



ISSN 2411-6602 (Online)

ISSN 1607-2855 (Print)

Том 16 • № 1 • 2020 С. 22 – 32

<https://doi.org/10.18372/2411-6602.16.04>

УДК 523.68

Отличие равноденствия Сатурна 2010 от трех предыдущих

А.П. Видьмаченко^{1,2}

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, 03041, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15

²Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03143, г. Киев, ул. Академика Заболотного, 27

Плоскость экватора Сатурна имеет наклон $26,75^\circ$ к плоскости его орбиты, поэтому для его атмосферы характерны сезонные изменения. Из-за эксцентриситета $0,056$ орбиты южное полушарие получает на 25% больше энергии от Солнца, чем северное, потому что афелий Сатурн проходит летом в северном полушарии, а перигелий — летом в южном. В моменты равноденствия планета находится на среднем до Солнца расстоянии. Мы оцифровали до 200 полученных разными наблюдателями изображений Сатурна в равноденствия 1966, 1980, 1995, 2010 гг. и подготовили распределения яркости вдоль нескольких широтных поясов и по центральному меридиану в спектральном диапазоне $300...890$ нм. Используя имеющиеся фотометрические и поляриметрические данные, мы рассчитали интенсивности диффузно-отраженного от атмосферы излучения, в рамках двухслойной модели. В ней верхний слой — оптически тонкий газовый, нижний — полубесконечный газовой-аэрозольный. Параметры атмосферы были получены из сравнения наблюдательных данных с расчетными значениями. Анализ распределений метанового и ультрафиолетового (УФ) поглощений по диску за период 1964–2020 гг. показал сезонные вариации на уровнях образования видимых облаков и надоблачного тумана. Меридиональный ход поглощений в равноденствия 1966 и 1995 гг. является противоположным ходу изменений по результатам наблюдаемым в равноденствие 1980 г. Но ожидаемого в 2010 г. различия в ходе поглощения между полушариями Сатурна, такого же, какое было получено в 1980 г., не произошло. Хотя все орбитальные и физические характеристики на Сатурне в моменты четырех равноденствий повторяются, но отклик атмосферы на них получили разный. Имеющиеся сезонные модели изменения климата Сатурна хорошо соответствуют сезонным изменениям метанового и УФ поглощения в его атмосфере в равноденствия 1966, 1980, 1995 гг. Но данные наблюдений полушарий планеты в равноденствие 2010 г. показали существенно другой результат. Исследование наблюдений с Вояджеров и Кассини показали, что на уровнях тропопазы тропические регионы атмосферы Сатурна нагрелись более чем на 10 К за один год (от 1980 до 2010). Такое потепление в тропопазе существенно изменило атмосферную стратификацию, стабильность и повлияло на крупномасштабную динамику верхней тропосферы. В минимуме солнечной активности в 2010 г. существенно уменьшилась конвекция атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера; Сатурн; метановое поглощение; сезонные изменения; солнечная активность.

1. УСЛОВИЯ ОСВЕЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ

Плоскость экватора Сатурна наклонена к плоскости его орбиты на угол $B \approx 26,75^\circ$, поэтому для планеты характерно значительное различие в поступлении энергии к его различным широтам за время обращения вокруг Солнца ($\sim 29,45$ лет). Начиная с 1977 г. мы исследуем сезонные изменения, происходящие в атмосфере планеты. Наши расчеты показали [40], что из-за значения эксцентриситета около $0,056$ южное полушарие Сатурна получает в среднем на 25% больше энергии от Солнца, чем северное. Это происходит потому, что афелий орбиты Сатурн проходит летом для северного полушария, а перигелий — при лете в южном, поэтому в моменты равноденствия планета находится примерно на среднем до Солнца расстоянии. При таких условиях приток солнечной энергии к средним и полярным широтам летом и зимой может изменяться на несколько порядков [40]. К тому же большая часть зимних регионов планеты находится в тени от мощных колец Сатурна [62], дополнительно уменьшающих доступ солнечной энергии в атмосферу (рис. 1).

Такие вариации условий освещения разных широт влияют на оптические и физические параметры атмосферы и на ее вертикальную структуру. На уровнях нижней части стратосферы и верхней тропосферы образуются облака, видимые в широком спектральном диапазоне, и туман над ними, который более заметен в ультрафиолетовой (УФ) части спектра и в метановых полосах поглощения. Мы уверенно зарегистрировали изменения характеристик атмосферы и указали на изменения поступления энергии от Солнца в качестве возможной причины наблюдаемых сезонных вариаций. То есть именно они могут приводить к изменениям глубины залегания видимых аммиачных облаков и метанового поглощения. Из-за значительных вариаций наклона колец относительно наземного наблюдателя вид распределений яркости, наблюдаемых вдоль центрального меридиана, будет разной даже из геометрических представлений. К тому же кольца и планетный диск имеют разные спектральные отражательные характеристики [36, 37]. Поэтому наиболее целесообразно сезонные изменения следует изучать в участках спектра, в кото-

* Видьмаченко Анатолий Петрович; ✉ vida@mao.kiev.ua

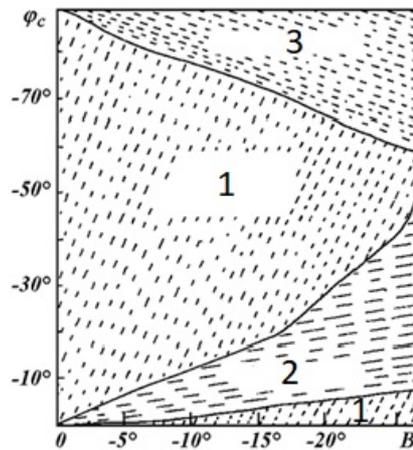


Рис. 1. Режимы освещения Солнцем широтных поясов южного полушария: 1 — регионы со свободным доступом энергии от Солнца; 2 — регионы, закрываемые кольцами; 3 — регионы в полярной ночи.

рых видны облака [1, 10, 11, 24, 38, 44, 46, 48, 52–54, 65] и надоблачный туман [5, 18, 45, 73]. Сюда относится как раз УФ область и метановые полосы поглощения.

Так, в 1966 и в 1995 гг. кольца для наземного наблюдателя были близки к исчезновению из-за их видимости с ребра, а Сатурн находился на среднем до Солнца расстоянии. В такие моменты равноденствий оба полушария Сатурна облучались одинаково, и они благоприятны для сравнения характеристик широтных поясов в противоположных полушариях. Поэтому существующие в подобные моменты различия могут быть вызваны предшествующей историей облучения разных полушарий Солнцем. После этих моментов планета приближалась к Солнцу, и кольца постепенно закрывали широтные пояса северного полушария, располагающиеся все ближе к полюсу планеты [47]. Приблизительно в 1973 и в 2002 гг. они уже полностью закрывали его выше экваториальной зоны. За исследуемое время именно в эти два момента Сатурн находился ближе всего к Солнцу, на расстоянии до 9 а.е. при лете в южном полушарии. С 1973 по 1980 и с 2002 по 2010 гг. кольца стали открывать северное полушарие, и в 1980, и около 2010 гг. они снова становились невидимыми. После этих дат кольца начали перекрывать широтные пояса все ближе уже к южному полюсу, закрывая практически все южное полушарие в 1987 и в 2017 гг. Такие циклы равноденствий повторяются при практически одинаковых условиях облучения планеты Солнцем.

