



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 15 – 23

УДК 523.4

Сезоны на Сатурне. II. Влияние солнечной активности на изменение метанового поглощения

А.П. Видьмаченко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

В атмосфере Сатурна метан и аммиак находятся в виде примесей на уровне меньше десятых долей процента. Они участвуют в фотохимических процессах, основными продуктами которых являются углеводороды и аммиак NH_3 . Полиацетилены поглощают солнечный свет почти до 400 нм, а углеводороды — короче 180 нм. В связи с этим солнечный цикл, наклон экватора к плоскости орбиты, последствия орбитального движения и наличие колец индуцируют изменение состава верхней атмосферы. Радиационные константы атмосферы зависят от физико-химических условий, уменьшаясь от ~ 10 лет на уровне видимых облаков до месяцев в тропосфере и дней в стратосфере. Наблюдаемые сезонные эффекты могут быть связаны еще и с конденсацией и конвекцией, а динамическая шкала времени там может быть всего десятки часов. Анализ данных о распределении метанового поглощения по диску Сатурна за 1964–2012 гг. показал существенные сезонные изменения на уровнях видимых облаков и в надоблачной дымке. Меридианный ход метанового поглощения в равноденствия 1966 и 1995 гг. имеет противоположный ход к результатам в равноденствие 1980 г. Но ожидаемого отличия в ходе метанового поглощения в равноденствие 2009 г., аналогичного к 1980 г., не произошло. Хотя все физико-орбитальные характеристики Сатурна в эти моменты равноденствий повторились, но отклик на них получился различный. За несколько лет до равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. число R , характеризующее солнечную активность, изменялось от 40 до 180. Перед равноденствием 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности, и значение R практически было равно нулю. Согласно наблюдениям, в момент равноденствия 2009 г. конвекция в атмосфере Сатурна пребывала на минимальном уровне. После выхода из тени колец глубокие облачные слои в зимнем северном полушарии остались в «замороженном» состоянии на прежнем низком уровне при отсутствии активных процессов на Солнце. Это позволило беспрепятственно регистрировать мощный слой газа из метана и аммиака. Поскольку такая дымка имеет фотохимическую природу, то можно предположить, что из-за минимальной активности Солнца в атмосфере Сатурна не хватило энергии для образования фотохимического аэрозольного слоя. Из-за такого набора физико-химических условий в атмосфере Сатурна метановое поглощение в малоактивном зимнем полушарии осталось практически неизменным и равным поглощению в бывшем летнем максимально освещаемом солнечным светом полушарии.

СЕЗОНИ НА САТУРНІ. II. ВПЛИВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ЗМІНУ МЕТАНОВОГО ПОГЛИНАННЯ, Видьмаченко А.П. — В атмосфері Сатурна метан і аміак знаходяться у вигляді домішок на рівні менше десятих часток відсотка. Вони беруть участь у фотохімічних процесах, основними продуктами яких є вуглеводні і аміак NH_3 . Поліацетилену поглинають сонячне світло майже до 400 нм, а вуглеводні — коротше 180 нм. У зв'язку з цим сонячний цикл, нахил екватора до площини орбіти, наслідки орбітального руху і наявність кілець індукують зміну складу верхньої атмосфери. Радіаційні константи атмосфери залежать від фізико-хімічних умов, зменшуючись від ~ 10 років на рівні видимих хмар, до місяців в тропосфері і днів у стратосфері. Спостережувані сезонні ефекти можуть бути пов'язані ще й з конденсацією і конвекцією, а динамічна шкала часу там може бути всього десятки годин. Аналіз даних про розподіл метанового поглинання по диску Сатурна за 1964–2012 показав суттєві сезонні зміни на рівнях видимих хмар і туману над хмарами. Меридіанний хід метанового поглинання в рівнодення 1966 і 1995 має протилежний хід до результатів у рівнодення 1980. Але очікуваної відмінності в ході метанового поглинання в рівнодення 2009, аналогічного до 1980 року, не відбулося. Хоча всі фізико-орбітальні характеристики Сатурна в ці рівнодення повторилися, але відгук на них вийшов різний. За кілька років до рівнодення в 1966, 1980 і 1995 рр. число R , що характеризує сонячну активність, змінювалося від 40 до 180. Перед рівноденням 2009 Сонце знаходилося в мінімумі активності, і значення R практично дорівнювало нулю. Згідно зі спостереженнями, в момент рівнодення 2009 конвекція в атмосфері Сатурна перебувала на мінімальному рівні. Після виходу з тіні кілець глибокі хмарні шари в зимовій північній півкулі залишилися в «замороженому» стані на колишньому низькому рівні при відсутності активних процесів на Сонці. Це дозволило безперешкодно реєструвати потужний шар газу з метану й аміаку. Оскільки такий серпанок має фотохімічну природу, то можна припустити, що через мінімальну активність Сонця в атмосфері Сатурна не вистачило енергії для утворення фотохімічного аерозольного шару. Через такий набір фізико-хімічних умов в атмосфері Сатурна метанове поглинання в малоактивній зимовій півкулі залишилося майже незмінним і рівним поглинанню в колишній літній максимально освітленій сонячним світлом півкулі.

