

V.D. Vdovichenko*, G.A. Kirienko,

DTOO "V.G. Fessenkov Astrophysical Institute ", Almaty, Kazakhstan

* – ydv1942@mail.ru

AMMONIA ABSORPTION ASYMMETRY ALONG THE LATITUDES OF THE NORTHERN AND SOUTHERN HEMISPHERES OF JUPITER FROM 2004-2016 OBSERVATIONS

Abstract. On the basis of 2004-2016 observations that were processed with "The absorption colored map of the disk of Jupiter" program, the longitude-latitude and temporal ammonia absorption variations in the NH_3 660 and 789 nm bands in the atmosphere of Jupiter, were considered in details. The results show significant differences in the observed variations of the two bands, which may be due to their formation at the different atmosphere levels, which differ in chemical compositions, densities, and vertical extensions of the cloud structures. However, both the bands studied, surely demonstrate ammonia depletion in the northern hemisphere compared with the southern one, especially in the interjacent region between the light Equatorial Zone and the dark Northern Equatorial Belt. This NH_3 bands were also used for studying ammonia absorption variations in the morphological structures on Jupiter, with "The morphology of Jupiter" program that had been specially written in Delphi for this purpose. These results are well consisted with those ones (in particular for the GRS), which have been obtained in the radio range (8-12 GHz) [1].

Key words: Jupiter, ammonia, absorption bands.

В.Д. Вдовиченко*, Г.А. Кириенко

ДТОО «Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИИ В ХОДЕ ПОГЛОЩЕНИЯ АММИАКА В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ ЮПИТЕРА В 2004-2016 ГОДАХ

Аннотация. На основе наблюдательного материала, полученного в 2004-2016 годы и обработанного с помощью программы «Цветная карта поглощения по диску Юпитера», были детально рассмотрены широтно-долготные и временные вариации аммиачного поглощения в полосах NH_3 660 и 789 нм в атмосфере Юпитера. Результаты показывают значительные различия в наблюдаемых вариациях этих двух полос, что может быть следствием их формирования на разных уровнях атмосферы, различающихся как химическим составом, так и плотностью и вертикальной протяженностью облачных структур. Однако обе исследуемые полосы уверенно демонстрируют дефицит аммиака в северном полушарии по сравнению с южным, особенно в переходной области между светлой Экваториальной Зоной и темным Северным Экваториальным Поясом. Указанные полосы были использованы также для исследования вариаций аммиачного поглощения в морфологических структурах на Юпитере с помощью программы «Морфология Юпитера», написанной на языке Дельфи специально для этой цели. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами (в частности, для района БКП), полученными в радиодиапазоне (8-12 GHz) [1].

Ключевые слова: Юпитер, аммиак, полосы поглощения.

Введение

Как известно, процессы, происходящие в атмосфере Юпитера, по-разному влияют на форму пространственно-временного распределения компонентов, входящих в состав его атмосферы. Поэтому большую помощь в изучении этих процессов оказывают регулярные наблюдения различного рода вариаций (временных, широтных, долготных, и др.) абсорбционных полос этих компонентов. Для подобных целей часто используются метан (CH_4) и особенно - аммиак (NH_3), содержание которого меняется и под влиянием динамики, и вследствие его конденсации. Речь может идти не только о диске Юпитера, но и об отдельных морфологических структурах, в частности, о Большом Красном Пятне (БКП или GRS), о его зонах и поясах, и пр.

Для изучения поверхности Юпитера исследователи используют весь доступный спектральный диапазон, начиная от ультрафиолета и кончая радиоволнами. Например, в работе [2] представлены результаты исследования северного полушария Юпитера, полученные из измерений NH_3 в УФ (180-230 нм) диапазоне с помощью HST (Хаббл-телескопа). Было обнаружено, что высотные профили NH_3 варьируют с широтой, где из всех наблюдаемых регионов самое высокое отношение смеси NH_3 наблюдалось на 6°N (2×10^{-9} при 100 мбар), а самое малое - на 25°N (3.5×10^{-10} при 100 мбар). С помощью фотохимической модели были также рассчитаны вертикальные коэффициенты турбулентного перемешивания. Оказалось, что распределение плотности аммиака весьма чувствительно к этой атмосферной характеристике, которая меняется в зависимости от широты, причем область сильного вертикального перемешивания расположена на 6°N ($3 \times 10^3 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при 130 мбар), и оно немного снижается в сторону средних широт ($1.4 \times 10^3 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при 130 мбар).

Существует и ряд других наблюдательных исследований в УФ и ИК, сравнивающих отдельные поверхностные структуры (GRS, Южную тропическую зону (STZ), центр диска Юпитера (экватор), и т. д.). К таковым, например, относится работа [3], авторы которой из УФ-спектров, полученных с International Ultraviolet Explorer (IUE) satellite обнаружили, что отношение смеси NH_3 над GRS возрастает в 3-10 раз в диапазоне 80-125 мбар по сравнению с STZ и центром диска. Авторы [2] этот результат оспаривают, что говорит о необходимости продолжения наблюдений. Южное полушарие Юпитера от 10°S до 36°S (вдоль ЦМ) наблюдали Lara et al. (1998) [4] с Infrared Telescope Facility (IRTF), где были использованы уже ИК линии NH_3 . Их данные свидетельствуют о том, что существует не только широтная, но и долготная зависимость отношения смеси NH_3 . Для уровня давления 240 мбар (на нескольких долготах) Lara et al. определяют, что пик отношения смеси NH_3 находится на $15\text{--}18^\circ\text{S}$, и содержание NH_3 уменьшается дальше по направлению к югу, к $30\text{--}35^\circ\text{S}$ широты, где обилие NH_3 примерно в 40 раз ниже. Это согласуется с общей тенденцией снижения содержания NH_3 при переходе от экватора к полюсам, как показывают и измерения [2].