2. ИЗМЕНЕНИЯ НА ДИСКЕ САТУРНА

Согласно исследованиям многочисленных изображений Сатурна, полученных начиная с 1909 г., только в южном полушарии в видимых лучах различали до 14 широтных поясов чуть светлее и темнее, но их контраст редко превышал несколько процентов [58]. На изображениях в УФ части спектра в южном полушарии видно всего 7 таких же светлых и темных параллельных экватору поясов, но при контрасте между ними — уже в десятки процентов. Такое уменьшение их количества можно объяснить еще и тем, что темный и в ультрафиолете, и в видимых лучах южный полярный регион в УФ часто доходил почти до широты -57° , тогда как в визуальной части спектра его кромка обычно располагается на широте выше -80° [58]. Все это время самой заметной деталью на диске Сатурна оставалась приэкваториальная область. Отражательные характеристики в УФ были значительно снижены по сравнению с умеренными и средними областями, а в видимом спектре и особенно в метановых полосах поглощения — она самая светлая часть диска. Широтные отличия в метановом и УФ поглощениях по диску Сатурна показали заметную асимметрию между полушариями.

В данном исследовании мы использовали все имеющиеся в нашем распоряжении в диапазоне спектра 300...890 нм распределения яркости по диску планеты в равноденствия 1966, 1980, 1995 и 2010 гг. Это были результаты наших наблюдений [12, 49, 55, 56, 59, 61–64, 70], изображения планеты, полученные на небольших телескопах многими любителями астрономии (например, [74–77]), спектральные наблюдения других исследователей [9, 14, 19, 20, 25–31, 34] и данные с космических аппаратов [2, 6, 17]. Для анализа мы отобрали около двухсот изображений планеты, полученных в видимых лучах, в УФ диапазоне и в полосах поглощения метаном с 1960-х по 2020 г. (пример см. на рис. 2) Изображения мы оцифровали и по описанной в нашей работе [66] методике получили фотометрические сканы в разных широтных поясах и по центральному меридиану от северного до южного полюсов. После этого все сканы были нормированы на яркость середины экваториальной области и приведены к одинаковому линейному размеру. Затем мы обработали эти сканы по предложенной в [21, 50, 51] методике, при которой северная часть фотометрических профилей была разделена на их южную часть для получения соответствующих волн отношений яркостей в разных длинах волн на соответствующих широтах.

Результаты исследований в полосах поглощения на длинах волн 619, 725 и 790 нм [23–27, 73] указывают на отсутствие на Сатурне монотонных изменений метанового поглощения при изменении широты и на наличие хорошо выраженных зональных изменений в поглощении. Это говорит о значительных различиях оптических параметров и структуры облаков в разных широтных поясах и о существенной несимметричности между южным и северным полушариями. Наименьшее поглощение во всех исследуемых нами полосах метана характерно для экваториальных областей. Но ход изменения поглощения по направлению к средним широтам в противоположных полушариях значительно различается.

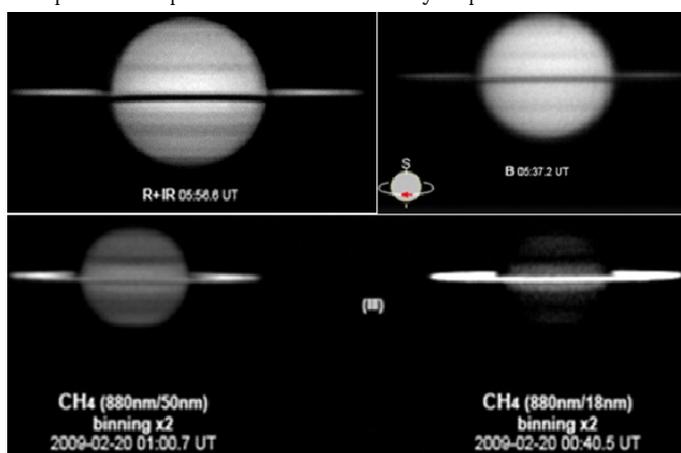


Рис. 2. Изображения Сатурна: 22.12.2008 сверху слева при ~ 630 нм, справа — в фильтре В; 19.02.2009 внизу слева 880/50 нм, справа — 880/18 нм. (<http://www.astrosurf.com/gallery/category/16-saturne/>) [77]

В каждом из полушарий вариации поглощения в средних широтах происходят по-разному. К примеру, при видимости колец с ребра в одинаковых условиях более ранней истории наблюдений Сатурна в 1966, 1995 гг., величина поглощения в регионах северного полушария существенно больше, чем в южном; до этого именно северное полушарие было открыто Солнцу. Когда после 1966 и затем после 1995 г. Сатурн снова начал приближаться к Солнцу, то результаты спектральных наблюдений показали существенное и довольно быстрое увеличение значений эквивалентных ширин во всех метановых полосах [23, 29]. Противоположный эффект наблюдался нами в 1980 г., в котором уже регионы южного полушария планеты обладали большим поглощением [46]; до этого — южное полушарие беспрепятственно освещалось Солнцем. То есть в 1966 г., как в ультрафиолете, так и в метановых полосах яркости исследуемых поясов находились в противофазе [14] к аналогичным данным, полученным в 1980 г. [18, 24, 35, 47] и в фазе с данными наблюдений 1995 г.

Таким образом, наибольшее метановое поглощение в предыдущие моменты равноденствия наблюдалось в том полушарии планеты, средние широты которого почти 14 лет были освещены солнечным светом. А в полушарии, в средних широтах которого столько же времени была зима и они были закрыты кольцами Сатурна, — там наблюдалось минимальное метановое поглощение. Также наблюдается полная антифазность спектрального хода отношений яркостей BN/BS для экваториальных областей с одной стороны, а также умеренной и полярной областей — с другой. Антифазность проявляется в том, что в УФ в 1980 г. NEZ была ярче SEZ, тогда как на умеренных широтах и в полярных регионах южное полушарие было ярче северного. В видимом и красном участках — уже SEZ ярче NEZ, а в умеренных широтах и в полярных областях северное полушарие имело большую яркость. Из наблюдений в 1980 г. для экваториальных, умеренных и полярных широтных поясов существует длина волны, при которой яркости северного и южного полушарий одинаковые. При переходе от УФ в красную область первыми выравнивались яркости умеренных широт (при 407 нм), затем в экваториальных областях (при 457 нм), а при 540 нм это произошло и в полярных регионах. В метановой полосе поглощения с длиной волны 619 нм яркости умеренных и полярных областей в 1966 г. были противофазны к таким же данным, полученным в 1980 г. с размахом амплитуды до 20%. Незначительная волна антифазности яркостей наблюдалась и в экваториальных областях; но и в 1966, и в 1980 г. SEZ была несколько ярче NEZ. Подобные результаты наблюдались и в 1995 г., когда наибольшие вариации отражательных характеристик имели место между экваториальными (SEZ и NEZ) и умеренными областями в северном и южном полушариях. То есть слой облаков в разные последовательные равноденствия 1966, 1980, 1995 гг. попеременно становился светлее в одном полушарии, и темнее — в противоположном.