SEASONS ON SATURN. II. INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON VARIATION OF METHANE ABSORPTION, by Vidmachenko A.P. — Methane and ammonia in the atmosphere of Saturn are in the form of impurities at the level of less than tenths of a percentage. They take part in photochemical processes, the main products of which are hydrocarbons and ammonia NH_3 . Polyacetylenes absorb sunlight almost to 400 nm, and hydrocarbons <180 nm. Therefore, the solar activity cycle, the slope of the equator to the plane of the orbit, the orbital motion and the presence of the rings induce change in composition of the upper atmosphere. Radiation constants in the atmosphere depend on the physical and chemical conditions, decreasing from ~ 10 years at the visible clouds level, to months in tropopause, and days in stratosphere. The observed seasonal effects may be associated also with condensation and

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

Вісник Астрономічної школи, 2015, том 11, № 1

15

convection, and the dynamic time scale may be only tens of hours. The data analysis on the methane absorption distribution over the disk of Saturn for 1964–2012 showed a significant seasonal changes in the levels of visible clouds and above clouds haze. Changes of methane absorption along the meridian in the equinox 1966 and 1995, had the opposite course to the results in equinox 1980. But the expected differences in the change of methane absorption at the equinox 2009, similar to 1980, did not happen. Although all the physical and orbital characteristics of Saturn at equinoxes in these moments repeated, but the response to them were received various. A few years before the equinox in 1966, 1980 and 1995, the number of R , characterizing solar activity, varied from 40 to 180. Before equinox 2009 the Sun has minimal activity and the R value was practically zero. According to observations at the time of equinox 2009, convection in the Saturn's atmosphere stayed at a minimal level. After exiting of rings shadows in winter northern hemisphere deep cloud layer was "frozen" at the same low level at absence of active processes on the Sun. This allowed easily to register a thick layer of methane and ammonia gas. So how such haze has a photochemical nature, it can be assumed that due to minimum of solar activity, in the Saturn's atmosphere was not enough energy for formation of photochemical aerosol layer. Because of such a set of physical and chemical conditions in Saturn's atmosphere, and low-activity in winter hemisphere, the methane absorption remained almost unchanged and equal to the absorption in the former summer hemisphere with maximum irradiated sunlight.

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

Key words: atmosphere; Saturn; methane absorption; seasonal variations; solar activity.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сатурн обладает значительным ($\varphi \approx 26,7^\circ$) наклоном экватора к плоскости орбиты [35, 37]. Поэтому для него характерно значительное различие притока солнечной энергии к разным широтным поясам в течение периода обращения вокруг Солнца. Это способствует проявлению сезонных изменений в атмосфере Сатурна; их усиливает еще и то, что кольца частично перекрывают солнечную радиацию, попеременно снижая ее приток к зимнему полушарию [34]. И только один раз за $\sim 14,7$ земных года оба полушария планеты одинаково доступны земному наблюдателю для исследования их оптических особенностей при видимости колец с ребра [21, 33]. За последние годы возможности для таких наблюдений были в 1966, 1980, 1995 и 2009 гг.

Атмосфера — сложный химический, гидромеханический и т.п. комплекс со свойственным ей набором химических превращений и кинематических движений. Все это определенным образом проявляется в атмосфере планеты. Поэтому ее можно рассматривать как набор физических параметров, которые определенным образом «откликаются» на изменение притока энергии в заданную область атмосферы $F = F(T, P, N, n_i, n_r, \dots)$. Восприятие космических влияний атмосферой планеты обусловлено особенностями строения основных ее слоев и их возможностью откликаться на воздействие определенных возмущающих сил [7]. Внешние слои в наибольшей степени подвергаются воздействию солнечного излучения, и для них это основной источник энергии. Информация о состоянии атмосферы поступает к нам в диапазоне электромагнитного излучения от рентгеновского до далекого инфракрасного участков спектра. А формируется оно (отражается от планетной атмосферы, поглощается и рассеивается в ней, излучается и переизлучается и т.п.) в относительно небольшом диапазоне высот, лежащих ~ 20 – 200 км ниже и выше основного облачного слоя. К внешним причинам, которые тем или иным образом влияют на атмосферу, мы отнесем факторы, непосредственно связанные с количеством поступающего на планету от Солнца излучения: возможные реальные изменения солнечной радиации в разных длинах волн со временем; вариации облучения разных широт планеты Солнцем из-за наличия наклона оси вращения планеты к плоскости эклиптики; различие притоков солнечной энергии к атмосфере в перигее и в апогее из-за эксцентриситета орбиты планеты.