Griffith et al. (1992) [5] получили обилия NH_3 и PH_3 над GRS и окружающим STZ из наблюдений, проведенных с помощью Voyager Infrared Imaging Spectrometer (IRIS). Было установлено, что над GRS (уровень 300 мбар) NH_3 обеснен на 75% по сравнению с STZ.

IRTF данные [4] для GRS означают, что распределение NH_3 на 380 мбар не меняется по сравнению с другими долготами вдоль широты GRS ($\sim 21^\circ\text{S}$), что особенно хорошо согласуется с результатами анализа [5]. В [4] отмечают, что для GRS отношение смеси аммиака на уровне 380 мбар на 30% выше (лишь незначительно больше, чем их погрешности измерений) по сравнению с соседними широтами вдоль той же долготы ($\sim 27^\circ\text{W}$, System II). На этом уровне давления, их пики отношения смеси NH_3 находятся снова вблизи 13°S и $36^\circ\text{--}39^\circ\text{S}$ с содержаниями больше, чем на широте GRS. На долготе 110° , в то время как обилие NH_3 не намного больше отличается от такового на широте GRS, пики содержания NH_3 между 27°S и 30°S с содержанием примерно в два раза больше, чем содержание в GRS. Эти результаты указывают на то, что GRS не выступает в качестве исключительной области. Более того, сравнение с результатами IRTF для SEB на тех же уровнях давления указывает, что аммиак может проявлять локальные изменения, иллюстрирующие, что нужно соблюдать осторожность при заявлениях общего характера о поведении аммиака, которое следует из результатов по SEB и GRS.

Здесь очень важно отметить, что результаты и [4] и [5] указывают на то, что на уровне 380 мбар над большей частью наблюдаемых регионов NH_3 профиль является насыщенным (15-100% влажности). Модельные расчеты [2] показывают, что NH_3 находится в сверхнасыщенном состоянии именно ниже тропопаузы (вблизи 100 мбар). Поскольку уровни давления, наблюдаемые в ИК диапазоне (> 300 мбар), лежат ниже тех, которые могут зондироваться с помощью УФ измерений, а непрозрачность NH_3 , к тому же, быстро возрастает при увеличении давления, то те и другие результаты могут значительно отличаться друг от друга. Отсюда следует вывод, что исследования поверхности Юпитера далеко не закончены, и каждое из них лишь дополняет друг друга.

Результаты исследования

С помощью программы «Цветная карта поглощения по диску Юпитера», описанной нами в предыдущих статьях [6-9], была проведена обработка наблюдательного материала, полученного в течение ряда лет, детально рассмотрены широтно-долготные и временные вариации аммиачного поглощения в атмосфере Юпитера за период 2004-2016 годы. Данные хранятся в архиве лаборатории в виде атласов метаново-аммиачного поглощения. Ниже на рисунках 1-9 представлены фрагменты вариации только аммиачного поглощения вдоль центрального меридиана (ЦМ) планеты за указанный период, хотя аналогичные результаты имеются и для 6 полос поглощения метана.

