, что ядро полосы поглощения $\lambda = 727$ нм в спектральных характеристиках широтных поясов формируется в процессе однократного рассеяния света, в то время как ядро более слабой полосы на 619 нм форми-

руется на больших глубинах, в процессе многократного рассеяния, компенсирующего изменения угла падения света к нормали атмосферы.

ВЫВОДЫ

В исследованных широтных поясах Северной полусферы Сатурна выявлено наличие в 2015 г. аэрозольного слоя, относительная концентрация частиц которого уменьшается с глубиной в атмосфере. Наибольшее количество аэрозоля определено в широтной области 49N, наименьшее — на широте 80N. Зональные характеристики вертикальной структуры облачного покрова в общем похожи, но на верхних уровнях атмосферы у части широтных областей выявлены признаки отличия параметров аэрозольных частиц от принятых в работе модельных значений. Из-за разделения полученных характеристик по крыльям полос поглощения во всех широтных поясах определить тонкую вертикальную структуру у облачного покрова на верхних уровнях атмосферы не удалось. Из-за ограниченности спектрального интервала исходных данных уровень атмосферы с максимальной относительной концентрацией аэрозольных частиц не достигнут ни для одной из широтных областей, однако характер полученных зависимостей указывает на его вероятное расположение в более высоких слоях атмосферы планеты-гиганта.

Авторы выражают благодарность В. Г. Тейфелю за методические рекомендации для процесса получения и обработки данных измерений, а также А. В. Мороженко за полезные советы при выполнении анализа данных и интерпретации результатов расчетов.

1. Бугаенко О. И., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. I. Распределение поляризации по диску Сатурна. *Астрон. журн.* 1971. 48. № 2. С. 373—379.
2. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра. *Астрон. вестн.* 1975. 9. № 1. С. 13—21.
3. Видьмаченко А. П. Сезоны на Сатурне. I. Изменение отражательных характеристик атмосферы в 1964—2012 гг. *Вестн. астрон. шк.* 2015. 11. № 1. С. 1—14.
4. Каримов А. М., Лысенко П. Г., Тейфель В. Г., Харитонов Г. А. Северное полушарие Сатурна — поглощение метана и аммиака в 2015 году. *Изв. НАН РК. Сер. физ.-математическая.* 2016. № 5. С. 97—104.
5. Мороженко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера. *Письма в Астрон. журн.* 1984. 10. № 10. С. 775—779.
6. Овсак А. С. Определение вертикальной структуры аэрозольной составляющей в атмосфере Сатурна. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34. № 1. С. 57—80.
7. Blalock J. J., Draham R. L., Holmes J. A., Sayanagi K. M. Zonal wind speeds, vortex characteristics, and wave dynamics in Saturn's northern hemisphere. *Bull. American Astron. Soc.* 2013. 45. id.312.10.

