

УДК.523.4

**А. П. Видьмаченко**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
e-mail: vida@mao.kiev.ua

**Влияние активности Солнца на сезонное изменение поглощения метана в атмосфере Сатурна**

*Анализ результатов наблюдений о распределении метанового поглощения по диску Сатурна за период с 1965 по 2011 гг. показал сезонные изменения на уровнях видимых облаков и надоблачной дымки. Меридианный ход метанового поглощения в моменты равноденствий в 1966 и 1995 гг. находится в противофазе к аналогичным данным, полученным в равноденствие 1980 г. По наблюдениям в равноденствие 2009 г. ожидаемого (аналогичного до 1980 г.) различия в метановом поглощении между южным и северным полушариями на средних широтах Сатурна не произошло, хотя все физико-орбитальные характеристики Сатурна в моменты равноденствий 1966 и 1980, а также 1995 и 2009 гг. практически повторяются. За несколько лет до моментов равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. активность Солнца была довольно высокой, а перед равноденствием в 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности. Исследования показывают, что при учете конденсации и конвекции динамическая шкала времени в средней тропосфере Сатурна может составлять несколько десятков часов. Тогда большие изменения инсоляции в УФ-участке спектра могут привести к значительным краткосрочным динамическим изменениям. В момент равноденствия в 2009 г. конвекция в атмосфере Сатурна пребывала на минимально возможном уровне, и поэтому после выхода из тени колец глубокие облачные слои в зимнем северном полушарии планеты остались в «замороженном» состоянии при практически полном отсутствии активных процессов на Солнце. Поэтому закрытый до этого момента кольцами малоактивный облачный слой остался на прежнем уровне ниже уровня тропопаузы. Это позволило беспрепятственно регистрировать мощный надоблачный слой газообразных метана и аммиака. Из-за этого метановое поглощение в малоактивном зимнем до этого полушарии осталось практически одинаковым и равным поглощению в бывшем летнем полушарии.*

*ВПЛИВ АКТИВНОСТІ СОНЦЯ НА СЕЗОННІ ЗМІНИ ПОГЛИНАННЯ МЕТАНУ В АТМОСФЕРІ САТУРНА, Відьмаченко А. П. — Аналіз результатів спостережень про розподіл метанового поглинання по диску Сатурна за період з 1965 по 2011 рр. показав сезонні зміни на рівнях видимих хмар і надхмарного серпанку. Меридіанний хід метанового поглинання у моменти рівнодень в 1966 і 1995 рр. перебуває у протифазі до аналогічних даних, отриманих в рівнодення 1980 р. За спостереженнями в рівнодення 2009 р. очікуваної (аналогічного до 1980 р.) зміни у метановому поглинанні між південною і північною півкулями на середніх широтах Сатурна не відбулося, хоча всі фізико-орбітальні характеристики Сатурна у моменти рівнодень 1966 і 1980, а також 1995 і 2009 рр. практично повторюються. За кілька років до моментів рівнодень в 1966, 1980 і 1995 рр. активність Сонця була досить високою, а перед рівноденням у 2009 р. Сонце перебувало у мінімумі активності. Дослідження показують, що при врахуванні конденсації і конвекції динамічна шкала часу в середній тропосфері Сатурна може становити кілька десятків годин. Тоді великі зміни інсоляції в УФ-ділянці спектру можуть привести до значних короткострокових динамічних змін. У момент рівнодення в 2009 р. конвекція в атмосфері Сатурна перебувала на мінімально можливому рівні, і тому після виходу з тіні кілець глибокі хмарні шари в зимовій північній півкулі планети залишилися в «замороженому» стані при практично повній відсутності активних процесів на Сонці. Тому закритий до цього моменту кільцями малоактивний хмарний шар залишився на колишньому рівні нижче рівня тропопаузи. Це дозволило безперешкодно реєструвати потужний надхмарний шар газоподібних метану й аміаку. Через це метанове поглинання у малоактивній зимовій до цього півкулі залишилося практично однаковим і рівним поглинанню в колишній літній півкулі.*

*THE INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON SEASONAL VARIATIONS OF THE METHANE ABSORPTION IN SATURN'S ATMOSPHERE, by Vidmachenko A. P. — Our analysis of observational results on the methane absorption distribution in Saturn's disk for the period from 1965 to 2011 showed seasonal changes at the levels of visible clouds and haze. The methane absorption changes along the central meridian at equinoxes in 1966 and 1995 are in opposition to similar data obtained at the equinox in 1980. According to the observations at the equinox in 2009, expected (as in 1980) differences in the methane absorption at mid-latitudes between the southern and northern hemispheres of Saturn did not happen, although physical and orbital characteristics of Saturn in the equinoxes for 1966 and 1980 as well as for 1995 and 2009 practically repeated. For a couple of years before the equinox in 1966, 1980 and 1995, solar activity was rather high, and before the equinox in 2009 the Sun was in a low activity. Some studies show that if the condensation and convection are accounted for, dynamic time constant in the middle troposphere of Saturn can be several tens of hours.*