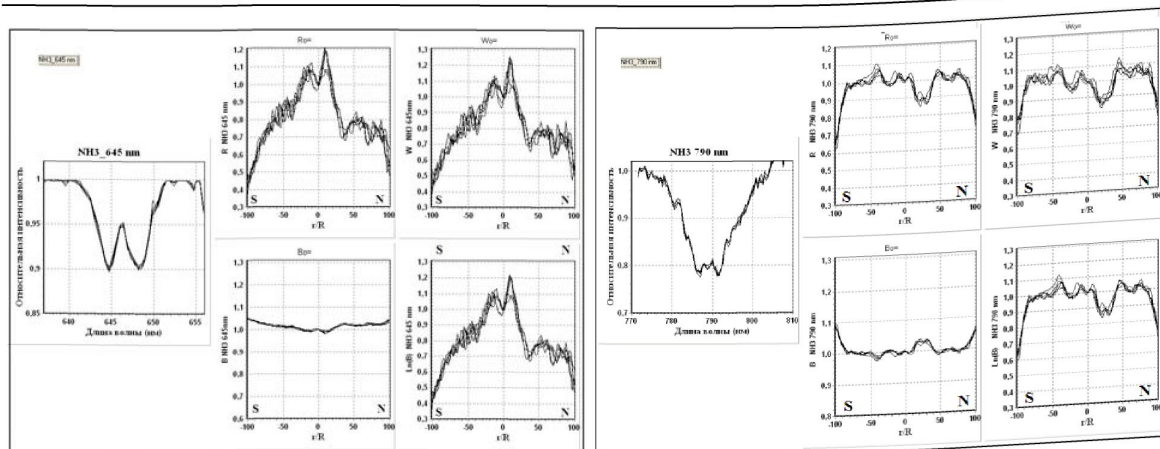


Рисунок 1 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2004 году

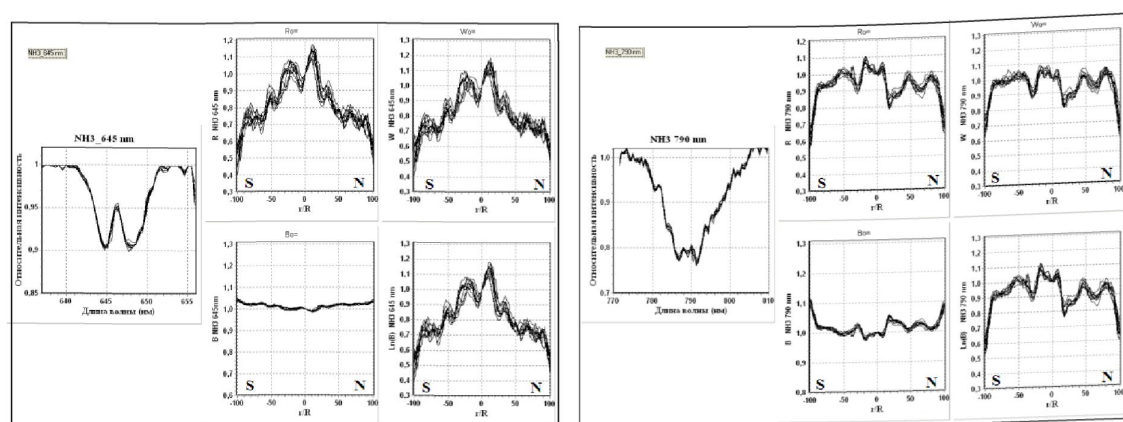


Рисунок 2 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2005 году

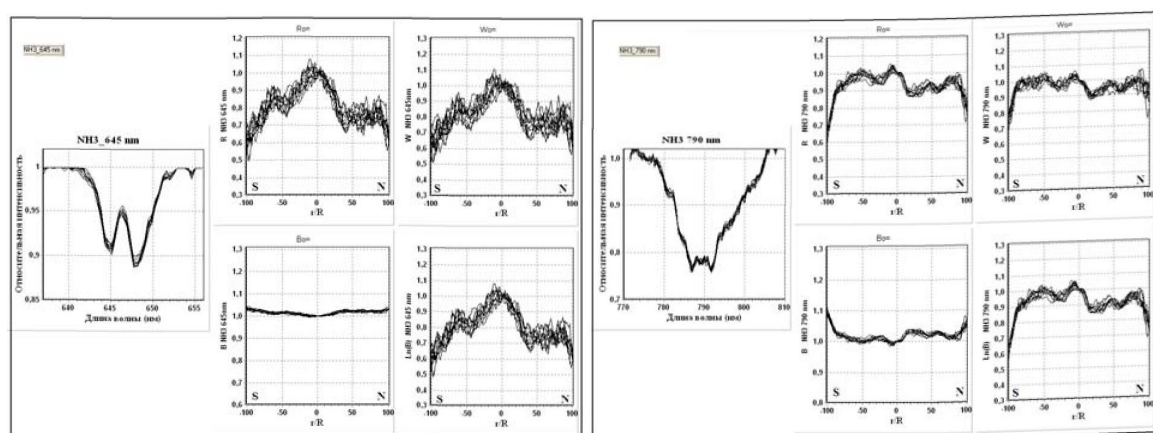


Рисунок 3 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2009 году

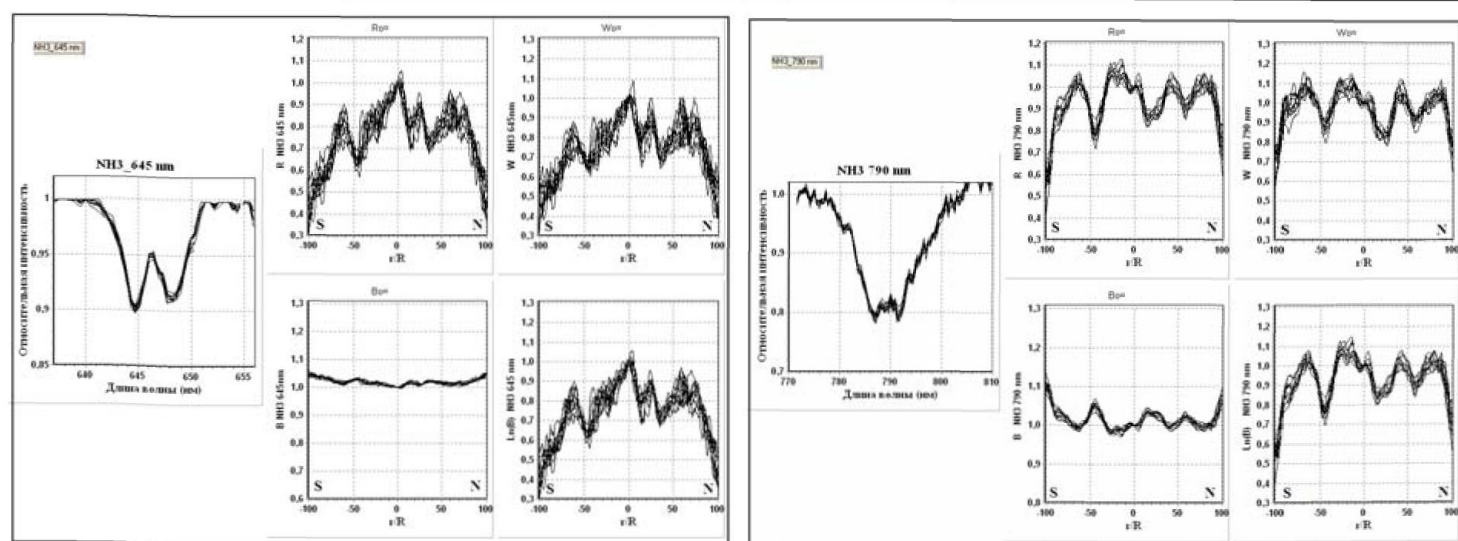


Рисунок 4 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2010 году

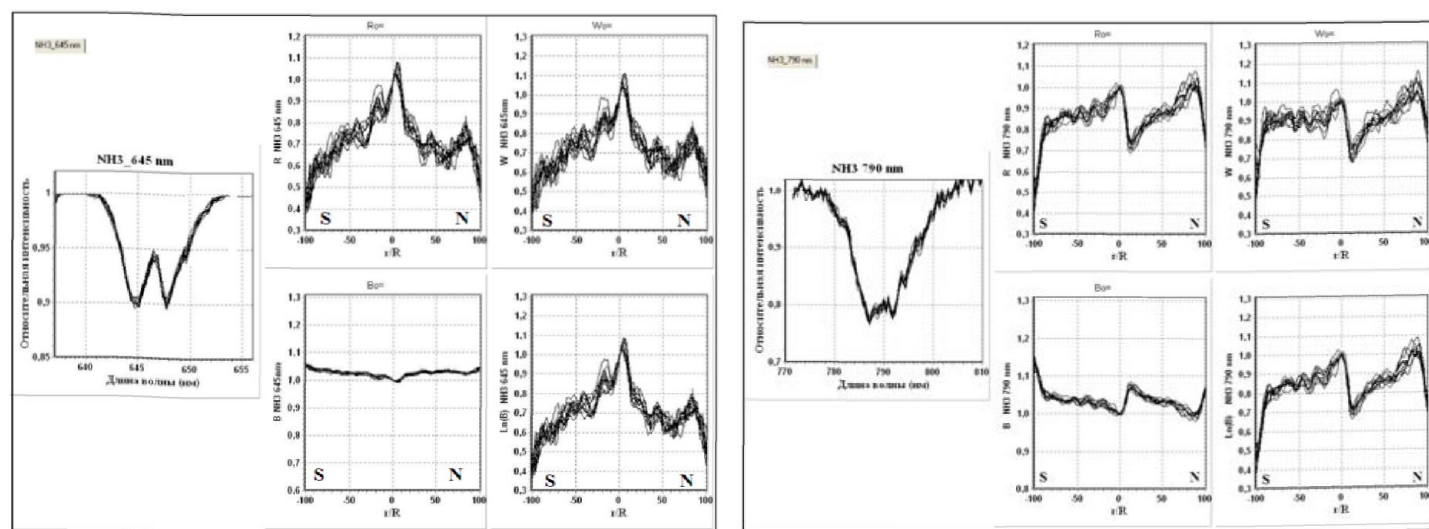


Рисунок 5 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2012 году

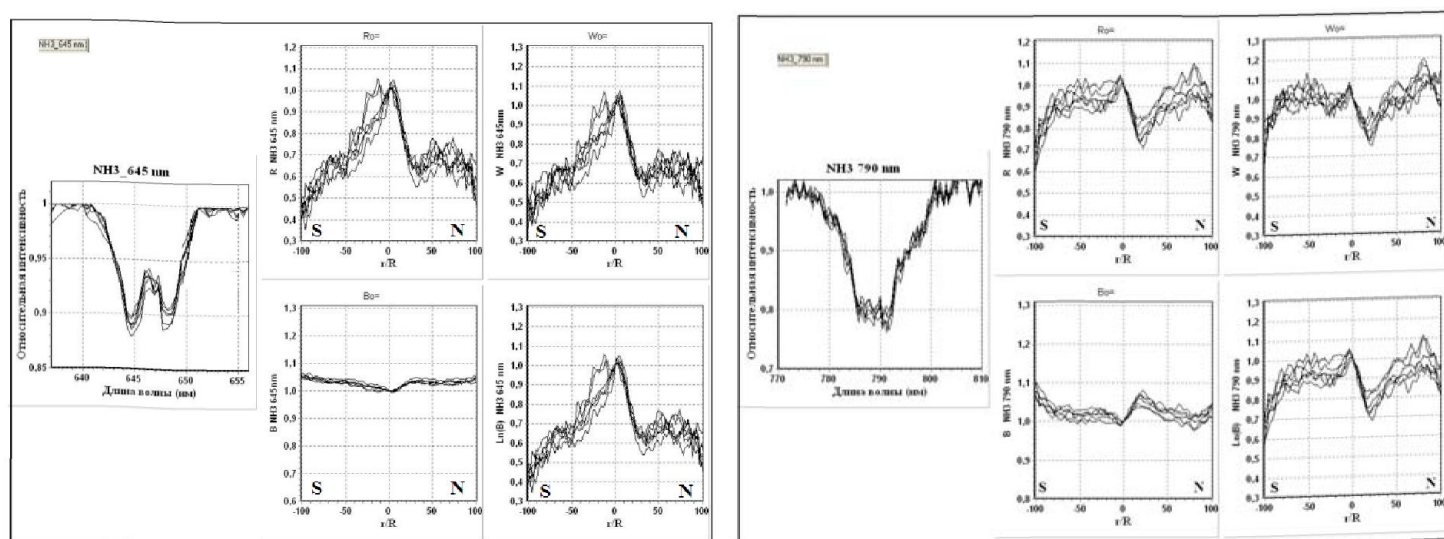


Рисунок 6 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2013 году