Последнее из наблюдаемых равноденствий на Сатурне было в 2009–2010 гг. Во все предыдущие равноденствия 1966, 1980, 1995 гг. наблюдалась значительная асимметрия в поглощении между северным и южным полушарием [53, 59, 63], но в 2010 г. различия в поглощении между обоими полушариями в средних широтах фактически отсутствуют. До указанного момента Сатурн наклонялся к Солнцу

южным полушарием, и в нем наблюдалось увеличение метанового поглощения [26, 29]. Предполагалось, что в равноденствие 2009–2010 гг. широтное распределение метанового поглощения окажется противоположным тому, что имело место в 1995 г., повторяя ситуацию 1980 г. Но этого не случилось. И когда в 2007 г. удалось наблюдать [26] еще и часть южных областей диска Сатурна, и из-под колец начали открываться северные приполярные регионы с широтами $45^\circ - 75^\circ$, неожиданно удалось увидеть всего лишь незначительные различия в поглощении между северными и южными широтами. Такой же вывод подтвердили и наблюдения, выполненные с 2008 по 2012 гг. [31]. То есть, в отличие от четкой асимметрии в изменениях метанового и УФ поглощений между южным и северным полушариями во все предыдущие моменты равноденствий, в равноденствие около 2010 гг. отличия в поглощениях между обоими полушариями в умеренных широтах практически отсутствовали. Причем поглощение в южной части полушария, как и предполагалось, существенно возросло, тогда как в северной его части ожидаемое уменьшение поглощения отсутствовало.

3. ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

На основании имеющихся в нашем распоряжении поляриметрических и фотометрических спектральных данных при разных длинах волн с различными условиями освещения Сатурна Солнцем в разные сезоны наблюдений планеты в [62] мы представляли результаты определений оптических параметров атмосферы для моментов равноденствий планеты в 1966, 1980, 1995 и 2010 гг. В настоящей работе мы дополнили наблюдательные данные и повторили процедуру вычислений, представленную в [46, 58, 68]. Расчеты интенсивности отраженного от атмосферы излучения в участках спектра диапазона 300...890 нм проводились по программе, ранее любезно предоставленной нам Ж. Длугач [7]. Предполагалось, что отраженное излучение в рассматриваемом спектральном диапазоне формируется в атмосфере, представляемой парой однородных слоев, верхний из которых — оптически тонкий слой газа с оптической толщиной рассеивающей компоненты τ_c ; нижний — полубесконечный газовой-аэрозольный слой, который характеризуется такими параметрами, как альbedo однократного рассеяния аэрозолей в рассматриваемой полосе поглощения ω_ν и в непрерывном участке спектра ω_c . При вычислениях использовалась индикатриса рассеяния $\chi(\alpha)$, рассчитанная по физическим параметрам частиц в облаках с показателями преломления $1,35 \leq n_r \leq 1,42$, нормально-логарифмической функцией распределения их по размерам, средним радиусом ~ 1 мкм и дисперсией размеров 0,12. Затем были вычислены объемный коэффициент рассеяния облачной среды $\sigma_0(\lambda)$, параметра $\beta = \frac{\sigma_g}{\sigma_g + \sigma_a}$, объемной концентрации аэрозолей n , оценена величина $R_{\nu 0}(\lambda)$ и спектральные величины коэффициентов яркости $r_c(\lambda)$ для центральных частей поясов на экваториальных и умеренных широтах в непрерывных участках спектра и в метановых полосах поглощения. Затем для таких же поясов находились значения ω_c , $\omega_{\nu 0}$ и $\tau_{\nu 0}$ (табл. 1). Здесь использованы такие обозначения: $\omega_\nu = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \kappa + \alpha_\nu}$, $\omega_c = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \kappa}$, в которых $\sigma_0(\lambda) = \sigma_g(\lambda) + \sigma_a(\lambda)$ — величина объемного коэффициента рассеяния; κ и α_ν — объемные коэффициенты поглощения, соответственно, в непрерывном участке спектра и в полосе поглощения; σ_g и σ_a — объемный коэффициент рассеяния, соответственно, газа и аэрозоля.

Отметим, что при данных расчетах аэрозоль предполагался состоящим из аммиака, почти не поглощающего видимый свет, и небольшого количества некоторой поглощающей примеси. Затем полученные наблюдательные данные мы сравнили с расчетными значениями. Наилучшее согласие было получено при условии, что надоблачная дымка либо чисто газовая, либо содержащая мелкий аэрозоль с размером r_0 , намного меньшим 0,1 мкм. Тогда имеющиеся различия в выбранных широтных поясах Сатурна в разных $\lambda\lambda$ можно объяснить отличиями объемной концентрации в облачных аэрозолях, значений оптической толщины газового слоя над облаками τ_c , отношением концентрации аэрозолей и газа, а также спектральными значениями мнимой части использованных показателей преломления n_i частиц облаков [15, 68]. Вариации вышеуказанных характеристик очень мало влияют на поляризационные свойства, однако значительно сказываются на изменениях яркостных характеристиках планетной атмосферы.

Степень наблюдаемых различий мы оценили по полученным распределениям яркости на диске планеты в моменты равноденствий 1966, 1980, 1995 и 2010 гг. в непрерывных участках спектра и в упоминаемых выше метановых полосах поглощения. В 2010 г. в южном полушарии, которое перед этим 14 лет облучались Солнцем на широте около -9° почему-то осталось больше поглощающих примесей: $n_i = 1,70 \cdot 10^{-4}$ против $1,51 \cdot 10^{-4}$ в 1980 г, тогда как в закрытых кольцами экваториальных зонах в 2010 г. количество поглощающих примесей по какой-то причине не увеличилось. А ведь во все предыдущие три сезона в закрытых кольцами экваториальных областях примесей было обычно на 15–20% больше, чем в других регионах.

4. В ЧЕМ МОЖЕТ БЫТЬ ПРИЧИНА ТАКИХ РАЗЛИЧИЙ?

Рост поглощения метаном и водородом [34] указывает на то, что на луче зрения аэрозоли в аммиачных облаках и в надоблачном тумане стали значительно меньше закрывать аммиачный и метановый

Таблица 1. Оценки некоторых параметров в рамках двухслойной модели планетной атмосферы для четырех моментов равноденствий

φ°	$R_{i0}(\mu_0)$	$r_{i0}(\mu_0)$	τ_{i0}	$\beta \cdot 10^4$	$\sigma_0 \cdot 10^{-6}, \text{см}^{-1}$	$n, \text{см}^{-1}$	ω_c	$n_i \cdot 10^4$
1966 г.								
+30	0,281	0,677	$0,200 \pm 0,010$	41 ± 23	1,6	14	0,9967	1,70
+10	0,328	0,811	$0,158 \pm 0,015$	35 ± 19	2,2	18	0,9964	1,68
-9	0,312	0,776	$0,174 \pm 0,016$	42 ± 21	2,1	15	0,9947	2,07
-30	0,291	0,688	$0,165 \pm 0,017$	48 ± 25	1,4	12	0,9967	1,70
1980 г.								
+30	0,288	0,741	$0,116 \pm 0,008$	62 ± 20	1,3	10	0,9965	1,59
+10	0,309	0,764	$0,166 \pm 0,006$	41 ± 13	1,9	14	0,9945	2,26
-09	0,334	0,840	$0,149 \pm 0,003$	30 ± 10	2,5	19	0,9965	1,51
-30	0,261	0,709	$0,223 \pm 0,009$	47 ± 14	1,6	13	0,9960	1,81
1995 г.								
+30	0,27	0,71	$0,20 \pm 0,02$	41 ± 20	1,7	14	0,9962	1,70
+9	0,33	0,80	$0,15 \pm 0,02$	33 ± 20	2,4	19	0,9965	1,68
-9	0,31	0,76	$0,17 \pm 0,02$	43 ± 20	1,9	15	0,9952	2,10
-30	0,21	0,72	$0,18 \pm 0,02$	49 ± 20	1,4	12	0,9962	1,69
2009 г.								
+30	0,29	0,74	$0,17 \pm 0,01$	46 ± 17	1,6	13	0,9965	1,66
+9	0,32	0,83	$0,16 \pm 0,01$	41 ± 12	2,3	18	0,9963	1,72
-9	0,32	0,83	$0,15 \pm 0,02$	39 ± 11	2,3	18	0,9967	1,70
-30	0,29	0,72	$0,19 \pm 0,01$	45 ± 11	1,8	14	0,9964	1,71