*Then a big change of insolation in the ultraviolet spectral region can lead to significant short-term dynamic changes. At the time of the equinox in 2009 convection in Saturn's atmosphere remained at the lowest possible level, and so after leaving the ring shadows deep cloud layers in the winter northern hemisphere remained "frozen" state with no active processes on the Sun. So, closed up to this point by the rings, inactive cloud layer remained at the same level below the tropopause. This allowed one to detect freely strong above-cloud layer of gaseous methane and ammonia. Because of this, the methane absorption in the low-activity before winter hemisphere remained almost the same and equal to the absorption of the summer hemisphere.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Сатурн обладает значительным наклоном ( $26^{\circ}44'$ ) экватора к плоскости орбиты. Поэтому для него характерно заметное различие притоков солнечной энергии к разным широтным поясам в течение периода обращения вокруг Солнца за 29.45 лет. Суточный приток радиации на высоких широтах летнего, обращенного к Солнцу полушария при наибольших углах сатурноцентрического склонения Солнца ( $\delta = 26.76^{\circ}$ ) может в 10 и более раз превосходить приток энергии при  $\delta = 0^{\circ}$  [48—50]. Зимнее полушарие находится в еще более сложных условиях, поскольку значительные его области находятся как в полярной ночи, так и в тени колец. В работах [34, 35, 49] показано, что кольца снижают по крайней мере на две трети величину доходящего до планеты потока солнечной радиации, усиливая тем самым сезонные контрасты притока энергии от Солнца. Кроме того, из-за эллиптичности орбиты и из-за того что перигелий Сатурн проходит в эпоху лета на юге, южное полушарие планеты получает в сумме почти на 15...25 % большее количество солнечной энергии, чем северное [38, 49, 50].

Ясно, что такое изменение режима облучения атмосферы Сатурна сказывается на физических и оптических характеристиках облачного покрова и/или надоблачной дымки планеты, а также на вертикальной структуре атмосферы на разных широтах. Это способствует проявлению сезонных изменений в атмосфере планеты [20, 21, 32, 48, 50]. Так как в недрах Сатурна есть мощный источник внутренней тепловой энергии [31], то можно ожидать, что он имеет определяющее значение в процессах, происходящих в нижней и средней тропосфере планеты, где происходит образование основного облачного слоя, его зональной структуры и формируется отраженное излучение в видимом спектральном диапазоне. Изменение сезонного притока энергии от Солнца [6, 7, 9, 10] может сказаться значительно сильнее на более высоких уровнях атмосферы, где формируется излучение в УФ-участке спектра и в ИК-полосах и линиях. Именно здесь заметнее всего изменения в

отражательных и излучательных свойствах Сатурна [3, 4, 12, 14—16], связанных с сезонными вариациями притока солнечной энергии.

Нахождение планеты на орбите в моменты равноденствия представляет наибольший интерес для сравнительного изучения возможных различий в атмосферных характеристиках северного и южного полушарий. За последние годы наиболее благоприятные возможности для таких наблюдений были в 1966, 1980, 1995 и 2009 гг.

### ШИРОТНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ МЕТАНОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В РАЗНЫЕ ГОДЫ

По наблюдениям в 1966 г. (рис. 1) заметна асимметрия [26] в уровне поглощения метаном в южном и северном полушариях. По данным работ [1, 2, 22, 23, 28—30, 34—37, 41, 52] получено, что в 1965—1971 гг. наименьшее поглощение наблюдалось в экваториальном поясе от  $-11$  до  $+10^\circ$ ; с увеличением широты поглощение растет и достигает наибольшего значения на широтах  $20$ — $40^\circ$  в обоих полушариях, причем в северных умеренных широтах поглощение на  $15$ ... $20$  % больше, чем в южных; в приполярных областях поглощение несколько уменьшено, но изменяется мало, и только в 1966 г. возле южного полюса поглощение почти на  $35$  % меньше, чем возле северного. В 1968 г. поглощение в южном умеренном поясе на  $20$  % больше, чем в экваториальном. Для 1971 г. общий ход поглощения совпадает с результатами спектрофотометрии 1970 г.: наименьшее поглощение — в экваториальной области, рост поглощения на  $30$ ... $45$  % в умеренных широтах и затем поглощение уменьшается к южному полюсу во всех полосах,

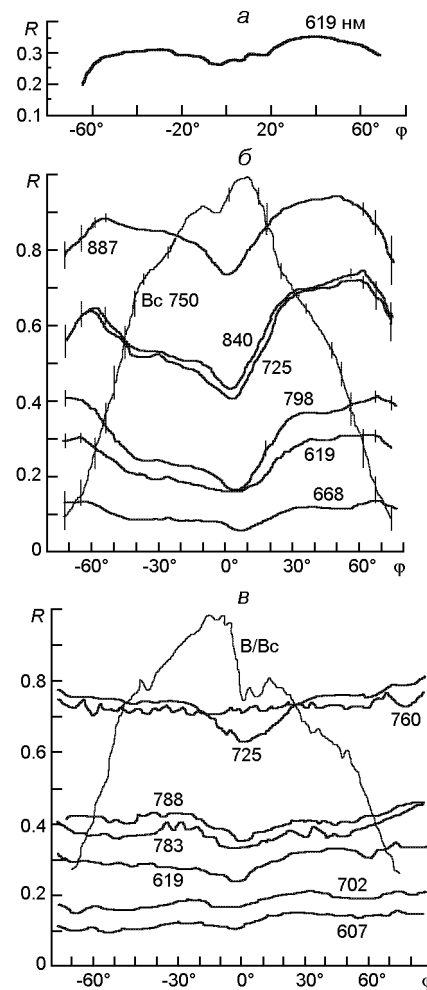


Рис. 1. Широтные вариации глубины  $R$  полос поглощения метана на диске Сатурна:  $a$  — 29 ноября 1966 г. [36],  $б$  — 19 сентября 1995 г. [39],  $в$  — в декабре 2008 г. [8] по измерениям зональных спектров

кроме полосы  $\text{CH}_4 = 619$  нм, где отмечено небольшое усиление поглощения. В 1972—1974 гг. значение поглощения в экваториальном поясе мало отличается от значений, полученных в 1966 г., и наблюдается небольшое уменьшение поглощения к полюсам.

В целом в период с 1970 по 1978 гг. метановое поглощение в атмосфере Сатурна значительно увеличилось. Начавшийся в 1976 г. (после момента максимального затенения кольцами северного полушария) до 1978 г. широкий максимум особенно очевиден для полос  $= 890$  и  $1000$  нм. Повторное уменьшение поглощения метаном в южном полушарии началось в 1979 г. [52] в момент, близкий к максимуму солнечной активности.