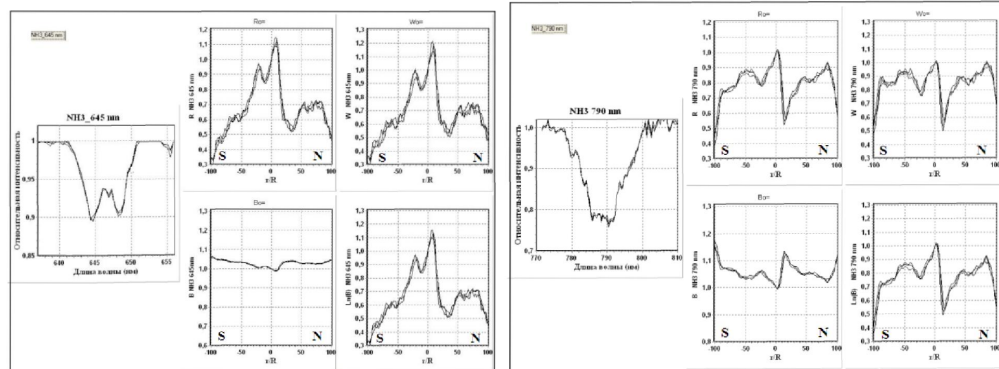


Рисунок 7 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2014 году

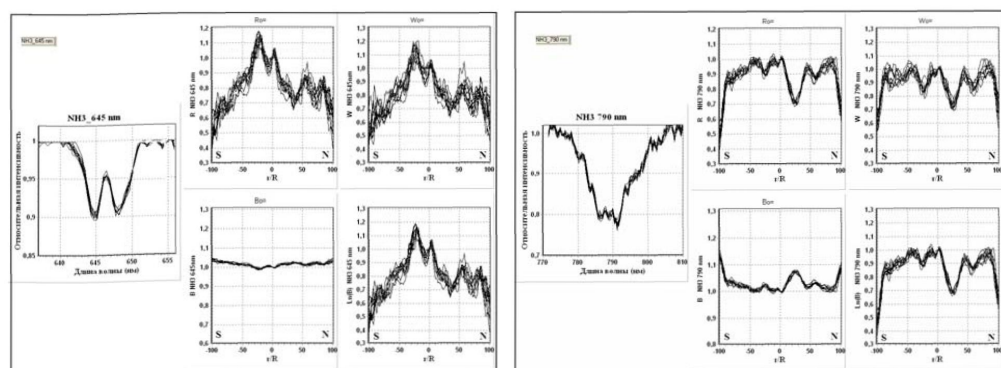


Рисунок 8 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2015 году

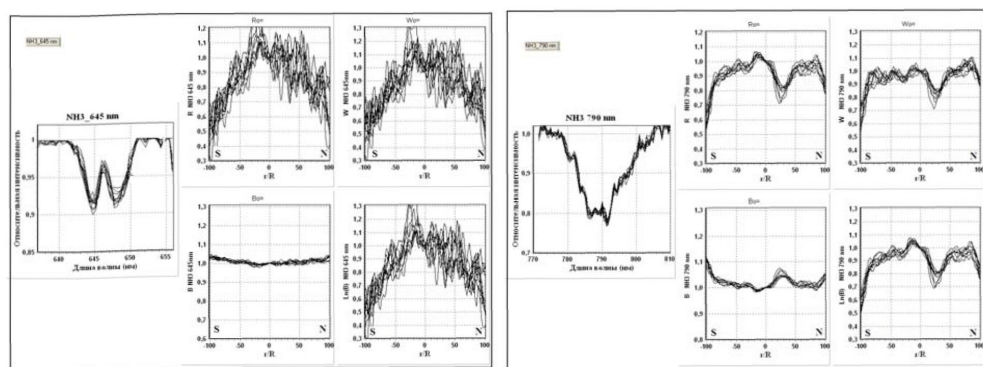


Рисунок 9 – Меридиональный ход поглощения по Юпитеру в полосах поглощения NH_3 645 (слева) и 789 нм (справа) в 2016 году

Как видно из представленных графиков, наблюдаются значительные временные и широтные вариации аммиачного поглощения вдоль ЦМ Юпитера. Причем, вариации поглощения для двух полос аммиака (NH_3) значительно отличаются друг от друга, что, по-видимому, объясняется различиями в химическом составе, плотности и вертикальной протяженности облачных структур, соответствующих уровням формирования данных полос поглощения. Тем не менее, по обоим полосам поглощения уверенно наблюдается дефицит аммиака в северном полушарии по сравнению с южным, особенно в переходной области между светлой экваториальной зоной и темным северным экваториальным поясом. Так, например, максимум дефицита аммиака в NEB по отношению к EZ (примерно в два раза) наблюдался в 2014 году.

Еще в 2004 году В.Г. Тейфелем была обнаружена странная депрессия аммиачного поглощения в низкоширотном поясе северного полушария Юпитера. На международной планетной конференции в США в 2005 г был представлен постер [10] с описанием полученных результатов.