газ. А это значит, что в такие годы видимый слой облаков под кольцами в обоих полушариях должен залегать довольно глубоко и надоблачная дымка там — очень разреженная. Отметим, что после нагревания солнечным светом аммиачные аэрозоли уже при температурах около 190 К сублимируются всего за несколько суток, и тогда аммиачные облака не будут пополняться необходимым материалом. В равноденствия 1966, 1980, 1995, 2010 гг. практически все орбитальные характеристики Сатурна повторяются [9, 62], но отклик на их изменение почему-то отличается только в 2010 г. С 1966 по 1973 и с 1995 по 2003 г. Сатурн, приближаясь к Солнцу, подходил к перигелию своей орбиты и по мере раскрытия колец открывался к нему южным полушарием; дальше планета отдалялась до 9,5 а.е., подходя к равноденствиям в 1980 и 2010 гг., но все это время в обоих случаях южное полушарие беспрепятственно освещалось Солнцем. Поэтому именно оно к моментам равноденствия накопило на четверть больше энергии от Солнца, чем его северное полушарие за предшествующие полупериоды обращений перед равноденствием в 1966, 1995 гг. (лето перед указанными моментами было в северном полушарии), хотя и при максимальном удалении планеты от Солнца на 10 а.е. в афелии. За счет нагревания летнего южного полушария на минимальном расстоянии около 9 а.е. после равноденствий 1966, 1995 гг. на некоторых уровнях в атмосфере могло произойти упомянутое выше испарение частиц, приводящее к снижению объемной плотности облаков [4, 32, 33]. Это, в свою очередь, приводило к усилению метанового поглощения. Но в 2008–2010 гг. после выхода атмосферных слоев северного полушария из-под колец под прямое солнечное облучение ожидаемого образования высотных аммиачных облаков не произошло; газообразный аммиак не смог конденсироваться и затем не превратился в кристаллики льда; что-то случилось такое, что не позволило для аммиака произойти переходу в лед из газа. Поэтому облака из аммиака остались глубоко в атмосфере, газовый аммиак возле тропопаузы остался довольно «теплым» и поэтому не смог превратиться в кристаллы.

Проведенный нами в [57, 60, 67] анализ наблюдательных данных указал на существование эффекта некоторого запаздывания в изменениях, происходящих как в атмосфере Сатурна, так и в атмосфере Юпитера [3, 39, 41–43, 69–72]. И время такого запаздывания на разных уровнях высоты в атмосферах планет может варьировать от нескольких месяцев до нескольких лет. Изображения Сатурна, полученные космическими аппаратами (КА) «Кассини» [9] в 2010 г., также показали ослабление конвекции [22] в атмосфере. Это вполне могло привести к изменениям объемной плотности облаков и стать причиной того, что облака остались внизу, тогда как оптическая толща дымки над облачным слоем могла незначительно возрасти. В совокупности такие процессы вполне могли привести к изменению интенсивности полос поглощения [30].

Рассмотрим возможные физические отличия равноденствия 2009–2010 гг. от предыдущих трех, учитывая, что орбитальные характеристики для всех четырех равноденствий были практически одинаковыми. Из-за различия в периодах чередования сезонов на Сатурне (29,45 лет) и в циклах солнечной активности (СА) (чуть больше 11 лет) приток световой энергии к разным полушариям Сатурна мог сильно различаться из-за того, что вышеотмеченные моменты равноденствий приходились на разные части цикла СА между минимумами и максимумами (рис. 3).

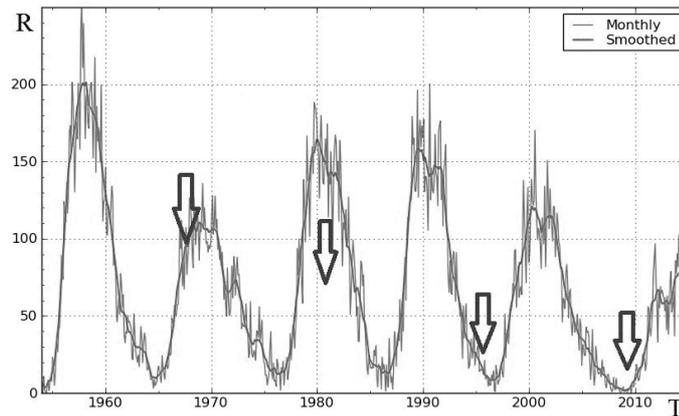


Рис. 3. Изменение значений индексов СА R (<http://sidc.oma.be/html/sidcgraphics.html>) со временем T . Стрелками показаны моменты равноденствия на Сатурне [63]

Из анализа значений параметров, которые вычислены для различных широтных областей (см. табл. 1), подтверждается вывод относительно того, что для того полушария, которое до момента наблюдений закрывалось кольцами (там долго была зима: до 1966 и до 1995 г. таким полушарием было южное, а до 1980 г. — северное) облака более разрежены, их граница вверху там расположена выше, чем в «пережившем» до этого лето. Также те экваториальные регионы Сатурна, которые долгое время были закрыты кольцами, испытывая дефицит поступления солнечной радиации к атмосфере, от других поясов отличаются повышенным количеством поглощающих примесей. Однако в 2010 г. такого не произошло (табл. 1), а в недавно вышедшей из-под колец NEZ не наблюдалось уменьшения метанового поглощения. Таким образом, в данной части атмосферы высотная дымка не образовалась. Поскольку, как правило, эти новообразования имеют преимущественно фотохимическую природу, то можно предположить, что в атмосфере почему-то не хватило энергии для образования на этих уровнях фотохимических аэрозолей, которые обычно образуются в нижней части стратосферы, или в верхней тропосфере Сатурна, и ранее не позволяли «заглядывать» глубоко в облака тропосферы, приводя к уменьшению метанового поглощения и к повышению их альбедо.

5. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АТМОСФЕРЕ САТУРНА

В земной атмосфере в годы максимумов СА почти на треть чаще [8] наблюдаются высотные облака типа цирусов. Возможно, и в атмосфере Сатурна в годы максимума СА происходит образование, а в годы минимума — разрушение аэрозольной дымки из продуктов фотолиза аммиака и метана, приводя к вариациям отражательных свойств облаков, высотной дымки, а также циклонической и антициклонической деятельности. Это проявляется в изменениях интенсивности общей циркуляции в атмосфере. Поэтому сильные изменения активности на Солнце, или заметная перестройка режима солнечного излучения, дестабилизирует атмосферу планет на определенных уровнях.