Результаты, полученные после 1980 г., показывают заметное изменение характеристик поглощения метаном уже в 1981 г. [3, 4, 51], когда наблюдения были переведены из южного в северное полушарие. Так, наблюдательные данные для сильных метановых полос показывают, что в момент равноденствия в 1980 г. [17, 32, 40, 3, 48—50, 52] поглощение в экваториальной области было минимальным; поглощение в южных тропической и полярной областях было сильнее, чем в северном полушарии на 5 % в полосе  $= 619$  нм, на 10...20 % в  $= 725$  нм и на 20...40 % в  $= 792$  нм (рис. 2). То есть, большее поглощение наблюдалось в южном полушарии, которое в течение предыдущего десятка лет перед этим равноденствием сильнее облучалось Солнцем. Отметим, что на рис. 2 показано полученное нами изменение отражательных характеристик участков диска Сатурна, дающее только качественное представление о ходе метанового поглощения вдоль центрального меридиана.

После равноденствия в 1980 г. ход поглощения метаном между северным и южным полушариями становился противоположным [42—44] тому, что было в 1979 г. и раньше. Кольца начали постепенно закрывать южное полушарие Сатурна. В 1985—1989 гг. в северной части экваториальной области (до  $10^\circ$ ) наблюдается минимальное поглощение метаном; в интервале широт  $10...30^\circ\text{N}$  характерно увеличение

поглощения в полосах  $= 543, 619$  и  $890$  нм; на широтах  $30...65^\circ$  поглощение мало изменяется и даже несколько уменьшается у полюса [24, 25, 27].

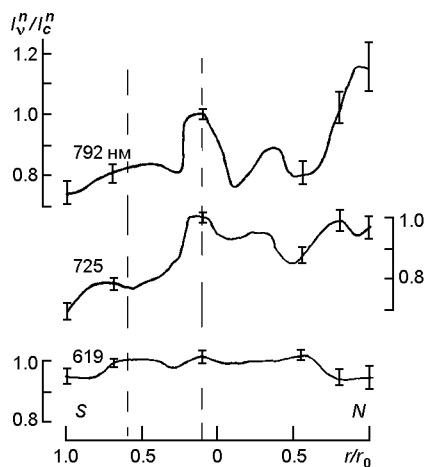


Рис. 2. Изменение отношения нормированных значений отражательной способности в полосах поглощения метана ( $I^n$ ) к соответствующим значениям в непрерывном спектре ( $I_c^n$ ) по результатам измерений в 1980 г. [3, 50]

Наблюдения, выполненные в 1995 г., показали [8, 39, 40, 42, 44], что широтное распределение поглощения метана носит явно асимметричный характер относительно экватора Сатурна. Наименьшее поглощение в полосах метана  $\lambda = 619, 725, 787$  и  $887$  нм характерно для экваториального пояса и, как видим, такая особенность сохраняется во все периоды независимо от сезона. На умеренных широтах северного полушария интенсивность всех полос поглощения  $\text{CH}_4$  в длинах волн  $\lambda = 580 \dots 880$  нм была значительно больше, чем на тех же широтах южного полушария [11]. Значительное увеличение поглощения в северном полушарии происходит в широтном интервале от экватора до  $30^\circ$ , от широты  $30^\circ$  увеличение поглощения становится пологим, а после  $55 \dots 65^\circ$  наблюдается уменьшение поглощения. В южном полушарии резкое увеличение поглощения наблюдается в интервале широт от  $0$  до  $10^\circ$ , а затем от широты  $40$  до  $60^\circ$ ; в диапазоне широт от  $10$  до  $40^\circ$  увеличение поглощения происходит полого; после  $60 \dots 65^\circ$  поглощение к южному полюсу в полосах  $\lambda = 619$  и  $798$  нм практически не изменяется и уменьшается в полосах  $\lambda = 725, 840$  и  $887$  нм (рис. 1).

Последний период максимального раскрытия колец был в 2001—2003 гг. Полученные в 2001 и в 2004 гг. данные указывают, что минимальное поглощение метана снова наблюдалось в экваториальном поясе, наибольшее поглощение было в южных умеренных широтах около  $-25 \dots -50^\circ$ , небольшой спад имел место в приполярной области на широте около  $-60^\circ$  и южнее после  $-75^\circ$  наблюдался небольшой спад в сторону полюса в полосах  $\lambda = 725$  и  $887$  нм, в  $\lambda = 619$  и  $796$  нм возле южного полюса было заметно некоторое увеличение поглощения. В 2006—2007 гг. широтные вариации поглощения умеренной ( $\lambda = 725$  нм) и слабой ( $\lambda = 619$  нм) полос метана также показали заметные изменения и значительную асимметрию в широтном распределении поглощения метана.

В период между 1995 и 2009 гг. наблюдался (рис. 3) заметный рост глубины метановой полосы в  $\lambda = 725$  нм в южном умеренном поясе Сатурна, что, скорее всего, связано с изменением инсоляции в южном полушарии [8, 19, 39, 41, 43].

В отличие от ярко выраженной асимметрии поглощения в южном и северном полушариях в 1995 г., в момент равноденствия в 2008—2009 гг. различие в поглощении между полушариями (рис. 1) на средних широтах практически отсутствует [8, 42, 43]. Так, в 2009 г. эквива-

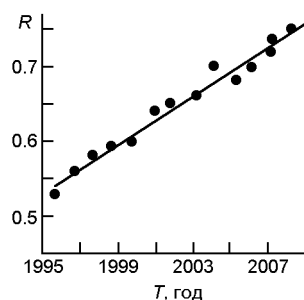


Рис. 3. Сезонные изменения центральной глубины  $R$  полосы поглощения метана в  $\lambda = 725$  нм в 1995—2009 гг. [42] в южном умеренном поясе Сатурна

лентные ширины в полосе поглощения  $\lambda = 725$  нм имеют почти равные значения в умеренных широтах в обоих полушариях, а минимальное поглощение наблюдалось в экваториальном поясе. Полосы поглощения  $\lambda = 619, 675, 702$  нм и другие, как и в 1995 г., показывают очень небольшое увеличение в северном полушарии.