Спектральные наблюдения Юпитера в последующие годы также обнаруживали эту особенность, причем были проделаны разные эксперименты, чтобы показать, что эта особенность реальна, а не вызвана какими либо инструментальными эффектами.

Очень важным оказалось появившееся в 2016 году в Science сообщение американских радиоастрономов о наблюдениях Юпитера в миллиметровом диапазоне с высоким угловым разрешением. Для этого использовалась система из 27 25-метровых радиотелескопов Very Large Array (VLA), работающая в режиме радиоинтерферометра.

Изображения и карты Юпитера в радиодиапазоне позволяют заглянуть сквозь облака на глубину до 90-100 км (~ 8 атм) и увидеть горячие области, характеризующие повышенную прозрачность, соответствующую пониженному содержанию аммиака, прослеживая вертикальные неоднородности, особенно заметные в районе экваториальной волновой системы и в «кильватере» GRS (рисунок 10 [1]).

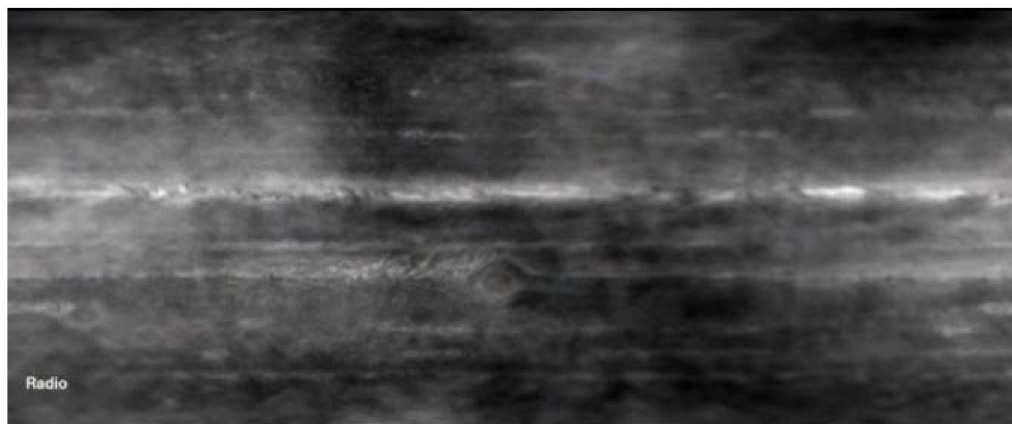


Рисунок 10 – Карта меридиональной развертки Юпитера в радиодиапазоне 8-12 GHz [1]

Для исследования вариаций морфологических структур на Юпитере нами на языке Дельфи была написана программа «Морфология Юпитера». Программа оцифровывает снимок карты меридиональной развертки Юпитера (если цветная, то в трёх цветах R, G, B) и представляет их в виде числовых таблиц. Следуя за курсором мыши или автоматически перемещаясь вдоль снимка, программа считывает для каждой долготы меридиональные разрезы в трех длинах волн, интегрирует их в заданном диапазоне долгот и выводит на график серию меридиональных разрезов, которые затем сравниваются с меридиональными вариациями метанового и аммиачного поглощения, полученными по результатам наших собственных спектральных наблюдений.

С помощью разработанной нами программы по оцифровке изображений исследовались представленные на радиокартах Юпитера вариации яркостной температуры в диапазоне частот 8-12 GHz и соответствующего ей поглощения NH_3 . Фрагмент работы программы в районе кильватера GRS в виде скриншота представлен на рисунке 11, где разрезы по X соответствуют вариациям NH_3 с широтой, а разрезы по Y – долготным вариациям в районе минимума поглощения, соответствующего переходной области между светлой Экваториальной зоной EZ и темным Северным экваториальным поясом NEB.

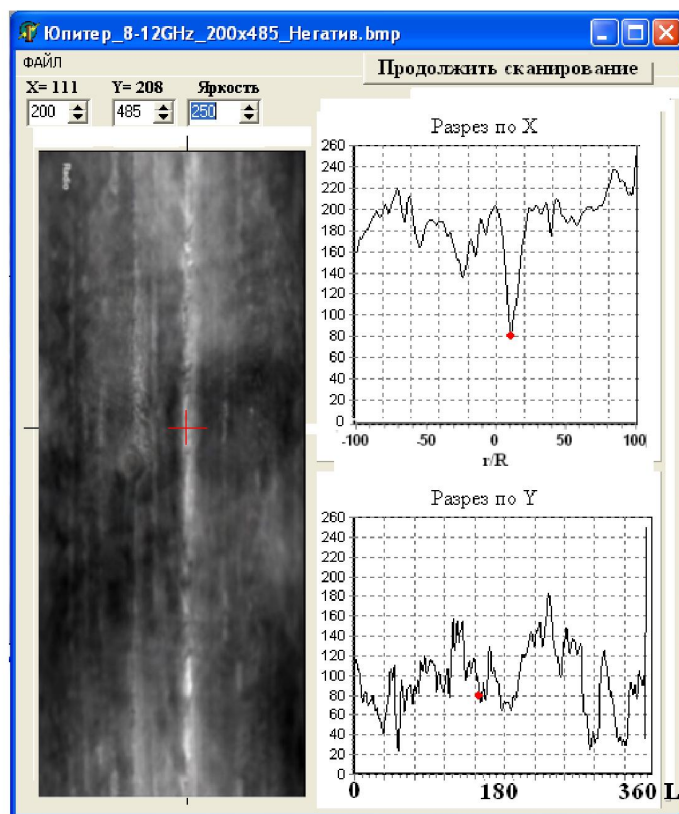


Рисунок 11 – Скриншот программы «Морфология Юпитера» при обработке карты цилиндрической меридиональной развертки в радиодиапазоне 8-12 GHz

Если соотнести яркость на карте с содержанием газообразного NH_3 на луче зрения, то его вариации по всему диску колеблются примерно в пять раз, что указывает на сильную неоднородность облачных структур в диапазоне глубин 90-100 км от верхней границы аэрозоля.