Энергетический баланс Сатурна в основном определяется поглощенной солнечной энергией, излучаемой тепловой энергией и внутренним теплом. Временная шкала изменений внутреннего тепла на планетах-гигантах обычно считается намного более длительной, чем сатурнианский год. Но две другие составляющие энергии (поглощенная солнечная энергия и излучаемая тепловая энергия) изменяются на протяжении сатурнианского года. Радиационные константы атмосферы Сатурна на разных уровнях давлений зависят от температуры, химического состава и ряда других условий, уменьшаясь от почти десятка лет на уровне облаков, до месяцев возле тропопаузы и дней — в стратосфере. Из-за удаленности от Солнца для Сатурна характерна низкая температура в фотохимически значимых областях атмосферы. Поэтому для нее характерны фотохимические процессы, преимущественно с участием углеводородов и аммиака. Отметим, что, например, полиацетилены начинают поглощать солнечное излучение уже в длине волны около 400 нм, а углеводороды — только начиная от 180 нм [56, 59]. Именно поэтому солнечный цикл, орбитальное движение и кольца могут вызывать изменения качественного и количественного составов верхних уровней атмосферы. А возникающая при этом фотохимическая дымка может дополнительно изменять доступ энергии, поступающей от Солнца, к слоям в атмосфере, в которых формируется погода. Мы предполагаем, что именно таким способом и осуществляется как прямое, так и опосредованное влияние изменения в освещении атмосферы Солнцем на структуру, кинематику и динамику видимых облаков.

Как видно из рис. 3, в равноденствия 1966, 1980, 1995 гг. индекс R , характеризующий солнечную активность, был равен, соответственно, 100, 150, 20. Но в равноденствие 2010 г. Солнце было в минимуме СА при $R \approx 0$, при котором влияние на атмосферу Сатурна облучения Солнцем было минимальным за все 4 момента равноденствий в 1964–2020 гг. При этом и конвекция в атмосфере Сатурна в 2010 г.

находилась на минимально возможных уровнях [1, 9]. Поэтому, выйдя из-под колец, облака зимнего северного полушария планеты остались глубоко, в «замороженном» состоянии при фактически полном отсутствии активных изменений на Солнце. Обычно такие процессы заметно проявляются в УФ области спектра. При отмеченных физико-химических характеристиках закрытый до этого планетными кольцами малоактивный слой облаков остался на том же глубоком уровне, значительно ниже тропопаузы. Перечисленные обстоятельства позволили земному наблюдателю продолжать беспрепятственно регистрировать метаново-аммиачный газовый слой над этими облаками [30].

Измерения атмосферной температуры [13] при тепловых наблюдениях с Вояджеров (панель А на рис. 4) и Кассини (панель В) позволили исследовать ее вертикальное распределение на уровнях с давлениями 50...750 мбар с погрешностью ~ 1 К. Полученные результаты показали наличие тропического потепления на 10 К возле уровня тропопаузы, произошедшее за один сатурнианский год от эпохи Вояджеров до эпохи Кассини. Ниже тропопаузы атмосфера также показывает небольшие колебания. Так, потепление от эпохи Вояджеров до эпохи Кассини на широте около -15° в южном полушарии на уровне облаков с давлением 360 мбар составило до 5 К и 2 К — на широте около $+15^\circ$. На экваториальных широтах между $+10^\circ$ и -10° на уровнях с давлением 150 мбар и 750 мбар произошло охлаждение на ~ 2 К.

Значительное временное изменение температуры атмосферы на 10 К в течение одного сатурнианского года является в 2–3 раза большим, чем обычное сезонное изменение на нескольких К в тех же регионах [6, 9]. То есть помимо сезонного изменения на Сатурне существуют сильные временные изменения, которые отличаются от полугодовых сезонных колебаний [16], потому что они были обнаружены в средней и высокой стратосфере Сатурна.

Анализ данных на рис. 4 показывает, что тепловая волна «пришла» из глубоких внутренних слоев атмосферы, и в результате этого как южные, так и ранее закрытые кольцами северные регионы планеты были прогреты «изнутри» до больших высот, не давая возможности подниматься видимым облакам вверх.

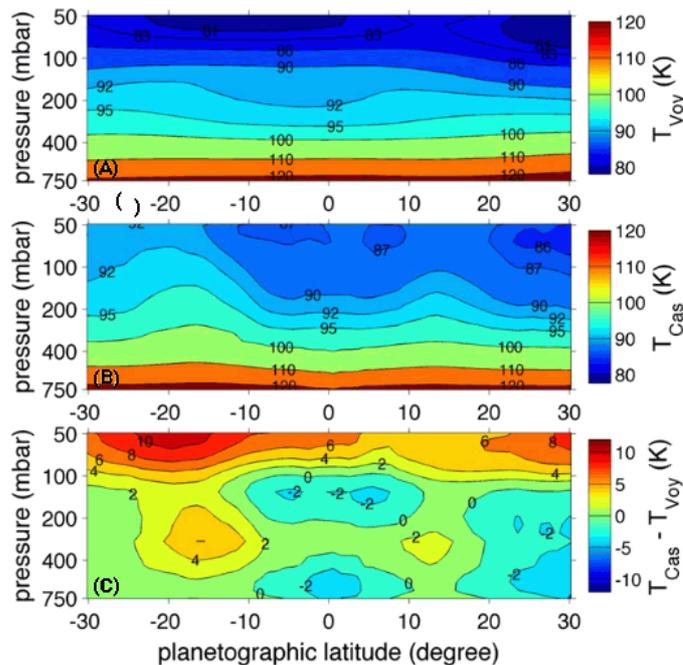


Рис. 4. Изменения температуры Сатурна от Вояджеров (А) до Кассини (В). С — различие температуры Сатурна между Вояджерами и Кассини [13].

6. ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ результатов, касающихся распределений метанового и УФ поглощений на видимых облаках Сатурна в 1964–2020 гг., показал значительные сезонные изменения. Меридиональный ход метанового и УФ поглощений в равноденствия 1966, 1995 гг. имеют симметричный ход к наблюдательным данным, которые получены в равноденствие 1980 г. И совершенно неожиданно в равноденствие 2010 г. различия в ходе метанового и УФ поглощения в северном и южном полушариях Сатурна, подобного к полученному в 1980 г., не случилось. Хотя все физические и орбитальные характеристики планеты во все равноденствия 1966, 1980, 1995, 2010 гг. фактически повторяются, но проявляются они по-разному. И в 2010 г., после выхода атмосферы из-под колец, ожидаемое образование высоких облаков не произошло. Анализ имеющихся результатов показал, что вариации излучения Солнца из-за измене-

ний в цикле солнечной активности в диапазоне длин волн 180...400 нм может быть тем физическим агентом, который позволяет связать общую циркуляцию атмосферы и цикл СА. Имеющиеся сезонные модели изменения климата Сатурна хорошо соответствуют сезонным изменениям метанового и УФ поглощения в его атмосфере в равноденствия 1966, 1980 и 1995 гг. Но данные наблюдений полушарий планеты в равноденствие 2010 г. показали существенно другой результат.