### **ИЗМЕНЕНИЕ МЕТАНОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В РАЗНЫЕ МОМЕНТЫ РАВНОДЕНСТВИЯ НА САТУРНЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ЭТОГО**

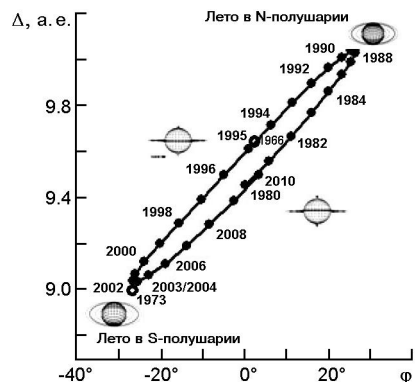
Из работ [3, 8, 13, 16, 19, 32, 39, 42, 43, 48, 50] следует, что в периоды с 1966 по 1980 и с 1995 по 2009 гг. Сатурн проходил через перигелий орбиты, приближаясь к Солнцу на минимальное расстояние в 9 а. е. по мере раскрытия колец; при этом к Солнцу было обращено южное полушарие. Оно к моменту равноденствия должно было накопить значительно больше получаемой от Солнца энергии, чем северное полушарие в предыдущие полупериоды оборота Сатурна перед равноденствиями в 1966 и 1995 гг., когда лето было в северном полушарии при его максимальном удалении от Солнца в афелии до 10 а. е.

Можно предположить, что за счет большего на 15...25 % суммарного притока солнечной энергии к южному полушарию после равноденствий в 1966 и 1995 гг. происходило постепенное частичное испарение и снижение объемной плотности аммиачных облаков в летнем южном полушарии [18, 46, 47]. При этом уменьшался средний объемный коэффициент рассеяния в облаке и/или дымке. Это, в свою очередь, приводило к постепенному усилению видимого метанового поглощения за счет увеличения оптического пути поглощения при многократном рассеянии в облачном покрове планеты.

Обращаем внимание на тот факт, что на протяжении периода наблюдений с 1964 по 1983 гг. более слабые полосы  $\text{CH}_4$ , которые формируются глубже в видимой дымке [51], имеют такое же качественное поведение, как и более сильные полосы поглощения. Изучение долгосрочного поведения метанового поглощения в длинах волн  $\lambda = 890$  и  $1000$  нм приводит к такому выводу об изменении дымки возле уровня тропопаузы Сатурна: в летнем южном полушарии дымка постепенно уменьшается, возможно, от локального максимума перед летним солнцестоянием 1973 г. к локальному минимуму в конце лета в 1977—1978 гг. Это означает уменьшение плотности (или поперечного сечения) частиц дымки. Поэтому парциальное давление метана  $\text{NH}_3$  увеличилось, и туман уменьшился. В этих условиях произошло потепление глубоко в тропосфере, которое привело еще и к понижению уровня верхней кромки видимых облаков [18].

Предполагалось, что в равноденствие 2009 г. широтное распределение поглощения метана окажется «зеркальным» по сравнению с наблюдавшимся в 1995 г. и похожим на ситуацию в 1980 г. Однако, как видно из рис. 1, этого не произошло: в северном полушарии погло-

Рис. 4. Изменение радиуса-вектора Сатурна от сатурноцентрического склонения [42] за период с 1966 по 2010 гг.



щение не уменьшилось, хотя все же в южном оно существенно увеличилось. На взятом из работы [42] рис. 3 показано, как увеличивалась центральная глубина полосы поглощения  $\text{CH}_4 = 725 \text{ нм}$  за период с 1995 по 2009 гг. в южном умеренном поясе Сатурна.

Из рис. 4 видно, что в это время Сатурн по мере раскрытия колец приближался к Солнцу на минимальное расстояние, и лето было в южном полушарии. Именно оно к моменту равноденствия должно было накопить значительно больше получаемой от Солнца энергии, чем северное полушарие перед равноденствием в 1995 г. при максимальном удалении от Солнца, когда максимум поглощения метана был связан с летним северным полушарием.

Особо отметим, что в моменты равноденствий и в 1966 г., и в 1995 г. в идентичных условиях предыстории ситуации до моментов наблюдения планеты при видимости колец Сатурна с ребра, общий ход изменения поглощения был похожий, а само поглощение в северном полушарии — существенно больше, чем в южном. То есть, очень четко была выражена меридиональная асимметрия оптических характеристик атмосферы Сатурна и облаков между южным и северным полушариями, и максимум поглощения метана в течение, по крайней мере 10—12 предыдущих лет перед равноденствиями в 1966 и 1995 гг. был в северном полушарии, которое сильнее облучалось Солнцем.

Обратная картина в ходе поглощения наблюдалась возле равноденствия Сатурна в 1980 г. [32, 52]. Из наших наблюдений [3, 32, 50] следует, что минимальное поглощение в полосах метана  $= 619, 725$  и  $792 \text{ мкм}$  также было в экваториальной области; в диапазоне широт от  $16...20^\circ$  до  $45...50^\circ$  поглощение несколько увеличивается в обоих полушариях; сильнее (на  $10...25\%$ ) рост наблюдается в южном полушарии, которое в течение предыдущего десятка лет перед этим равноденствием сильнее облучалось Солнцем. С широты после  $50^\circ$  увеличение поглощения к северному полюсу продолжается, а к южному — даже несколько уменьшается. То есть, имеет место хорошо выраженная асимметрия поглощения (рис. 2) [3, 32, 48], находящаяся в противофазе с данными в 1966 и 1995 гг.