На рисунке 12 представлено сравнение широтного хода аммиачного поглощения на Юпитере по нашим оптическим спектральным наблюдениям (кривые 1) и широтных вариаций поглощения аммиака по радионаблюдениям на VLA (кривые 2)

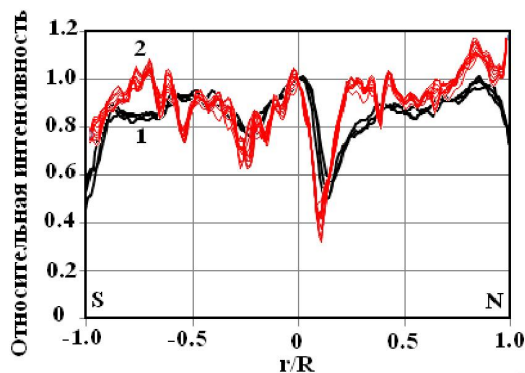


Рисунок 12 – Меридиональные (S – N) профили хода поглощения аммиака в районе кильватера GRS в 2014 году: 1 – Эквивалентная ширина полосы NH_3 778 нм по нашим спектрограммам, 2 – относительная яркость в радиодиапазоне. Обе величины нормированы к значению в центре диска для удобства сравнения

Следует обратить внимание на хорошее сходство наших результатов меридионального хода поглощения в полосе 787 нм, в районе кильватера GRS с данными, полученными в радиодиапазоне на частотах 8-12 GHz.

Сравнение результатов наших измерений широтного хода поглощения NH_3 в полосах видимого диапазона спектра и усредненного по долготам широтного хода поглощения NH_3 по измерениям яркостных температур на VLA в диапазоне миллиметрового теплового излучения на частотах 8-12 GHz показывают, что аммиачное поглощение в Северном тропическом поясе (NTB) и на других широтах носит переменный характер как в долготном направлении, так и во времени. Как уже отмечалось выше, условия формирования аммиачного поглощения для разных частотных диапазонов не одинаковы. Даже по двум полосам 645 и 787 нм наблюдается систематическое различие в широтном ходе их эквивалентных ширин.

Измерения спектрограмм Юпитера, полученных в разное время, показывают разную глубину депрессии аммиачного поглощения (см. рисунки 1-9), вызванную как долготным, так и временным фактором. Из анализа карты радиоизлучения (рисунок 11) можно видеть, что на разных долготах (разрез вдоль оси Y) в зоне депрессии яркостная температура существенно различается, и это может объяснить данные наших спектральных наблюдений.

Работа выполнена в рамках проекта №0073/ГФ4

ЛИТЕРАТУРА

- [1] De Pater I. et al. Peering through Jupiter's clouds with radio spectral imaging. . *Science*, 2016, Vol. 352, Issue 6290, p.1290-1294
- [2] Edgington S. G., Atreya S. K., Trafton L. M., Caldwell J. J., Beebe R. F., Simon A. A. and West R. A. Ammonia and Eddy Mixing Variations in the Upper Troposphere of Jupiter from HST Faint Object Spectrograph Observations. *Icarus* 142, 342–356 (1999)
- [3] Wagener, R., J. Caldwell, and T. Owen 1986. Constraints on the NH_3 and PH_3 distributions in the Great Red Spot. *Icarus* 66, 188–191.
- [4] Lara, L.- M., Brezard, B., Griffith C. A., Lacy J. H., and Owen T. 1998. High resolution 10-micron spectroscopy of ammonia and phosphine lines on Jupiter. *Icarus* 131, 317–333.
- [5] Griffith, C. A., Brezard B., Owen T., and Gautier D. 1992. The tropospheric abundances of NH_3 and PH_3 in Jupiter's Great Red Spot from Voyager IRIS observations. *Icarus* 98, 82–93.
- [6] Вдовиченко В.Д., Кириенко Г.А., Лысенко П.Г. Вариации поглощения аммиака и метана вдоль экватора и центрального меридиана Юпитера в 2016 году. Сравнительный анализ для 8 полос поглощения. //Известия НАН РК. Серия физико-математическая. - 2017. - №5. – Настоящий сборник
- [7] Вдовиченко В.Д., Кириенко Г.А., Лысенко П.Г. Исследование молекулярного поглощения по диску Юпитера в сезон видимости 2016 года. I. Экваториальная область. //Известия НАН РК. Серия физико-математическая. - 2016. - №5. - С. 104-110
- [8] Вдовиченко В.Д., Кириенко Г.А., Лысенко П.Г. Исследование молекулярного поглощения на Юпитере в сезон видимости 2016 года. II. Широтные вариации //Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2016. - № 5 – С. 110-118
- [9] Вдовиченко В.Д., Кириенко Г.А., Лысенко П.Г. Исследование молекулярного поглощения по диску Юпитера в сезон видимости 2016 года III. Большое Красное Пятно (БКП) // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. - 2016. - №5. - С. 118-124
- [10] Tejfel V.G., Karimov A.M., Vdovichenko V.D. Strange Latitudinal Variations of the Ammonia Absorption on Jupiter // The Conference Division of Planetary Sciences American Astronomical Society (2015, Pasadena, USA)