Исследование комбинированных наблюдений КА Вояджер и Кассини показали, что на уровнях тропопазы тропические области атмосферы Сатурна нагрелись более чем на 10 К за один сатурнианский год (от 1980–1981 до 2009–2010 гг.). Такое значительное потепление в тропопазе существенно изменяет атмосферную стратификацию, стабильность и влияет на крупномасштабную динамику верхней тропосферы. Оценки показывают, что учет конвекции и условий конденсации динамическая шкала времени в тропосфере Сатурна может изменяться от десятков часов до нескольких лет. В минимуме СА значительно уменьшается конвекция, и поэтому перемешивание в атмосфере Сатурна фактически отсутствует. Именно такую картину мы и наблюдали в 2007–2010 гг. в его северном полушарии.

1. *Baines K.H., Drossart P., Momary T.W., et al.* The Atmospheres of Saturn and Titan in the Near-Infrared First Results of Cassini/VIMS // *Earth, Moon, and Planets.* — 2005. — Vol. 96, No. 3–4. — P.119–147.
2. *Bezard B., Gautier D., Conrath B.* A seasonal model of the Saturnian upper troposphere Comparison with Voyager infrared measurements // *Icarus.* — 1984. — Vol. 60. — P.274–288. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(84\)90189-1](https://doi.org/10.1016/0019-1035(84)90189-1)
3. *Cess R.D., Carlson B.E., Caldwell J., et al.* Latitudinal variations in Jovian stratospheric temperatures // *Icarus.* — 1981. — Vol. 46. — P.249–255. <https://doi.org/10.1029/gi005i004p00249>
4. *Cess R.D., Cocran J.A.* Saturnian stratospheric seasonal climate model // *Icarus.* — 1979. — Vol. 38. — P.349–357. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(79\)90191-x](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90191-x)
5. *Cochran A.L., Cochran W.D.* Longitudinal variability of methane and ammonia bands on Saturn // *Icarus.* — 1981. — Vol. 48. — P.488–495. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(81\)90059-2](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90059-2)
6. *Conrath B.J., Pirraglia J.A.* Thermal structure of Saturn from Voyager infrared measurements — Implications for atmospheric dynamics // *Icarus.* — 1983. — Vol. 53. — P.286–292. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90148-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90148-3)
7. *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. — Vol. 54. — P.319–336. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90201-4](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90201-4)
8. *Эйгенсон М.С.* Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. — Львов: Издательство Львовского университета, 1957. — 230 с.
9. *Fletcher L.N., Achterberg R.K., Greathouse Th.K., et al.* Seasonal change on Saturn from Cassini/CIRS observations 2004–2009 // *Icarus.* — 2010. — Vol. 208, Issue 1. — P.337–352. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.01.022>
10. *Karkoshka E., Tomasko M.G.* Saturn's Upper Troposphere 1986–1989 // *Icarus.* — 1992. — Vol. 97, No. 2. — P.161–181. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90125-q](https://doi.org/10.1016/0019-1035(92)90125-q)
11. *Karkoshka E., Tomasko M.* Saturn's vertical and latitudinal cloud structure 1991–2004 from HST imaging in 30 filters // *Icarus.* — 2005. — Vol. 179, Issue 1. — P.195–221. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.05.016>
12. *Klimenko V.M., Morozhenko A.V., Vid'machenko A.P.* Phase effect for the brightness coefficient of the central disk of Saturn and features of Jupiter's disk // *Icarus.* — 1980. — Vol. 42, No. 3. — P.354–357. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(80)90101-3)
13. *Liming L., Richard K.A., Barney J.C., et al.* Strong Temporal Variation Over One Saturnian Year: From Voyager to Cassini // *Scientific Reports.* — 2013. — Vol. 3. — P.1–5.
14. *Marin M.* Photometric photographique de Saturne // *J. Observ.* — 1968. — Vol. 51, No. 3. — P.179–191.
15. *Morozhenko A.V., Ovsak A.S., Vid'machenko A.P., et al.* Imaginary part of the refractive index of aerosol in latitudinal belts of Jupiter's disc // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 2016. — Vol. 32, Issue 1. — P.30–37. <https://doi.org/10.3103/s0884591316010062>
16. *Orton G.S., Yanamandra-Fisher P.A., Fisher B.M., et al.* Semi-annual oscillations in Saturn's low-latitude stratospheric temperatures // *Nature.* — 2008. — Vol. 453, No. 7192. — P.196–199. <https://doi.org/10.1038/nature06897>
17. *Perez-Hoyos S., Sanchez-Lavega A., French R.G., Rojas J.F.* Saturn's cloud structure and temporal evolution from ten years of Hubble Space Telescope images (1994–2003) // *Icarus.* — 2005. — Vol. 176. — P.155–174. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.01.014>
18. *Price M.J., Franz O.G.* Saturn: UVB photoelectric pinhole scans of the disk. II // *Icarus.* — 1980. — Vol. 44, No. 4. — P.657–667. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90134-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(80)90134-7)
19. *Sanchez-Lavega A., Lecacheux J., Colas F., Laques P.* Temporal Behavior of Cloud Morphologies and Motions in Saturn's Atmosphere // *J. Geophys. Res.* — 1993. — Vol. 98, No. E10. — P.18857–18872. <https://doi.org/10.1029/93je01777>
20. *Sanchez-Lavega A., Quesada J.A.* A survey of Saturn's northern hemisphere from 1979 to 1987 // *Planet. Space Sci.* — 1988. — Vol. 36, No. 12. — P.1381–1389. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90006-2)
21. *Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Miniailo N.F.* Seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Sov. Astron. Let.* — 1983. — Vol. 9. — P.135–136.