Таким образом, во все предыдущие моменты равноденствия Сатурна максимальным метановым поглощением обладало полушарие



планеты, умеренные широты которого почти 14 лет освещались солнечным светом. А в противоположном полушарии, в умеренных широтах которого 14 лет была зима и которые, к тому же, более 10 лет были закрыты кольцами, всегда наблюдалось минимальное поглощение метаном [50, 52].

Когда в 2007 г. удалось наблюдать [39] не только южные области видимого диска Сатурна, но и начавшие открываться из-под колец приполярные северные области (широты  $45...75^\circ$ ), то неожиданно было отмечено совершенно незначительное различие в поглощении между южными и северными широтами. Этот вывод подтвердился и результатами наблюдений в 2008—2010 гг. То есть, в отличие от четко выраженной антифазной асимметрии в изменении поглощения между южным и северным полушариями в прошлые равноденствия, в равноденствие в 2009 г. различия поглощений в полушариях на средних широтах практически нет. Причем полученные в 2010—2012 гг. (уже после равноденствия) спектральные наблюдательные данные [44] о распределении метанового поглощения вдоль центрального меридиана Сатурна все еще показывают уровень поглощения в северном полушарии в некоторых длинах волн (например в  $\lambda = 619$  нм) даже выше, чем в южном. В северном полушарии наблюдаются максимумы поглощения, которые перемещаются со временем от широты  $40$  до  $25—30^\circ$ .

Таким образом, в равноденствие 2009 г. поглощение в южном полушарии, как и ожидалось, существенно увеличилось, но в северном ожидаемого уменьшения поглощения не произошло. И хотя общая картина широтных вариаций поглощения несколько отличается от наблюдаемых в 1995 и 1966 гг., но практически отсутствует ожидаемая асимметрия поглощения между полушариями. Все физико-орбитальные характеристики Сатурна в моменты равноденствий в 1966 и 1980, а также в 1995 и 2009 гг. практически повторяются, но отклик на них совершенно различен.

Таким образом, не произошло ожидаемого после выхода атмосферных слоев из-под колец на прямое облучение Солнцем образования высоких аммиачных облаков. Газообразный аммиак не смог превратиться в кристаллики льда; что-то произошло такое, что не позволило осуществиться фазовому переходу газ — лед для аммиака. При этом аммиачные облака остались на глубоких уровнях в атмосфере, а газообразный аммиак на уровне тропопаузы остался довольно «горячим» и не смог кристаллизоваться.

Изображения Сатурна с космического аппарата «Кассини» [19] показали ослабление конвективных процессов [33] в атмосфере планеты. Это могло повлиять на объемную плотность облачного слоя и, скорее всего, облака ушли вниз, а оптическая толщина дымки над облачным слоем при этом увеличилась. Все это в совокупности привело к усилению полос поглощения (например в полосе  $\text{NH}_3$   $\lambda = 645$  нм [45]), образующихся в процессе многократного рассеяния в облаках и тумане.

**ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗ-ЗА ВАРИАЦИЙ ИНСОЛЯЦИИ И РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА В АТМОСФЕРЕ САТУРНА**

Радиационные константы атмосферы Сатурна на заданном уровне зависят от химического состава, давления, температуры и других условий, уменьшаясь от почти 10 лет для уровня видимых облаков, до года и меньше для уровня тропопаузы. Отметим, что верхняя тропосферная дымка формируется возле уровня тропопаузы. Основными составляющими атмосфер планет-гигантов являются водород и гелий, а также метан и аммиак. Вследствие значительной удаленности от Солнца Сатурн имеет низкую температуру в фотохимически активных областях атмосферы. В сочетании с преобладающим содержанием водорода это приводит к фотохимическим процессам [5, 17], основными продуктами которых являются различные углеводороды и аммиак  $\text{NH}_3$ . Наличие значительного изменения облучения атмосферы Солнцем приводит к вариациям общего количества молекул  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  и продуктов их фотодиссоциации. В связи с этим последствия орбитального движения, наличие колец, а также цикл солнечной активности индуцируют изменение количественного и качественного состава в верхних слоях атмосферы Сатурна. Получающиеся вариации оптической толщины фотохимической дымки, в свою очередь, в значительной степени изменяют доступ поступающей от Солнца энергии к тем слоям в атмосфере, где происходит формирование погоды на планетах.

Наблюдения показывают, что значительные колебания интегральной солнечной радиации в видимых лучах принципиально невозможны, ибо для осуществления подобных колебаний необходимы значительные изменения температуры Солнца на значительной части его поверхности, что не наблюдается в реальных условиях. Но поток солнечного излучения в области короче 120 нм изменяется вдвое в течение солнечного цикла вследствие сильного влияния солнечной активности на эмиссию из переходной области между хромосферой и короной, а интегральный поток в линии  $L_\alpha$  ( $\lambda = 121.6$  нм) изменяется в пределах от 2 до 8  $\text{мДж м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , т. е. до 400 %. Излучение в области  $\lambda = 200\text{...}300$  нм варьирует на 10...30 % в фазе с солнечным циклом, и согласно расчетам приводит к изменению содержания различных малых активных составляющих в столбе на несколько процентов. Исследование [13] привело к выводу, что вариации излучения Солнца в диапазоне  $\lambda = 170\text{...}390$  нм могут представлять собой тот физический агент, который способен связать солнечный цикл с общей циркуляцией атмосферы.

В связи с инерционностью климатической системы атмосферы изменения солнечной постоянной на 0.1 % могут быть существенными для влияния на глобальный климат в том случае, если они устойчивы во временном масштабе порядка десятилетия и более; для временных масштабов от месяца до года климатически значимые изменения солнечной постоянной составляют десятые доли процента, а в течение нескольких дней — около 1 % и более [7].

