

УДК 523.45—852:—335

К вопросу изучения динамики атмосферы Юпитера по наземным изображениям с высоким угловым разрешением

В. Г. Черный

Анализируются изменения видимых деталей ряда наземных изображений Юпитера за 1982—1983 гг., подвергнутых когерентно-оптической фильтрации. Показана высокая эффективность использования фильтрованных изображений для изучения динамики облачных образований Юпитера промежуточного масштаба (2000—6000 км). Приведены результаты измерений скоростей зональных потоков за 1983 г. на некоторых избранных широтах Юпитера по смещениям минимально разрешаемых (порядка 2000 км) компактных деталей. Сделано сравнение полученных данных с данными КА «Вояджер-1,2» за 1979 г.

ON THE STUDY OF JOVIAN ATMOSPHERE DYNAMICS BY GROUND-BASED IMAGES WITH HIGH ANGULAR RESOLUTION, by Chernyj V. G.—Changes of visible details on several ground-based images of Jupiter obtained in 1982—1983 and processed with the coherent optics technique are analysed. The results of the analysis show the high efficiency of image filtration for the study of dynamics of Jupiter cloudy formations of moderate sizes (2000—6000 km). The results of measurements of zonal flows velocities in 1983 are given. The comparison with the Voyager 1, 2 data for 1979 is made.

В настоящее время изучение динамики образований в атмосферах планет возможно наземными и космическими средствами. Однако космические наблюдения еще весьма непродолжительны, а наземные — малоинформативны из-за искажающего влияния земной атмосферы. Современные наземные исследования планет должны быть наиболее эффективны в случае применения новых методов обработки исходных данных, получаемых в местах с наилучшим астроклиматом. Например, применение различных методов фильтрации зарегистрированных изображений значительно повышает информационную емкость исходного материала [3, 4]. Опуская описание техники и методики линейной фильтрации астрономических изображений с помощью когерентно-оптического вычислителя АО ХГУ, достаточно полно отраженных в работах [1, 2, 5, 6], рассмотрим вопрос об информации, которую можно получить из последовательности фильтрованных изображений Юпитера.

В основе нашего изучения — ряды наблюдений планеты на 60-см и 1-м телескопах Цейса (гора Майданак) в 1981—1983 гг. [7]. Последовательность фильтрованных изображений позволяет эффективно проследить структурные изменения облачного слоя Юпитера в этот период, а также выявить изменения по сравнению с периодом полетов КА «Вояджер-1,2» в 1979 г. [11]. Например, ряд изображений за 1982—1983 гг. [7] (рис. 1, 2) иллюстрирует квазистабильность нескольких светлых пятен (вихрей) размерами примерно 2—3'' в полосе SEB. Некоторые вихри, наблюдавшиеся в этих широтах в 1982 г., диссипировали на более мелкие вихри к июню 1983 г. Отмеченные динамические процессы в полосе SEB не противоречат моделируемому на ЭВМ условиям существования на Юпитере циклонических вихрей промежуточного масштаба [12, 14]. Время диссипации некоторых вихрей, которые наблюдались нами в широтах 15—17° S (не менее 300—400 дней), довольно хорошо согласуется с приводимой в работе [14] временной шкалой диссипации (около 320 дней) циклонического вихря, находившегося в циклоническом потоке. Причем наблюдаемый процесс диссипации выглядит (в согласии с моделированием [14]) как процесс отрыва мелких (около 0.8—1.0'') вихрей от существующих, с некоторым увеличением размеров последних (рис. 2—5).