8. Bugaenko O. I., Morozhenko A. V. Physical characteristics of the upper layers of Saturn's atmosphere. *Adv. Space Res.* 1981. 1. P. 183—186.
9. Carlson R. W., Baines K. H., Anderson M. S., Filacchione G., Simon A. A. Chromophores from photolyzed ammonia reacting with acetylene: Application to Jupiter's Great Red Spot. *Icarus*. 2016. 274. P. 106—115.
10. Chamberlain J. W. The atmosphere of Venus near cloud top. *Astrophys. J.* 1965. 141. N 4. P. 1184—1205.
11. Chanover N. J., Bjoraker G. L., Glenar D. A., Hewagama T., Baines K. H. Latitudinal variations of Saturn's near-infrared spectrum. Amer. Geophys. Union, Fall Meeting 2005, abstract #P11C-0135.
12. Connerney J. E. P. Magnetic connection for Saturn's rings and atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1986. 13. P. 773—776.
13. Courtin R., Gautier D., Marten A., Bezaud B., Hanel R. The composition of Saturn's atmosphere at Northern temperate latitudes from Voyager IRIS spectra: NH₃, PH₃, C₂H₂, C₂H₆, CH₃D, CH₄, and the Saturnian D/H ratio. *Astrophys. J.* 1984. 287. P. 899—916.
14. Dlugach J. M., Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P., Yanovitskij E. G. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main Astronomical Observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. *Icarus*. 1983. 54. N 2. P. 319—336.
15. Fletcher L. N., Baines K. H., Momary T. W., Showman A. P., Irwin P. G. J., Orton G. S., Roos-Serote M., Merlet C. Saturn's tropospheric composition and clouds from Cassini/VIMS 4.6-5.1 μm Nightside Spectroscopy. *Icarus*. 2011. 214. N 2. P. 510—533.
16. Hall J. S., Riley L. A. A photometric study of Saturn and its rings. *Icarus*. 1974. 23. P. 144—156.
17. Janssen M. A., Ingersoll A., Allison M.D., Gulkis S., Laraia A., Baines K., Edgington S., Anderson Y., Kelleher K. Saturn's thermal emission at 2.2-cm wavelength as imaged by the Cassini RADAR radiometer. *Icarus*. 2013. 226. N 1. P. 522—535.
18. Karkoschka E. Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000 nm wavelength: The methane spectrum. *Icarus*. 1994. 111. N 3. P. 967—982.
19. Lewis J. S. The clouds of the Jupiter's and the NH₃—H₂O and NH₃—H₂S systems. *Icarus*. 1969. 10. N 3. P. 365—378.
20. Mischenko M. The program for computing far-field light scattering by polydisperse homogeneous spherical particles using the Lorenz—Mie theory. <https://www.giss.nasa.gov/~crmim/publications/index.html>.
21. Morozhenko A. V. New determination of monochromatic methane absorption coefficients with regard to the thermal conditions in the atmospheres of giant planets. IV. Jupiter and Saturn. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2007. 23. N 6. P. 245—257.
22. Morozhenko A. V., Ovsak A. S. Dependence of the aerosol component of optical thickness and the relative concentration of methane on depth in atmospheres of giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2009. 25. N 4. P. 173—181.
23. Morozhenko A. V., Ovsak A. S. On the possibility of separation of aerosol and methane absorption in the long-wavelength spectral range for giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2015. 31. N 5. P. 225—231.
24. Ovsak A. S. Calculation of effective optical depth of absorption line formation in homogeneous semi-infinite planetary atmosphere during anisotropic scattering. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2010. 26. N 2. P. 86—88.
25. Ovsak A. S. Upgraded technique to analyze the vertical structure of the aerosol component of the atmospheres of giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2013. 29. N 6. P. 291—300.

26. Ovsak A. S. Changes in the characteristics of the upper layers of the jovian atmosphere from the data on the integral observations of the planetary disk. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2015. 31. N 1. P. 25—32.
27. Ovsak A. S. Variations of the volume scattering coefficient of aerosol in the jovian atmosphere from observations of the planetary disk. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2015. 31. N 4. P.197—204.
28. Ovsak A. S. Vertical structure of cloud layers in the atmospheres of giant planets. I. On the influence of variations of some atmospheric parameters on the vertical structure characteristics. *Solar Syst. Res.* 2015. 49. N 1. P. 46—53.
43. Ovsak A. S., Teifel' V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G. Zonal differences in the vertical structure of the cloud cover of Jupiter from the measurements of the methane absorption bands at 727 and 619 nm. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2015. 31. N 3. P. 119—130.
44. Ovsak O., Kostogryz N. The method of computer analysis a vertical structure of aerosol component in the atmospheres of the giant planets. AGU Chapman Conference on Crossing Boundaries in Planetary Atmospheres: From Earth to Exoplanets, Annapolis, Maryland. 24—28, June 2013, abstract W3.
31. Pérez-Hoyos S., Sánchez-Lavega A., French R. G. Short-term changes in the belt/zone structure of Saturn's Southern Hemisphere (1996—2004). *Astron. and Astrophys.* 2006. 460. N 2. P. 641—645.
32. Pérez-Hoyos S., Sánchez-Lavega A. On the vertical wind shear of Saturn's equatorial jet at cloud level. *Icarus*. 2006. 180. N 1. P. 161—175.
33. Sánchez-Lavega A., Fischer G., Fletcher L. N., García-Melendo E., Hesman B., Pérez-Hoyos S., Sayanagi K. M., Sromovsky L. A. The Great Saturn Storm of 2010—2011. Chapter 13 in the book «Saturn in the 21st Century» 11/2016 eprint arXiv:1611.07669.
34. Santer R., Dollfus A. Optical reflectance polarimetry of Saturn's globe and rings: IV. Aerosols in the upper atmosphere of Saturn. *Icarus*. 1981. 48. N 3. P. 496—518.
35. Sromovsky L. A., Baines K. H., Fry P. M. Evidence for Ammonia and water ices as the primary components of cloud particles in Saturn's Great Storm of 2010—2011. American Astronomical Society. 2013, DPS meeting #45, id.509.08.
36. Sromovsky L. A., Baines K. H., Fry P. M. Saturn's Great Storm of 2010—2011: Evidence for ammonia and water ices from analysis of VIMS spectra. *Icarus*. 2013. 226. N 1. P. 402—418.
37. Stam D., Banfield D., Gierasch P. J., Nicholson P. D. Near-IR spectrophotometry of saturnian aerosols — meridional and vertical distribution. *Icarus*. 2001. 152, N 2. P. 407—422.
38. Tejfel V. G., Karimov A. M., Kharitonova G. A., Kirienko G. A. Spectrophotometric study of Saturn's atmosphere during a 16-year period (1995—2010). *Astron. and Astrophys. Transact.* 2013. 2. N 28. P. 121—134.
39. Temma T., Chanover N. J., Simon-Miller A. A., Glenar D. A., Hillman J. J., Kuehn D. M. Vertical structure modeling of Saturn's equatorial region using high spectral resolution imaging. *Icarus*. 2005. 175. N 2. P. 464—489.
40. Vidmachenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V. Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk. *Solar System Res.* 1984. 17, N 4. P. 164—171.
41. Vincent M. B., Clarke J. T., Trauger J. T. The correlation of zonal bands and zonal winds in HST/STIS images of Jupiter and Saturn. American Astronomical Society 10/2000, DPS Meeting #32, id.10.11. Bull. Amer. Astron. Soc. 2000. 32. P. 1008.
42. Weidenschilling S. J., Lewis L. S. Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets. *Icarus*. 1973. 20. N 4. P. 465—476.
43. West R. Clouds and aerosols in Saturn's atmosphere. Saturn Science Conference 'Saturn in the 21st Century', The Pyle Center University of Wisconsin-Madison 4—7 August 2014. URI: http://www.ssec.wisc.edu/meetings/21st_saturn/program/Oral