REFERENCES

- [1] De Pater I. et al. Peering through Jupiter's clouds with radio spectral imaging. . *Science*, **2016**, Vol. 352, Issue 6290, p.1290-1294 (in Eng)
- [2] S. G. Edgington, S. K. Atreya, L. M. Trafton, J. J. Caldwell, R. F. Beebe, A. A. Simon and R. A. West 1999. Ammonia and Eddy Mixing Variations in the Upper Troposphere of Jupiter from HST Faint Object Spectrograph Observations. *Icarus* **142**, p. 342–356. (in Eng)
- [3] Wagener, R., J. Caldwell, and T. Owen 1986. Constraints on the NH_3 and PH_3 distributions in the Great Red Spot. *Icarus*, **66**, p. 188–191. (in Eng)
- [4] Lara, L.-M., B. Brezard, C. A. Griffith, J. H. Lacy, and T. Owen 1998. High resolution 10-micron spectroscopy of ammonia and phosphine lines on Jupiter. *Icarus*, **131**, p. 317–333. (in Eng)
- [5] Griffith, C. A., B. Brezard, T. Owen, and D. Gautier 1992. The tropospheric abundances of NH_3 and PH_3 in Jupiter's Great Red Spot from Voyager IRIS observations. *Icarus* 98, p. 82–93. (in Eng)
- [6] Vdovichenko V.D., Kirienko G.A., Lysenko P.G. The variations of ammonia and methane absorption along the jovian equator and central meridian in 2016. Comparative analysis of the eight absorption bands. *News of National Academy of Sciences of Kazakhstan. A physical and mathematical series.* - **2017**. - №5. - p. ____ (in Russ)
- [7] Vdovichenko V.D., Kirienko G.A., Lysenko P.G. Investigation of the molecular absorption on Jupiterian disk in the visibility season of 2016. I. Equatorial region. *News of National Academy of Sciences of Kazakhstan. A physical and mathematical series*, **2016**, №5, p. 104-110. (in Russ)

[8] Vdovichenko V.D., Kirienko G.A., Lysenko P.G. Investigation of the molecular absorption on Jupiterian disk in the visibility season of 2016. II. Latitudinal variations *News of National Academy of Sciences of Kazakhstan. A physical and mathematical series*, **2016**, № 5, p. 110-118 (in Russ)

[9] Vdovichenko V.D., Kirienko G.A., Lysenko P.G. Investigation of the molecular absorption on Jupiterian disk in the visibility season of 2016. III. The Great Red Spot (GRS). *News of National Academy of Sciences of Kazakhstan. A physical and mathematical series*. – **2016**, №5. p. 118-124 (in Russ)

[10] Tejfel V.G., Karimov A.M., Vdovichenko V.D. Strange Latitudinal Variations of the Ammonia Absorption on Jupiter. *The Conference Division of Planetary Sciences American Astronomical Society* **2015**, Pasadena, USA (in Eng)

В.Д. Вдовиченко, Г.А. Кириенко

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы қ., Қазақстан

2004-2016 ЖЫЛДАРЫ ЮПИТЕРДІҢ СОЛТҮСТІК ЖӘНЕ ОҢТҮСТІК ЖАРТЫШАРЛАРЫНДА АММИАКТЫҢ ЖҰТУ ЖОЛЫНДА АСИММЕТРИЯНЫ ЗЕРТТЕУ

Аннотация. 2004-2016 жылдары алынған және «Юпитер дискісі бойынша жұтудың түсті картасы» бағдарламасы көмегімен өңделген бақылау материалдары негізінде Юпитер атмосферасында NH_3 2645 және 789 нм жолақтарында аммиакты жұтудың ендік-бойлықтық және уақыттық вариациялары жете қарастырылды. Нәтижелер бұл екі жолақтың бақыланған вариацияларындағы айтарлықтай айырмашылықтарды көрсетеді, бұл химиялық құрамымен де, бұлт құрылымдарының тығыздығы және вертикаль созылыңқылығы сияқты ерекшеленетін олардың атмосфераның әртүрлі деңгейінде қалыптасуының салдарынан болуы мүмкін. Алайда, зерттелген жолақтардың екеуі де оңтүстікпен салыстырғанда солтүстік жартышарда аммиактың жетіспеушілігін сенімді көрсетеді, әсіресе жарық Экваторлық Аймақ және қараңғы Солтүстік Экваторлық Белдік арасындағы өтетін аймақта. Көрсетілген жолақтар арнайы осы мақсат үшін Дельфи тілінде жазылған «Юпитер морфологиясы» бағдарламасы көмегімен Юпитердің морфологиялық құрылымдарында аммиакты жұтудың вариацияларын зерттеу үшін пайдаланылды. Алынған нәтижелер радиодиапазонда (8-12 GHz) алынған нәтижелермен жақсы келісіледі (соның ішінде, ҰҚД ауданы үшін) [1].

Түйін сөздер: Юпитер, аммиак, жұту жолақтары.