22. Stone P.H. The Dynamics of the Atmospheres of the Major Planets // Space Science Reviews. — 1973. — Vol. 14, Issue 3–4. — P.444–459. <https://doi.org/10.1007/bf00214755>
23. Teifel V.G. Calculation of the Depths of Absorption Lines and Bands on the Disk of a Planet Surrounded by a Semi-Infinite Homogeneous Atmosphere // Solar System Res. — 1975. — Vol. 9. — P.57.
24. Teifel V.G. Optical properties and structure of Saturn's atmosphere // Solar Syst. Res. — 1980. — Vol. 14, No. 1. — P.1–16.
25. Teifel V.G. Molecular-Absorption Distribution over Saturn's Disk from the 1995 Observations Based on the Zonal CCD Spectrophotometry: Observational Results // Solar Syst. Res. — 1997. — Vol. 31, Issue 3. — P.198–206.
26. Teifel V.G., Karimov A.M., Kharitonova G.A. Comparison of the Latitudinal Variations of the Methane Absorption // Astron. Tsirkulyar. — 2010. — No. 1573. — P.1–2.
27. Teifel V.G., Usol'tseva L.A., Kharitonova G.A. Optical Properties and Structure of Saturn's Atmosphere. I. Preliminary Results of Studies of CH₄ Absorption Bands on the Planetary Disc // Sov. Astron. — 1971. — Vol. 15. — P.296–302.
28. Teifel V.G., Usol'tseva L.A., Kharitonova G.A. Optical Properties and Structure of Saturn's Atmosphere. II. Latitudinal Variations of Absorption in the 0.62- μ CH₄ Band and Characteristics of the Planet in the Near Ultraviolet // Sov. Astron. — 1973. — Vol. 17. — P.108–111.
29. Teifel V.G., Vdovichenko V.D., Karimov A.M., et al. The Space-Time Variations of the Molecular Absorption Bands on Jupiter and Saturn from 1995–2007 Observations // 39th Lunar and Planetary Science Conference, March 10–14, 2008, League City, Texas. LPI Co No. 1391. — P.1530.
30. Teifel V.G., Vdovichenko V.D., Karimov A.M., et al. Saturn at and between the equinoxes 1995 and 2009 // 41st Lunar and Planetary Science Conference, March 1–5, 2010, Woodlands, Texas. LPI Co No. 1533. — P.1250.
31. Teifel V., Vdovichenko V., Karimov A., et al. Saturn CCD-spectrophotometry in 2009 and 2010 — a comparison of near- and post-equinox latitudinal distribution of molecular absorption // European Planetary Science Congress, held 20–24 Sept., 2010, Rome, Italy. EPSC, 5. — P.322.
32. Temma T., Chanover N.J., Simon-Miller A.A., et al. Vertical structure modeling of Saturn's equatorial region using high spectral resolution imaging // Icarus. — 2005. — Vol. 175, Issue 2. — P.464–489. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.11.006>
33. Tomasko M.G., West R.A., Orton G.S., Teifel V.G. Clouds and aerosols in Saturn's atmosphere / In: Saturn. — Tucson, AZ, University of Arizona Press, 1984. — P.150–194.
34. Trajton L. Saturn: Long-Term Variation of H₂, and CH₄, Absorptions // Icarus. — 1977. — Vol. 31. — P.369–384.
35. Trajton L. Long-Term Changes in Saturn's Troposphere // Icarus. — 1985. — Vol. 63. — P.374–405. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(85\)90053-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(85)90053-3)
36. Vid'machenko A.P. Absolute electrophotometry of features of Saturn's disc / In: Physics of planetary atmospheres. — 1981. — P.113–132.
37. Vid'machenko A.P. Absolute electrophotometry of the B ring of Saturn / In: Physics of planetary atmospheres. — 1981. — P.132–138.
38. Vid'machenko A.P. The albedo of the southern equatorial region of Saturn in 1977–1981 // Astron. Vestnik. — 1984. — Vol. 18, No. 3. — P.191–198.
39. Vid'machenko A.P. On the activity of Jupiter's atmosphere // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. — 1985. — Vol. 1, No. 5. — P.91.
40. Vid'machenko A.P. The appearance of seasonal variations in Saturn's atmosphere // Kinematics Phys. Celest. Bodies. — 1987. — Vol. 3. — P.10–12.
41. Vid'machenko A.P. Giant planets — Theoretical and observational aspects // Astronomicheskii Vestnik. — 1991. — Vol. 25. — P.277–292.
42. Vid'machenko A.P. Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere // Kinematics Phys. Celestial Bodies. — 1997. — Vol. 13, No. 6. — P.21–25.
43. Vid'machenko A.P. Variations in Reflective Characteristics of Jupiter's Atmosphere // Solar System Res. — 1999. — Vol. 33, No. 6. — P.464–469.
44. Vid'machenko A.P. The electrophotometry of Saturn. I — The distribution of brightness over the equatorial regions in the spectral range of 0.3–0.6 micron // Astrometriia i Astrofizika. — 1982. — Vol. 47. — P.70–75.
45. Vid'machenko A.P. The Photometrical Features in Brightness Distribution Over Saturn's Equatorial Belt in Ultraviolet // Astronomicheskii Tsirkulyar. — 1982. — No. 1227. — P.1.
46. Vid'machenko A.P. The photometric properties of the disk of Saturn's features: Abstract of PhD thesis. — Kiev, 1983. — 18 p.
47. Vid'machenko A.P. Electrophotometry of Saturn. II — Spectral brightness distribution along the central meridian // Astrometriia i Astrofizika. — 1984. — Vol. 51. — P.56–62.
48. Vid'machenko A.P. Reflectivity of Saturn's south equatorial region from 1977 through 1981 // Astronomicheskii Vestnik. — 1984. — Vol. 18. — P.191–198.
49. Vid'machenko A.P. Seasonal Variation of Methane Absorption at Saturn's Atmosphere // Astronomicheskii Tsirkulyar. — 1984. — No. 1331. — P.1.

50. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes in the atmosphere of Jupiter // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1985. — Vol. 1, No. 5. — P.101–102.
51. *Vidmachenko A.P.* On the activity of Jupiter's atmosphere // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1985. — Vol. 1, No. 5. — P.91.
52. *Vidmachenko A.P.* Possible effect of the rings on the photometric properties of Saturn's cloud layer // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1985. — Vol. 1. — P.12–15.
53. *Vidmachenko A.P.* Reflectivity of Saturn's south equatorial region from 1977 through 1981 // *Solar System Res.* — 1985. — Vol. 18, No. 3. — P.123–128.
54. *Vidmachenko A.P.* Some dynamical parameters of the atmosphere of Jupiter // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1986. — Vol. 2, No. 1. — P.54–56.
55. *Vidmachenko A.P.* Manifestations of seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1987. — Vol. 3, No. 6. — P.9–12.
56. *Vidmachenko A.P.* Giant planets — Theoretical and observational aspects // *Astron. Vestnik.* — 1991. — Vol. 25. — P.277–292.
57. *Vidmachenko A.P.* Temporal changes in methane absorption in Jupiter's atmosphere // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1997. — Vol. 13, No. 6. — P.21–25.
58. *Vidmachenko A.P.* Periodical variations of parameters of Jupiter's and Saturn's Atmosphere: Thesis for a doctor's degree by speciality 01.03.03 — Geliophysics and physics of Solar system. — The MAO of NASU, Kyiv, November, 1999. — 36 p.
59. *Vidmachenko A.P.* Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 1999. — Vol. 15, No. 5. — P.320–331.
60. *Vidmachenko A.P.* Variations in Reflective Characteristics of Jupiter's Atmosphere // *Solar System Res.* — 1999. — Vol. 33. — P.464.
61. *Vidmachenko A.P.* Influence of solar activity on seasonal variations of methane absorption in the atmosphere of Saturn // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 2015. — Vol. 31, Issue 3. — P.131–140.
<https://doi.org/10.3103/s088459131503006x>
62. *Vidmachenko A.P.* Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964–2012 // *Astronomical School's Report.* — 2015. — Vol. 11, No. 1. — P.1–14. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.11.1001>
63. *Vidmachenko A.P.* Seasons on Saturn. II. Influence of solar activity on variation of methane absorption // *Astronomical School's Report.* — 2015. — Vol. 11, No. 1. — P.15–23. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.11.1015>
64. *Vidmachenko A.P.* The influence of solar activity on seasonal variation of the methane absorption in Saturn's atmosphere // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* — 2015. — Vol. 31, Issue 3. — P.38–53.
<https://doi.org/10.3103/s088459131503006x>
65. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies // *Astronomical School's Report.* — 2016. — Vol. 12, No. 1. — P.14–26. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.12.1014>
66. *Vidmachenko A.P.* Seasonal changes on Jupiter. I. The factor activity of hemispheres // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* — 2016. — Vol. 32, No. 4. — P.189–195. <https://doi.org/10.3103/s0884591316040073>
67. *Vidmachenko A.P.* About the time of radiation relaxation of the hydrogen-helium atmosphere, determined on the change in the activity factor of Jupiter's hemispheres // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* — 2020. — Vol. 36, No. 1. — P.24–34. <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.01.024>
68. *Vidmachenko A.P., Dlugach Zh.M., Morozhenko A.V.* Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk // *Solar System Res.* — 1984. — Vol. 17, No. 4. — P.164–171.
69. *Vidmachenko A.P., Klimenko V.M., Morozhenko A.V.* Multicolor photometry of features on the disk of Jupiter. I — Relative spectrophotometry in the 1977–1978 observing period // *Solar System Research.* — 1980. — Vol. 14, No. 2. — P.62–67.
70. *Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V., Klimenko V.M.* Phase effect for the brightness coefficient of the central disk of Saturn and features of Jupiter's disk // *Icarus.* — 1980. — Vol. 42, No. 3. — P.354–357.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(80)90101-3)
71. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Minyaylo N.F.* Seasonal activity on Jupiter? // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal.* — 1984. — Vol. 10. — P.691–695.
72. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Minyaylo N.F.* Possible period of Jovian activity and possibility of seasons // *USSR Rept.: Space. (JPRS-USP-85-004),* 1985. — P.34.
73. *West R.A., Tomasko M.G., Smith B.A., et al.* Spatially resolved methane band photometry of Saturn. I. Absolute reflectivity and center-to-limb variations in the 6190-, 7250-, and 8900-A bands // *Icarus.* — 1982. — Vol. 51. — P.51–64. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(82\)90029-x](https://doi.org/10.1016/0019-1035(82)90029-x)
74. <http://kardasis.weebly.com/> — Manos Kardasis.
75. <http://obs.nineplanets.org/obs/obslist.html> — Amateur Astronomical Observatories.
76. <http://www.acquerra.com.au/astro/gallery/jupiter/index.live> — Anthony Wesley.
77. <http://www.astrosurf.com/gallery/category/16-saturne/>