Солнце тотально воздействует на все планетарные процессы и в некоторых отношениях синхронизирует их. Это может приводить к установлению резонансных отношений между атмосферными процессами, так что один из них может резко усиливаться за счет другого. При этом хорошо прослеживается общая тенденция к усилению связи солнечного и планетного явлений при возрастании интенсивности солнечного излучения, поскольку основным непосредственным энергетическим источником космического воздействия для планетных атмосфер является Солнце [5].

2. СРАВНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ДИСКА САТУРНА В МОМЕНТЫ РАВНОДЕНСТВИЯ

В [36, 38] мы проанализировали многочисленный материал для Сатурна по спектральным наблюдениям полос поглощения метана за период 1964–2012. Широтное различие метанового поглощения по диску показало существенную асимметрию между северным и южным полушариями. Причем экваториальный пояс характеризуется наименьшим поглощением во всех полосах, а изменение поглощения к средним широтам в северном и южном полушариях происходит по-разному. Так, при видимости колец с ребра в идентичных условиях предыдущей истории наблюдения планеты и в 1966, и в 1995 г., поглощение в северном полушарии было заметно большим, чем в южном. Противоположный эффект наблюдался в 1980 г., когда поглощение было большим уже в южном полушарии Сатурна [32, 37, 40].

Последнее равноденствие на Сатурне было в 2009 г. В отличие от четко выраженной асимметрии поглощения в южном и северном полушариях в 1995 и 1996 гг. [26, 28, 29], в равноденствие 2009 г.

отличие поглощения между полушариями на средних широтах почти отсутствует. До этого момента Сатурн был наклонен к Солнцу южным полушарием, и там наблюдался рост метанового поглощения [18, 27]. Проведенный нами в работах [16, 32, 35, 38, 39] анализ наблюдательных данных показал, что существует эффект некоторого запаздывания в происходящих в атмосфере Сатурна изменениях [14, 20, 21, 23]. Яркость всех исследуемых широтных поясов в 1966 г. находится в противофазе к аналогичным наблюдательным данным, полученным в 1980 г. и в фазе с аналогичными наблюдательными данными, полученными в 1995 г. как в ультрафиолете, так и в метановых полосах.

Предполагалось, что в равноденствие 2009 г. широтное распределение поглощения метана окажется противоположным наблюдаемому в 1995 г. и похожим на ситуацию в 1980 г. Однако этого не произошло: в северном полушарии поглощение не уменьшилось, хотя в южном оно существенно возросло. Особо отметим, что в моменты равноденствий и в 1966, и в 1995 гг. в идентичных условиях предыстории до моментов наблюдения планеты при видимости колец Сатурна с ребра общий ход изменения поглощения был похожий, а само поглощение в северном полушарии было существенно больше, чем в южном. То есть очень четко была выражена меридиональная асимметрия оптических характеристик атмосферы Сатурна и облаков между южным и северным полушариями; 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. Противоположная картина в ходе поглощения по диску наблюдалась в равноденствие Сатурна в 1980 г. [21, 32, 35, 40]. То есть имеет место хорошо выраженная асимметрия поглощения [37], 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 более 10 лет были закрыты кольцами, всегда наблюдалось минимальное поглощение метаном. Когда в 2007 г. удалось наблюдать [25] и южные области видимого диска Сатурна и начавшие открываться из-под колец приполярные северные области (широты $45 - 75^\circ$), то неожиданно было отмечено совершенно незначительное отличие в поглощении между южными и северными широтами. Этот вывод подтвердился наблюдениями в 2008–2012 гг. [27]. То есть в отличие от четко выраженной асимметрии в изменении поглощения между южным и северным полушариями во все прошлые моменты равноденствия, в равноденствие в 2009 г. различие в поглощении между полушариями на средних широтах практически отсутствует: так, поглощение в южном полушарии, как и ожидалось, существенно возросло, но в северном — не произошло ожидаемого уменьшения поглощения.

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. Из работ [12, 15, 18, 21, 24, 29, 35] следует, что 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, поворачиваясь к нему южным полушарием. Поэтому именно оно к моменту равноденствия должно накопить значительно больше получаемой от Солнца энергии (на 15–25%), чем северное полушарие за предыдущие полупериоды оборота планеты перед равноденствиями в 1966 и 1995 гг., когда лето было в северном полушарии при максимальном удалении Сатурна от Солнца в афелии на 10 а.е. За счет этого после равноденствий в 1966 и 1995 гг. могло произойти постепенное испарение частиц и снижение объемной плотности аммиачных облаков в летнем южном полушарии [17, 30, 31]. Это, в свою очередь, приводило к постепенному усилению видимого метанового поглощения. Именно поэтому 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 «теплым» и не смог кристаллизоваться.

Изображения Сатурна с космического аппарата (КА) «Кассини» [18] показали в это же время ослабление конвективных процессов [22] 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 возросла. В совокупности это привело к усилению полос поглощения, образующихся в процессе многократного рассеяния в облаках и тумане [28].