Стратосферная сезонная модель климата Сесса и Колдуэлла [14] предсказывает для Сатурна сезонные изменения на уровне давления 0.1 бар с отставанием примерно на один сезон (7...7.5 лет). В работе [12] сезонные модели верхней тропосферы Сатурна объяснили наблюдаемую асимметрию полушарий температуры с широтой, полученную из данных КА «Вояджер», по крайней мере до уровней давления в 0.2...0.3 бар. Радиационное время релаксации в тропосфере на уровне видимых облаков (0.4 бар) Сатурна составляет около 10 лет. Изменение во времени поглощения в сильных полосах  $\text{CH}_4$  в южных умеренных широтах согласуется с теоретически ожидаемым отставанием по фазе в семь лет между температурой тропопаузы и сезонно-переменной инсоляцией. Такие модельные оценки хорошо объясняют сезонное изменение метанового поглощения в атмосфере Сатурна, имевшее место в моменты равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. Но результаты соответствующих наблюдений в северном полушарии планеты в равноденствие 2009 г. существенным образом отличаются. Рассмотрим возможную причину такого различия.

#### **ВЛИЯНИЕ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА ИЗМЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ САТУРНА**

Наблюдаемые сезонные эффекты в более глубоких слоях видимой тропосферы могут быть связаны еще и с конденсацией и конвекцией. Поэтому динамическая шкала времени в средней тропосфере составляет всего несколько десятков часов [5, 48], в связи с чем большие изменения инсоляции Сатурна могут привести и к большим краткосрочным динамическим изменениям. Примером является конвективный поток, расположенный в верхней части конвективной зоны [16], и быстрая сублимация предположительно кристаллов  $\text{NH}_3$  на этой глубине в ответ на повышение инсоляции. Так, изменения в инсоляции при постоянной температуре на том или ином уровне в атмосфере может управлять фазовыми изменениями фотохимически активных атмосферных составляющих и так влиять на образование тумана (дымки). По сути изменение инсоляции управляет скрытым тепловым потоком, когда теплоемкость атмосферы является достаточно большой и температура остается практически неизменной. Дополнительное солнечное излучение поглощается частицами сильнее, чем необходимо для установления равновесия, и, таким образом, поставляет необходимую для сублимации скрытую теплоту. И наоборот, снижение поглощенной инсоляции компенсируется скрытой теплотой, поставляемой газообразным аммиаком при замораживании частицы. Поэтому режим верхних слоев планетных атмосфер в значительной степени определяется еще и солнечной активностью из-за воздействия солнечной радиации в разных длинах волн, особенно — в коротковолновой части спектра.

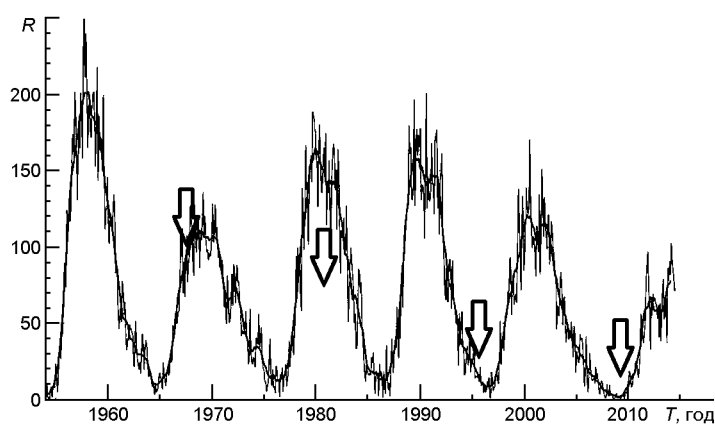


Рис. 5. Изменение индекса  $R$  Солнечной активности со временем  $T$  [[http://sidc.oma.be/html/sidc\\_graphics.html](http://sidc.oma.be/html/sidc_graphics.html)]. Стрелками отмечены моменты равноденствий для Сатурна

Так, например, для атмосферы Земли было получено [6, 9, 10], что суточная амплитуда изменения давления больше в эпоху максимума солнечной активности, чем в годы минимума. В годы максимума увеличивается число циклонов и наблюдается значительное повышение интенсивности циркуляции, что проявляется в росте барических градиентов, которые приводят к увеличению перепадов энергии между различными областями атмосферы. В минимуме солнечной активности существенно уменьшается конвекция, и перемешивание атмосферы практически не происходит. Именно такую картину мы и наблюдаем в северном полушарии Сатурна в период с 2007 по 2010 гг.

Как видно из рис. 5, за два-три года до моментов равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. число  $R$ , характеризующее солнечную активность, варьировало в пределах от 40 до 100, и даже до 180 в равноденствие в 1980 г. Но перед равноденствием в 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности и значение  $R$  практически не отличалось от нулевого значения. Это говорит о том, что в момент равноденствия в 2009 г. конвекция в атмосфере Сатурна пребывала на минимально возможном уровне, и поэтому после выхода из тени колец глубокие облачные слои в зимнем северном полушарии планеты так и остались в своеобразном «замороженном» состоянии при практически полном отсутствии активных процессов на Солнце, особенно заметно проявляющихся в УФ-участке спектра. При таких условиях закрытый кольцами малоактивный облачный слой остался на прежнем довольно глубоком уровне, существенно ниже уровня тропопаузы. В совокупности это позволило земному наблюдателю и дальше беспрепятственно регистрировать мощный надоблачный слой газообразных метана и аммиака [45]. Из-за такого набора физико-химических условий в атмосфере Сатурна метановое поглощение в малоактивном зимнем полушарии осталось практически одинаковым и равным поглощению в бывшем летнем максимально облучаемом солнечным светом.