Відмінність рівнодення-2010 для Сатурна від попередніх трьох

Відьмаченко А.П.^{1,2}

¹Національний університет біоресурсів та природокористування України, 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15

²Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27

Площина екватора Сатурна має нахил $26,75^\circ$ до площини його орбіти, тому для його атмосфери характерні сезонні зміни. Через ексцентриситет 0,056 орбіти південна півкуля отримує на 25% більше енергії від Сонця, ніж північна тому, що афелій Сатурн проходить влітку в північній півкулі, а перигелій — влітку в південній. У моменти рівнодення планета знаходиться на середній до Сонця відстані. Ми оцифрували до 200 отриманих різними спостерігачами зображень Сатурна в рівнодення 1966, 1980, 1995, 2010 рр. і підготували розподіли яскравості уздовж кількох широтних поясів і по центральному меридіану в спектральному діапазоні 300...890 нм. Використовуючи наявні фотометричні і поляриметричні дані, ми розрахували інтенсивності дифузно-відбитого від атмосфери випромінювання, в рамках двошарової моделі. У ній верхній шар є оптично тонким газовим, нижній — напівнескінченний газиво-аерозольний. Параметри атмосфери були отримані з порівняння спостережних даних з розрахованими значеннями. Аналіз розподілів метанового й ультрафіолетового (УФ) поглинань по диску за період 1964–2020 рр. показав сезонні варіації на рівнях утворення видимих хмар і надхмарного туману. Меридіональний хід поглинань у рівнодення 1966 та 1995 рр. є протилежним ходу змін за результатами спостережень у рівнодення 1980 р. Але очікуваних у 2010 р. відмінностей у ході поглинання між півкулями Сатурна, такого ж, яке було отримане в 1980 р., не відбулося. Хоча всі орбітальні і фізичні характеристики на Сатурні в моменти чотирьох рівноднів повторюються, проте відгук атмосфери на них отримали різний. Наявні сезонні моделі зміни клімату Сатурна добре відповідають сезонним змінам метанового й УФ поглинання в його атмосфері в рівнодення 1966, 1980, 1995 рр. Але дані спостережень в рівнодення 2010 р. показали істотно інший результат. Дослідження спостережень з Вояджерів та Кассіні показали, що на рівнях тропопаузи тропічні регіони атмосфери Сатурна нагрілися більше ніж на 10 К за один рік (від 1980 до 2010 рр.). Таке потепління в тропопаузі істотно змінило атмосферну стратифікацію, стабільність і вплинуло на великомасштабну динаміку верхньої тропосфери. У мінімумі сонячної активності в 2010 р. істотно зменшилася ще й конвекція атмосфери.

Ключові слова: атмосфера; Сатурн; метанове поглинання; сезонні зміни; сонячна активність.

Difference between equinox-2010 for Saturn from previous three

Vidmachenko A.P.^{1,2}

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 03041, Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, Ukraine

²The Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, 03143, Academician Zabolotny str., 27, Kyiv, Ukraine

Saturn's equatorial plane has an inclination of 26.75° to the plane of its orbit. Therefore, its atmosphere is characterized by seasonal changes. Because of the eccentricity of 0.056 orbit, the southern hemisphere receives 25% more energy from the sun than the northern one, because the aphelion of Saturn occurs in the summer in the northern hemisphere, and perihelion in the summer in the southern. At the moments of equinox, the planet is at an average distance to the Sun. We digitized up to 200 images of Saturn obtained by different observers at the equinoxes of 1966, 1980, 1995, 2010, and prepared brightness distributions along several latitudinal belts and along the central meridian in the spectral range of 300...890 nm. Using the available photometric and polarimetric data, we calculated the intensities of radiation diffusely reflected from the atmosphere within the framework of a two-layer model. In it, the upper layer is an optically thin gas layer, the lower one is a semi-infinite gas-aerosol layer. The atmospheric parameters were obtained by comparing the observational data with the calculated values. Analysis of the distributions of methane and ultraviolet (UV) absorption over the disk for the period 1964–2020. showed seasonal variations in the levels of formation of visible clouds and above-cloud fog. Meridional course of absorptions at equinoxes in 1966 and 1995 is the opposite of the course of changes obtained from observations at the 1980 equinox. But the expected difference in the course of absorption between the hemispheres of Saturn in 2010, and as that obtained in 1980, did not occur. Although all the orbital and physical characteristics on Saturn are repeated at the moments of the four equinoxes, the response of the atmosphere to them was different. The available seasonal models of Saturn's climate change are in good agreement with seasonal changes in methane and UV absorption in its atmosphere at the equinoxes of 1966, 1980, 1995. But the data from observations of the planet's hemispheres at the 2010 equinox showed a significantly different result. A study of observations from Voyagers and Cassini showed that at tropopause levels, the tropical regions of Saturn's atmosphere warmed by more than 10 K in one year (from 1980 to 2010). Such warming in the tropopause has significantly altered atmospheric stratification, stability, and influenced the large-scale dynamics of the upper troposphere. At the minimum of solar activity in 2010, atmospheric convection also significantly decreased.

Keywords: atmosphere; Saturn; methane absorption; seasonal changes; solar activity.

Надійшла до редакції / Received 10.08.2020

Виправлена авторами / Revised 15.09.2020

Прийнята до друку / Accepted 18.09.2020