На основании имеющихся фотометрических и поляриметрических спектральных данных в различных длинах волн при разных условиях освещения планеты Солнцем и в разные сезоны видимости Сатурна, в [36] мы представили результаты определения оптических параметров газовой и аэрозольной составляющих атмосферы планеты для моментов равноденствия в 1966, 1980, 1995 и 2009 гг. Были использованы результаты расчетов интенсивности диффузно-отраженного от многослойной атмосферы излучения с учетом многократного рассеяния по программе, которая в свое время любезно была предоставлена нам Ж. Длугач [3]. Вычисления проводились исходя из предположения, что отраженное излучение в

спектральном диапазоне 300–800 нм формируется в части атмосферы Сатурна, которая может быть представлена двумя однородными слоями: верхний оптически тонкий чисто газовый слой, нижний — газовой-аэрозольный полубесконечный слой. При расчете предполагалось, что аэрозоль состоит из аммиака, который практически не поглощает свет в видимой области спектра, и незначительного количества неизвестной растворенной в нем примеси. Получено, что определенные из наблюдений спектральные значения оптической толщины чисто газового надоблачного слоя хорошо согласуются с расчетными значениями. Это может быть только тогда, когда надоблачная атмосфера или чисто газовая, или содержит очень мелкие аэрозольные частицы с размером $r_0 \ll 0,1$ мкм, а наблюдаемые фотометрические различия широтных поясов Сатурна в разных участках спектра могут быть вызваны различиями объемной концентрации облачного аэрозоля, оптической толщины надоблачного газового слоя, соотношения между концентрациями аэрозольных частиц и газа, а также значений мнимой части показателя преломления облачных частиц $n_i(\lambda)$. Вариации именно этих характеристик весьма слабо сказываются на поляризационных свойствах атмосферы, однако оказывают существенное влияние на ее яркость.

3. ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛАНЕТНУЮ АТМОСФЕРУ

Наблюдения показывают, что значительные колебания интегральной солнечной радиации принципиально невозможны, ибо для осуществления подобных колебаний необходимы значительные изменения температуры Солнца на большей части его поверхности, что не наблюдается в реальных условиях. Из анализа формулы Планка следует, что для того, чтобы интенсивность излучения какого-либо района солнечной поверхности в $\lambda 600$ нм увеличилась вдвое, необходимо увеличение температуры в этом месте на 1300 К, а чтобы вдвое увеличилась интенсивность излучения в $\lambda 50$ нм достаточно увеличения температуры на 88 К. Столь незначительные изменения температуры вполне допустимо предполагать в тех местах солнечной поверхности, где усиливается солнечная активность.

Повышенное излучение из активных областей солнечного диска вызывает определенные эффекты в атмосферах планет. Причем радиация с различной частотой влияет на различные слои атмосферы. В связи с инерционностью климатической системы атмосферы изменение солнечной постоянной на 0,1% может быть существенными для влияния на глобальный климат в том случае, если оно устойчиво во временном масштабе порядка десятилетия и более. Для временных масштабов от недель до года климатически значимые изменения солнечной постоянной составляют десятые доли процента, а в течение нескольких дней — около 1% и более. Именно этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что наиболее четкие связи космических факторов с параметрами атмосферы Земли обнаружены для больших периодов времени (периоды Миланковича и ледниковые периоды: 100, 40, 20 тыс. лет) [2]. То есть небольшие вариации солнечной постоянной приводят к значительной реакции планетной атмосферы. Поэтому вряд ли можно говорить о непосредственном изменении нагрева тропосферы. Скорее всего, происходит солнечно-обусловленное изменение в верхней атмосфере и затем осуществляется передача этого возмущения вниз, например, к уровню облаков, как одному из наглядных индикаторов изменений.

Преобразование энергии Солнца в атмосферный процесс может быть: а) вследствие экранирования перистыми облаками и/или надоблачной дымкой из-за изменения содержания активной малой составляющей в атмосфере, когда в выбранном для рассмотрения слое возникает охлаждение, приводящее к изменению атмосферной циркуляции; б) из-за изменения вертикального распределения составляющих атмосферы, приводящему к нарушению теплового баланса вблизи тропопаузы и возникновению вертикальных и горизонтальных атмосферных движений, которые изменяют атмосферную циркуляцию; в) вследствие прямого воздействия вариаций солнечной постоянной R преимущественно в коротковолновом участке спектра. Поэтому проявление солнечной активности в атмосферах планет следует искать, прежде всего, в тех длинах волн, где проявляется образующаяся в атмосферах планет дымка (гидразин, продукты фотолиза метана и аммиака и пр.) и/или активные для данной атмосферы составляющие.