_Presentations/Oral_Presentations_08062014/1.%20West_oral_SatSciConf2014.pdf.

44. West R. A., Li Liming A Ring-‘rain’ influence for Saturn’s cloud albedo and temperatures? Evidence pro or con from Voyager, HST, and Cassini. American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.502.08.

Статья поступила в редакцию 06.07.2017

О. С. Овсак¹, А. М. Каримов², П. Г. Лисенко²

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

²Астрофізичний інститут ім. В. Г. Фесенкова, Алмати, Казахстан

ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ АЕРОЗОЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ АТМОСФЕРИ В ШИРОТНИХ ПОЯСАХ САТУРНА

За отриманими у 2015 р. спектрами у смугах поглинання метану на $\lambda = 727$ і 619 нм відбивної здатності широтних поясів Північної півкулі Сатурна розраховано висотні залежності аерозольної і газової розсіювальних складових ефективної оптичної глибини. Оцінено зональні характеристики вертикальної структури хмарного покриву Сатурна. У широтних поясах виявлено аерозоль, відносна концентрація якого монотонно зменшується вглиб атмосферного стовпа, без ознак значного згущення і розрідження хмар. Найбільшу кількість аерозолю визначено для широтної області 49°N , найменшу — для області 80°N . Виявлено висотні рівні, на яких можливі зміни розмірів або природи аерозольних частинок. Рівень атмосфери з максимальною відносною концентрацією аерозольних частинок не було визначено, однак характер отриманих залежностей вказує на його ймовірне розташування в більш високих шарах атмосфери планети-гіганта.

Ключові слова: Сатурн, атмосфера, широтні пояси, хмаровий покрив.

A. S. Ovsak¹, A. M. Karimov², P. G. Lysenko²

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

²Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF THE VERTICAL STRUCTURE OF ATMOSPHERE'S AEROSOL COMPONENT IN LATITUDINAL BELTS OF SATURN

With using of spectral values of the reflectivity of latitudinal belts of the Northern hemisphere of Saturn measured in 2015 in the methane absorption bands at 727 and 619 nm, the altitude dependences of the aerosol and gas scattering components of the effective optical depth were calculated. Zonal characteristics of the vertical structure of the cloud cover of Saturn are determined. A presence of an aerosol has been identified in all latitudinal belts. The relative concentration of aerosol particles decreases monotonically into the depth of atmospheric column, without attributes of significant condensation and rarefaction of clouds. The greatest amount of aerosol was determined for the latitude region of 49°N and the smallest quantity for 80°N . An altitude level have been identified at which may alter the size and / or the refractive index of aerosol particles. The atmospheric level with the maximum relative concentration of aerosol particles has not been determined, but the nature of obtained dependences indicates its probable location in the higher layers of the atmosphere of the giant planet.

Keywords: Saturn, atmosphere, latitudinal belts, cloud cover.