## ВЫВОДЫ

Приведенные выше результаты наблюдений распределения метанового поглощения по диску Сатурна за период с 1965 по 2011 гг. и их анализ показали выраженные сезонные изменения, происходящие на уровнях видимых облаков и надоблачной дымки. Меридианный ход метанового поглощения в моменты равноденствий в 1966 и 1995 гг. находится в противофазе к аналогичным наблюдательным данным, полученным в равноденствие 1980 г. По наблюдениям в равноденствие 2009 г. ожидаемого (аналогичного до 1980 г.) различия в метановом поглощении между южным и северным полушариями на средних широтах Сатурна не произошло. Несмотря на то, что все физико-орбитальные характеристики Сатурна в моменты равноденствий в 1966 и 1980, а также в 1995 и 2009 гг. практически повторяются, но отклик на них получился различный, и в 2009 г. не произошло ожидаемого после выхода атмосферных слоев из-под колец образования высоких аммиачных облаков. Исследования показывают, что вариации излучения Солнца в диапазоне  $\lambda = 170...390$  нм могут представлять тот физический агент, который способен связать солнечный цикл с общей циркуляцией атмосферы. Так, сезонные модели климата Сатурна предсказывают сезонные изменения на уровне давления 0.1 бар с отставанием примерно на один сезон (7...7.5 лет), на уровне 0.4 бар — до 10 лет. Такие модельные оценки хорошо объясняют сезонное изменение метанового поглощения в атмосфере Сатурна, имевшее место в моменты равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. Но результаты соответствующих наблюдений в северном полушарии планеты в равноденствие 2009 г. существенным образом отличаются. Оценки показывают, что при учете конденсации и конвекции динамическая шкала времени в средней тропосфере может составлять несколько десятков часов, и большие изменения инсоляции Сатурна могут привести к значительным краткосрочным динамическим изменениям.

В годы максимума солнечной активности увеличивается число циклонов и наблюдается значительное повышение интенсивности циркуляции между различными областями атмосферы. В минимуме солнечной активности существенно уменьшается конвекция, и перемешивание атмосферы практически не происходит. Именно такую картину мы и наблюдаем в северном полушарии Сатурна в период с 2007 по 2010 гг.

За два-три года до моментов равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. число  $R$ , характеризующее солнечную активность, варьировалось в пределах от 40 до 100, и даже до 180 в равноденствие в 1980 г. Перед равноденствием в 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности и значение  $R$  практически не отличалось от нулевого значения. То есть, в момент равноденствия в 2009 г. конвекция в атмосфере Сатурна пребывала на минимально возможном уровне и поэтому после выхода из тени колец глубокие облачные слои в зимнем северном по-

лушарии планеты остались в «замороженном» состоянии при практически полном отсутствии активных процессов на Солнце. Поэтому закрытый до этого момента кольцами малоактивный облачный слой остался на прежнем уровне ниже уровня тропопаузы, что позволило беспрепятственно регистрировать мощный надоблачный слой газообразных метана и аммиака. Из-за такого набора физико-химических условий в атмосфере Сатурна, метановое поглощение в малоактивном зимнем полушарии осталось практически одинаковым и равным поглощению в бывшем летнем максимально облучаемом солнечным светом.

1. Аврамчук В. В. Распределение метанового поглощения в полосе 0.619 мкм по диску Сатурна в 1966 г. // Астрометрия и астрофизика.—1968.—Вып. 1.—С. 161—164.
2. Аврамчук В. В., Кругов В. Д. Результаты фотографических наблюдений Сатурна и их интерпретация // Астрометрия и астрофизика.—1973.—Вып. 18.—С. 39—45.
3. Видьмаченко А. П. Электрофотометрия Сатурна. II. Спектральное распределение яркости вдоль центрального меридиана // Астрометрия и астрофизика.—1984.—Вып. 51.—С. 56—62.
4. Видьмаченко А. П. Отражательная способность южной экваториальной области Сатурна в 1977—1981 гг. // Астрон. вестник.—1984.—12, № 3.—С. 191—198.
5. Видьмаченко А. П. Планеты-гиганты: теоретические и наблюдательные аспекты // Астрон. вестник.—1991.—25, № 3.—С. 277—292.
6. Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1976.—351 с.
7. Герман Дж. Р., Голдберг Р. А. Солнце, погода и климат. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.—319 с.
8. Тейфель В. Г., Каримов А. М., Харитонов Г. А. Сравнение широтных вариаций полос поглощения метана на диске Сатурна в периоды равноденствий 1995 и 2009 гг. // Астрономический циркуляр.—2010.—№ 1573.—С. 1—2.
9. Эйгенсон М. С. Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. — Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1957.—230 с.
10. Эйгенсон М. С., Гневышев М. Н., Оль А. И., Рубашев Б. М. Солнечная активность и ее земные проявления. — М., Л.: ОГИЗ, 1948.—323 с.
11. 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.—96, N 3-4.—P. 119—147.
12. Bezard B., Gautier D., Conrath B. A seasonal model of the Saturnian upper troposphere Comparison with Voyager infrared measurements // Icarus.—1984.—60.—P. 274—288.
13. Callis L. B., Nealy J. E. Solar UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents // Geophys. Res. Lett.—1978.—5.—P. 249—252.
14. Cess R. D., Carlson B. E., Caldwell J., et al. Latitudinal variations in Jovian stratospheric temperatures // Icarus.—1981.—46.—P. 249—255.
15. Cochran A. L., Cochran W. D. Longitudinal variability of methane and ammonia bands on Saturn // Icarus.—1981.—48.—P. 488—495.
16. Conrath B. J., Pirraglia J. A. Thermal structure of Saturn from Voyager infrared measurements — Implications for atmospheric dynamics // Icarus.—1983.—53.—P. 286—292.
17. 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.—P. 319—336.