Интенсивность крайнего ультрафиолета (УФ) ($< 0,1$ мкм) изменяется в 2–4 раза в течение солнечного цикла. Это влияет, главным образом, на термосферу. Излучение в области 200–300 нм варьирует на 10–30% в фазе с солнечным циклом и приводит, согласно расчетам, к изменению содержания различных малых активных составляющих в столбе на несколько процентов; особенно значительные вариации этих малых составляющих должны происходить в стратосфере. Вычисления указывают на сопутствующее уменьшение температуры в области стратопаузы. Исследование [19] приводит к выводу, что вариации излучения Солнца в диапазоне 170–390 нм могут представлять собой тот физический агент, который способен связать солнечный цикл с общей циркуляцией атмосферы из-за значительного изменения концентрации малых нейтральных составляющих на уровнях средней атмосферы. Кроме того оказалось, что температура стратосферы чувствительна к вариациям потока солнечного излучения главным образом в области длин волн короче 210 нм. И если стратосферная дымка по какой-то причине уменьшится (из-за вариаций с солнечным циклом), то УФ солнечное излучение будет глубже проникать в атмосферу и это приведет к изменению обилия продуктов фотохимических превращений активных атмосферных составляющих. Под воздействием УФ лучей могут образовываться ядра конденсации и ядра сублимации,

когда пар, минуя жидкую фазу, может переходить непосредственно в твердую фазу. В частности, для атмосферы Земли было замечено, что рост солнечной активности вызывает понижение прозрачности атмосферы, ибо при таком росте активности усиливаются, благодаря увеличению корпускулярной и коротковолновой радиации Солнца, химические превращения в атмосфере, что, в свою очередь, приводит к усилению конденсационных процессов. Основным и решающим является изменение радиационного режима, связанное с появлением и исчезновением высокой облачности и/или дымки. Так, известно, что в годы максимума солнечной активности в земной атмосфере более часто появляются высотные облака типа Cirrus и Cirro-Stratus, и частота появления таких облаков увеличивается почти на 33%.

Аналогичная ситуация может наблюдаться и в атмосфере Сатурна, вызывая в годы максимума солнечной активности образование и в годы минимальной активности Солнца разрушение аэрозольного тумана из продуктов фотолиза метана и аммиака; это вносит соответствующие изменения в отражательные, поглощательные и излучательные свойства облачных структур и надоблачной высотной дымки. Так, например, для атмосферы Земли было получено [8, 9], что суточная амплитуда изменения давления больше в эпоху максимума, чем в годы минимума. Там же указывается на возрастание числа циклонов в годы максимума солнечной активности. Ясно, что этот факт подтверждает значительное повышение интенсивности циркуляции в эти годы, которая проявляется в росте барических градиентов, а это приводит к увеличению перепадов энергии, а значит, и к усилению общей циркуляции атмосферы. Специально поставленные измерения показали [6], что горизонтальный перенос момента в тропосфере происходит в основном в верхней ее части, где существуют мощные струйные течения, а вертикальный перенос осуществляется циклонами, антициклонами и другими вихревыми ячейками циркуляции. Это значит, что любое воздействие на атмосферные течения в верхней части тропосферы, даже при неизменном потоке поступающей в тропосферу энергии, влияет на распределение и на степень активности циклонов и антициклонов, т.е. на циркуляцию в нижней части тропосферы. В свою очередь, верхняя часть тропосферы тесно связана с нижней стратосферой, которая отчетливо реагирует на изменение солнечной активности и межпланетного магнитного поля. Здесь, видимо, и кроется ключ к ответу на загадку об опосредованности влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу.

Таким образом, значительное повышение солнечной активности или даже всякая крупная перестройка режима солнечной деятельности дестабилизирует планетную атмосферу. Поэтому солнечная активность по отношению к планетной атмосфере выступает, прежде всего, как тотальный синхронизатор [4] самых разных физико-атмосферных явлений. Синхронно протекающие процессы воздействуют друг на друга, что ведет к формированию циклических связей, в частности, и на основе резонансных отношений, которые усиливают эффект воздействия. С понижением солнечной активности эти связи могут частично распадаться, заменяясь более случайной системой отношений. Одно из наиболее важных следствий всего этого — изменение условий прохождения и трансформации основного потока солнечной энергии, т.е. в конечном счете, изменение КПД преобразований тепловой энергии солнечной радиации в энергию активных процессов в разных слоях планетной атмосферы. Конечно, разные процессы обладают неодинаковой степенью инерционности и скорости протекания. Наименее инерционным образованием по отношению к космическим влияниям является магнитосфера, наиболее инерционным — глубинные слои атмосферы.

4. ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ САТУРНА ИЗ-ЗА ВАРИАЦИЙ ИНСОЛЯЦИИ

Известно, что в атмосфере Сатурна свыше 90% водорода, до 10% гелия, остальные газы, включая метан и аммиак, находятся в виде примесей на уровне меньше десятых долей процента [17, 33]. Вследствие значительной удаленности от Солнца Сатурн имеет довольно низкую температуру в фотохимически активных областях атмосферы. Это приводит к фотохимическим процессам, основными продуктами которых являются углеводороды (в том числе довольно сложные) и аммиак NH_3 . Особо следует отметить, что полиацетилены поглощают солнечный свет почти до длины волны 400 нм, тогда как CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 — только короче 180 нм [33, 35]. В связи с этим, *солнечный цикл, последствия орбитального движения и наличие колец индуцируют изменение количественного и качественного состава в верхних слоях атмосфер планет-гигантов*. Получающиеся вариации оптической толщины фотохимической дымки, в свою очередь, могут в значительной степени изменять доступ поступающей от Солнца энергии к тем слоям в атмосфере, где происходит формирование погоды. Мы предполагаем, что именно таким способом и осуществляется опосредованное влияние вариаций облучения планетных атмосфер Солнцем на кинематику, динамику и общую структуру видимого облачного слоя.

Радиационные константы атмосферы Сатурна на определенном уровне зависят от химического состава, давления, температуры и других условий, уменьшаясь от почти 10 лет на уровне видимых облаков, до месяцев на уровне тропопаузы и дней в стратосфере. Наличие значительного изменения облучения атмосферы Солнцем из-за физико-орбитальных параметров Сатурна и присутствие колец приводит к вариациям общего количества молекул CH_4 , NH_3 и продуктов их фотодиссоциации. Цикл солнечной

активности также индуцирует 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.

Поток солнечного излучения в области короче 120 нм меняется вдвое в течение солнечного цикла вследствие сильного влияния солнечной активности на эмиссию из переходной области между хромосферой и короной; интегральный поток в линии L_{α} (121,6 нм) меняется в пределах от 2 до 8 эрг/(см²·с), т.е. до 400%. Излучение в области 200–300 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, представленное в [12], приводит к выводу, что вариации излучения Солнца в диапазоне 170–390 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 [2]. Стратосферная сезонная модель климата [13] предсказывает для Сатурна сезонные изменения на уровне давления 0,1 бар с отставанием примерно на один сезон (~7–7,5 лет). В работе [11] 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. 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.

5. ВЛИЯНИЕ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА ИЗМЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ САТУРНА

Наблюдаемые сезонные эффекты в слоях видимой тропосферы могут быть связаны еще и с конденсацией и конвекцией. Поэтому динамическая шкала времени в верхней тропосфере и нижней стратосфере составляет всего несколько десятков часов [33, 37]. В связи с этим большие изменения инсоляции Сатурна могут привести и к большим краткосрочным динамическим изменениям. Примером является конвективный поток в верхней части конвективной зоны [15] и быстрая сублимация предположительно кристаллов NH₃ на этой глубине в ответ на повышение инсоляции. Так, изменение 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). То есть изменение инсоляции управляет скрытым тепловым потоком, когда теплоемкость атмосферы является достаточно большой и температура остается практически неизменной, а «лишнее» солнечное излучение поглощается частицами сильнее, чем необходимо для установления равновесия. Именно таким образом поставляется необходимая для сублимации скрытая теплота. И наоборот, снижение поглощенной инсоляции компенсируется скрытой теплотой, поставляемой газообразным аммиаком при замораживании частицы. Поэтому режим верхних слоев атмосферы Сатурна в значительной степени определяется еще и солнечной активностью из-за воздействия солнечной радиации в разных длинах волн, особенно — в коротковолновой части спектра [1, 8, 9].

Напомним, что в годы максимума возрастает число циклонов и наблюдается значительное повышение интенсивности циркуляции; это 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 отсутствует. Именно такую картину мы и наблюдаем в северном полушарии Сатурна в период с 2007 по 2010 гг.

Как видно из рис. 1, за 2–3 года до моментов равноденствия в 1966, 1980 и 1995 гг. число R , характеризующее солнечную активность, изменялось в пределах от 40 до 100, и даже до 180 в равноденствие 1980 г. Но возле момента равноденствие в 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности и значение R практически не отличалось от нулевого значения на протяжении многих месяцев. Это говорит о том, что в момент равноденствия 2009 г. воздействие облучения Солнцем на атмосферу Сатурна было минимальным за все четыре исследованных нами момента равноденствия планеты с 1964 по 2012 гг. А конвекция в атмосфере Сатурна в 2009 г. пребывала на минимально возможном уровне [10, 18]. Поэтому после выхода из тени колец глубокие облачные слои в зимнем северном полушарии планеты так и остались в «замороженном» состоянии при практически полном отсутствии активных процессов на Солнце, которые особенно заметно проявляются в ультрафиолетовом участке спектра. При таких физико-химических условиях существующий до этого момента закрытый кольцами малоактивный облачный слой остался на прежнем глубоком уровне, существенно ниже уровня тропопаузы. В совокупности это позволило земному наблюдателю и дальше беспрепятственно регистрировать над облаками мощный

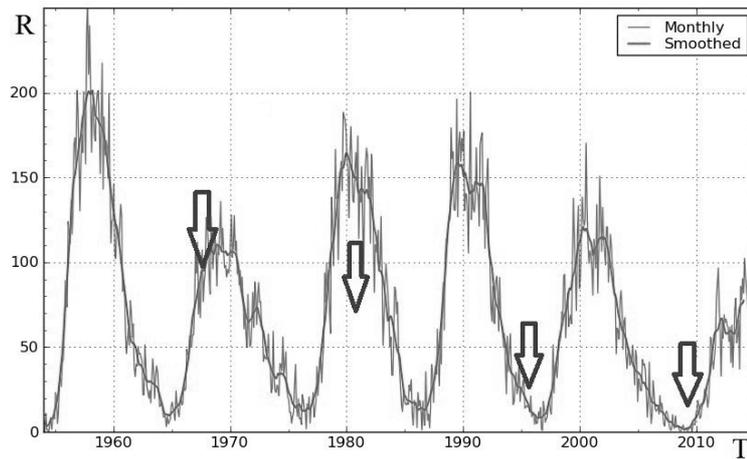


Рис. 1. Изменение индекса солнечной активности R со временем T . Стрелками отмечены моменты равноденствий на Сатурне (http://sidc.oma.be/html/sidc_graphics.html).

слой газа из метана и аммиака [28]. Из-за такого набора условий в атмосфере Сатурна метановое поглощение в малоактивном зимнем полушарии осталось практически неизменным и равным поглощению в бывшем летнем максимально облучаемом солнечным светом полушарии.

6. ВЫВОДЫ

Анализ результатов о распределении метанового поглощения по диску Сатурна за период 1964–2012 гг. показал существенные сезонные изменения на уровнях видимых облаков и в надоблачной дымке. Меридианный ход метанового поглощения в моменты равноденствий в 1966 и 1995 гг. имеют противоположный ход к результатам наблюдений в равноденствие 1980 г. Но вот ожидаемого в равноденствие 2009 г. отличия в ходе метанового поглощения в южном и северном полушариях Сатурна, аналогичного до 1980 г., не произошло. 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. Так, 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 170–390 нм могут представлять тот физический агент, который способен связать солнечный цикл с общей циркуляцией атмосферы. Имеющиеся сезонные модели климата Сатурна хорошо объясняют сезонные изменения метанового поглощения в атмосфере планеты, имевшие место в моменты равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. Но результаты наблюдений северного полушария 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 тогда изменения инсоляции Сатурна могут привести к значительным краткосрочным динамическим изменениям.

В минимуме солнечной активности существенно уменьшается конвекция, и перемешивание атмосферы практически отсутствует. Именно такую картину мы наблюдаем в северном полушарии Сатурна в 2007–2010. За 2–3 года до моментов равноденствий в 1966, 1980 и 1995 гг. число R , характеризующее солнечную активность, варьировалось 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. Согласно наблюдениям с КА «Кассини», 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 остались в «замороженном» состоянии при практически полном отсутствии активных процессов на Солнце. Поэтому закрытый до этого момента кольцами малоактивный облачный слой остался на прежнем низком уровне, что позволило беспрепятственно регистрировать мощный слой газообразных метана и аммиака. Поскольку обычно такие новообразования имеют фотохимическую природу, то можно предположить, что из-за минимальной активности Солнца в атмосфере Сатурна не хватило энергии для образования фотохимического аэрозольного слоя. Обычно он образовывался в нижней стратосфере (верхней тропосфере) планеты и не позволял в предыдущие моменты равноденствий глубоко «заглядывать» к тропосферным облакам, уменьшая метановое поглощение и повышая альбедо; то есть в этой части атмосферы не образовалась ни высотная дымка, ни разреженный слой облаков.

Из-за такого набора физико-химических условий в атмосфере Сатурна метановое поглощение в малоактивном зимнем полушарии осталось практически неизменным и равным поглощению в бывшем летнем максимально облучаемом солнечным светом полушарии.