18. *Drossart P., Courtin R., Atreya S., Tokunaga A.* Variations in the Jovian atmospheric composition and chemistry // Time-variable phenomena in the Jovian system. — Washington, 1989.—NASA-SP-494.—P. 344—362.
19. *Fletcher L. N., Achterberg R. K., Greathouse Th. K., et al.* Seasonal change on Saturn from Cassini/CIRS observations 2004—2009 // *Icarus*.—2010.—**208**, N 1.—P. 337—352.
20. *Fouchet T., Guerlet S., Strobel D. F., et al.* An equatorial oscillation in Saturn's middle atmosphere // *Nature*.—**453**, N 7192.—P. 200—202.
21. *Gallis L. V., Nealy J. E.* Temperature UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents // *Geophys. Res. Lett.*—1978.—**5**.—P. 249—252.
22. *Irvine W. M., Simon T., Menzel D. H., et al.* Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. II. Observations from le Houga Observatory // *Astron. J.*—1968.—**73**, N 4.—P. 251—264.
23. *Irvine W. M., Simon Th., Menzel D. H., et al.* Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. III. Observations from boyden observatory // *Astron. J.*—1968.—**73**, N 8.—P. 807—823.
24. *Karkoshka E., Tomasko M. G.* Saturn's upper troposphere 1986—1989 // *Icarus*.—1992.—**97**, N 2.—P. 161—181.
25. *Karkoschka E., Tomasko M.* Saturn's vertical and latitudinal cloud structure 1991—2004 from HST imaging in 30 filters // *Icarus*.—2005.—**179**, N 1.—P. 195—221.
26. *Marin M.* Photometric photographique de Saturne // *J. Observ.*—1968.—**51**, N 3.—P. 179—191.
27. *Ortiz J. L., Moreno F., Molina A.* Saturn 1991—1993: Reflectivities and limb-darkening coefficients at methane bands and nearby continua-temporal changes // *Icarus*.—1995.—**117**, N 2.—P. 328—344.
28. *Owen T.* The spectra of Jupiter and Saturn in the photographic infrared // *Icarus*.—1969.—**19**, N 3.—P. 355—364.
29. *Pilcher C. B., McCord Th. B.* Narrow-band photometry of the bands of Jupiter // *Astrophys. J.*—1971.—**165**.—P. 195—201.
30. *Price M. J., Franz O. G.* Saturn: UVB photoelectric pinhole scans of the disk. II // *Icarus*.—1980.—**44**, N 4.—P. 657—667.
31. *Reese E. J.* Jupiter: its Red Spot and other features in 1969—1970 // *Icarus*.—1971.—**14**, N 3.—P. 343—354.
32. *Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Miniailo N. F.* Seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Sov. Astron. Lett.*—1983.—**9**.—P. 135—136.
33. *Stone P. H.* The Dynamics of the Atmospheres of the Major Planets // *Space Sci. Revs.*—1973.—**14**, N 3-4.—P. 444—459.
34. *Teifel V. G.* The atmosphere of Saturn // *Exploration of the planetary system: Proceedings of the Symp., Torun, Poland, September 5—8, 1973.* — Dordrecht: Reidel, 1974.—P. 415—440.
35. *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 Syst. Res.*—1975.—**9**.—P. 57.
36. *Teifel V. G., Usoltzeva L. A., Kharitonova G. A.* The spectral characteristics and probable structure of the cloud layer of Saturn // *Planetary Atmospheres: Proc. 40th IAU Symp., held in Marfa, Texas, Oct. 26—31, 1969 / Eds C. Sagan, T. C. Owen, H. J. Smith.* — Dordrecht: Reidel, 1969.—P. 375—383.
37. *Teifel V. G., Usol'tseva L. A., Kharitonova G. A.* Optical properties and structure of Saturn's atmosphere. I. Preliminary results of studies of CH<sub>4</sub> absorption bands on the planetary disc // *Sov. Astron.*—1971.—**15**.—P. 296—302.
38. *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 CH<sub>4</sub> band and characteristics of the planet in the near ultraviolet // *Sov. Astron.*—1973.—**17**.—P. 108—111.

39. *Tejfel V. G.* Molecular absorption and the possible structure of the cloud layers of Jupiter and Saturn // *J. Atmos. Sci.*—1969.—**26**, N 5.—P. 854—859.
40. *Tejfel 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.—**31**, N 3.—P. 198—206.
41. *Tejfel V.* The distribution of molecular absorption on Saturn's disk from the observations in 1995 based on zonal spectrophotometry with CCD-camera // *Solar Syst. Res.*—1997.—**31**, N 3.—P. 198—206.
42. *Tejfel V., Karimov A.* Latitudinal asymmetry of the ammonia absorption on Saturn // *European Planetary Science Congress 2009*, held 14—18 September in Potsdam, Germany. — EPSC.—2009.—**4**.—P. 34.
43. *Tejfel 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 Sci. Conf.*, held March 10—14, 2008 in League City, Texas. — 2008.—LPI Contribution N 1391.—P. 1530.
44. *Tejfel 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 2010*, held 20—24 September in Rome, Italy. EPSC.—**5**.—Abstr. 322.—P. 322.
45. *Tejfel 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*, held March 1—5, 2010 in the Woodlands, Texas. LPI Contribution N 1533.—P. 1250.
46. *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.—**175**, N 2.—P. 464—489.
47. *Tomasko M. G., West R. A., Orton G. S., Tejfel V. G.* Clouds and aerosols in Saturn's atmosphere // *Saturn*. — Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 1984.—P. 150—194.
48. *Vid'machenko A. P.* The appearance of seasonal variations in Saturn's atmosphere // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*.—1987.—**3**, N 6.—P. 10—12.
49. *Vid'machenko A. P.* Possible effect of the rings on the photometric properties of Saturn's cloud layer // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*.—1985.—**1**, N 6.—1985.—P. 12—15.
50. *Vid'machenko A. P.* Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*.—1999.—**15**, N 5.—P. 320—331.
51. *Vid'machenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V.* Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk // *Solar Syst. Res.*—1984.—**17**, N 4.—P. 164—171.
52. *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.—**51**.—P. 51—64.

Статья поступила в редакцию 29.08.14