1. *Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И.* Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 351 с.
2. *Герман Дж.Р., Голдберг Р.А.* Солнце, погода и климат. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 319 с.
3. *Длугач Ж.М.* Отражение света многослойной планетной атмосферой // *Астрон. вестник.* — 1982. — **17**, № 2. — С.234–239.
4. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 260 с.
5. *Мирошниченко Л.И.* Солнечная активность и Земля. — М.: Наука, 1981. — 144 с.
6. *Морской Г.И.* О конвекционной теории изменения давления // *Метеорология и гидрология.* — 1967. — № 1. — С.123–142.
7. *Стоун П.* Метеорология атмосферы Юпитера // *Юпитер.* Т.2. — М.: Мир, 1979. — С.460–500.
8. *Эйгенсон М.С.* Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. — Львов: Издательство Львовского университета, 1957. — 230 с.
9. *Эйгенсон М.С., Гневышев М.Н., Оль А.И., Рубашев Б.М.* Солнечная активность и ее земные проявления. — М.-Л.: ОГИЗ, 1948. — 323 с.
10. *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**, № 3–4. — P.119–147.
11. *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.
12. *Callis L.B., Nealy J.E.* Solar UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents // *Geophysical Research Letters.* — 1978. — **5**. — P.249–252.
13. *Cess R.D., Carlson B.E., Caldwell J., et al.* Latitudinal variations in Jovian stratospheric temperatures // *Icarus.* — 1981. — **46**. — P.249–255.
14. *Cess R.D., Cocran J.* A Saturnian stratospheric seasonal climate model // *Icarus.* — 1979. — **38**. — P.349–357.
15. *Conrath B.J., Pirraglia J.A.* Thermal structure of Saturn from Voyager infrared measurements — Implications for atmospheric dynamics // *Icarus.* — 1983. — **53**. — P.286–292.
16. *Dlugach J.M., Morozhenko A.V., Vidmachenko 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.
17. *Drossart P., Courtin R., Atreya S., Tokunaga A.* Variations in the Jovian atmospheric composition and chemistry // *Time-variable phenomena in the Jovian system.* — Washington: NASA-SP-494. — 1989. — P.344–362.
18. *Fletcher L.N., Achterberg R.K., Greathouse Th.K., et al.* Seasonal change on Saturn from Cassini/CIRS observations 2004–2009 // *Icarus.* — 2010. — **208**, Issue 1. — P.337–352.
19. *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.
20. *Reese E.J.* Recent photographic measurement of Saturn // *Icarus.* — 1971. — **15**, № 3. — P.466–479.
21. *Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Miniailo N.F.* Seasonal variations in the atmosphere of Saturn // *Soviet Astronomy Letters.* — 1983. — **9**. — P.135–136.
22. *Stone P.H.* The Dynamics of the Atmospheres of the Major Planets // *Space Science Reviews.* — 1973. — **14**, Issue 3–4. — P.444–459.
23. *Tejfel V.G.* Optical properties and structure of Saturn's atmosphere // *Solar System Research.* — 1980. — **14**, № 1. — P.1–16.
24. *Tejfel V.G., Karimov A.M., Kharitonova G.A.* Comparison of the Latitudinal Variations of the Methane Absorption // *Astronomicheskii Tsirkulyar.* — 2010. — **1573**. — P.1–2.
25. *Tejfel V.G.* Molecular absorption and the possible structure of the cloud layers of Jupiter and Saturn // *Journal of the Atmospheric Sciences.* — 1969. — **26**, № 5. — P.854–859.
26. *Tejfel V.G.* Molecular-Absorption Distribution over Saturn's Disk from the 1995 Observations Based on the Zonal CCD Spectrophotometry: Observational Results // *Solar System Research.* — 1997. — **31**, Issue 3. — P.198–206.
27. *Tejfel V.G., 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.* — V. 5. Abstr. 322. — P.322.
28. *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 № 1533.* — P.1250.
29. *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 Science Conference, held March 10–14, 2008 in League City, Texas. LPI Contribution № 1391.* — P.1530.
30. *Temma T., Chanover N.J., Simon-Miller A.A., Glenar D.A., Hillman J.J., Kuehn D.M.* Vertical structure modeling of Saturn's equatorial region using high spectral resolution imaging // *Icarus.* — 2005. — **175**, Issue 2. — P.464–489.
31. *Tomasko M.G., West R.A., Orton G.S., Tejfel V.G.* Clouds and aerosols in Saturn's atmosphere // *In: Saturn (A85–33976 15–91).* Tucson, AZ, University of Arizona Press. — 1984 — P.150–194.

32. *Vidmachenko A.P.* Electrophotometry of Saturn. II — Spectral brightness distribution along the central meridian // *Astrometriia i Astrofizika*. — 1984. — № 51. — P.56–62,
33. *Vidmachenko A.P.* Giant planets — Theoretical and observational aspects // *Astronomicheskii Vestnik*. — 1991. — **25**. — P.277–292.
34. *Vidmachenko A.P.* Possible effect of the rings on the photometric properties of Saturn's cloud layer // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 1985. — **1**. — P.12–15.
35. *Vidmachenko A.P.* Seasonal variations in the optical characteristics of Saturn's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 1999. — **15**, № 5. — P.320–331.
36. *Vidmachenko A.P.* Seasons on Saturn. I. Changes in reflecting characteristics of the atmosphere at 1964–2012 // *Astronomical School's Report*. — 2015. — **11**, № 1–2. — P.6–19.
37. *Vidmachenko A.P.* The appearance of seasonal variations in Saturn's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 1987. — **3**. — P.10–12.
38. *Vidmachenko A.P.* The influence of solar activity on seasonal variation of the methane absorption in Saturn's atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 2015. — **31**, Issue 3. — P.38–53.
39. *Vidmachenko A.P., Dlugach Zh.M., Morozhenko A.V.* Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk // *Solar System Research*. — 1984. — **17**, № 4. — P.164–171.
40. *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-Å bands // *Icarus*. — 1982. — **51**. — P.51–64.

Поступила в редакцию 3.08.2015
Принята к печати 31.08.2015