По-видимому, причиной возникновения, а также последующей диссипации вихрей в широтах $15 - 17^\circ \text{S}$ является изменение в облачном слое баланса энергии, приходящей как извне, так и от внутренних источников [7, 12]. Согласно [8], основной вид перераспределения энергии в облачном слое Юпитера — превращение вихревой кинетической энер-

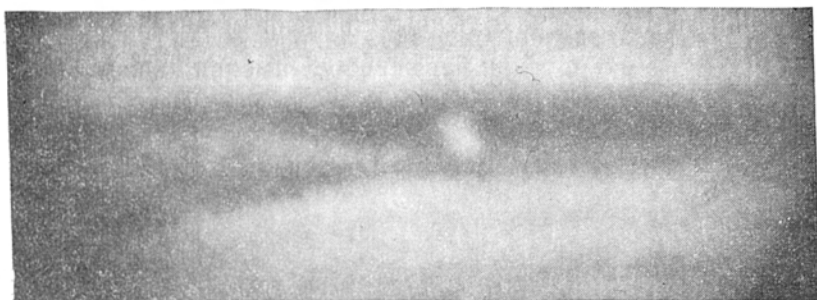


Рис. 1. Фрагмент фильтрованного изображения Юпитера за 22.03.1982 г. ($UT=22^h12^m$, $\lambda_{\text{эф}}=0.430$ мкм, полоса $\Delta\lambda=0.100$ мкм). Приводимое изображение представляет собой суперпозицию серии исходных изображений, подвергнутых линейной фильтрации в соответствии с методикой [5]

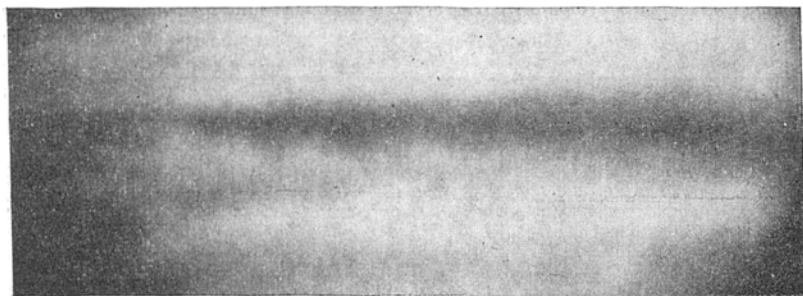


Рис. 2. Фрагмент изображения Юпитера за 02.04.1983 г. ($UT=23^h17^m$, $\lambda_{\text{эф}}=0.444$ мкм, $\Delta\lambda=0.064$ мкм), полученного и обработанного по методике [5]

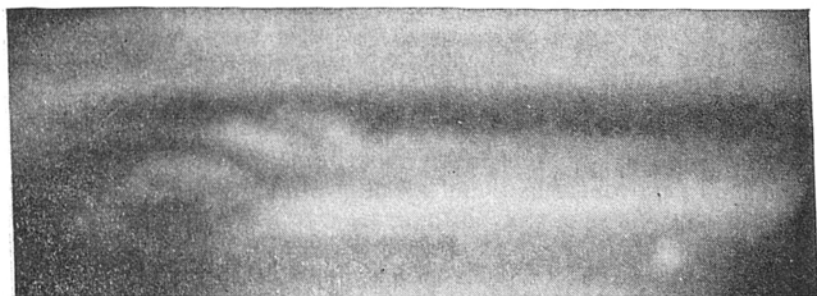


Рис. 3. Апостериорно обработанное изображение той же области диска Юпитера, что и на рис. 2, по серии снимков, полученных спустя 169^h (через 17 оборотов планеты) 09.04.1983 г. ($UT=23^h45^m$, $\lambda_{\text{эф}}=0.470$ мкм, $\Delta\lambda=0.044$ мкм)

гии в кинетическую энергию зональных струй. Наши наблюдения диссипации вихрей в полосе SEB показывают: если такой процесс происходит, то время превращения вихревой энергии значительно больше приведенного в [9] (около 75 дней) и составляет 300—400 дней. Кроме того, в перераспределении энергии участвуют облачные структуры различных масштабов и, вероятно, этим можно объяснить появление упорядоченной зонно-поясной картины на изображениях 1982—1983 гг. на

высоких широтах (более 60°), которая не наблюдалась в феврале — июле 1979 г. во время полетов «Вояджер-1, 2» [11].

Профили зональной скорости ветров на Юпитере, по данным КА «Вояджер-1, 2» [10], показывают дисперсию значений скорости на некоторых широтах, обусловленную ошибками измерений и изменениями глобальной циркуляции со временем [13]. С помощью фильтрованных изображений за 1983 г., разделенных временным интервалом в 7, 12 и

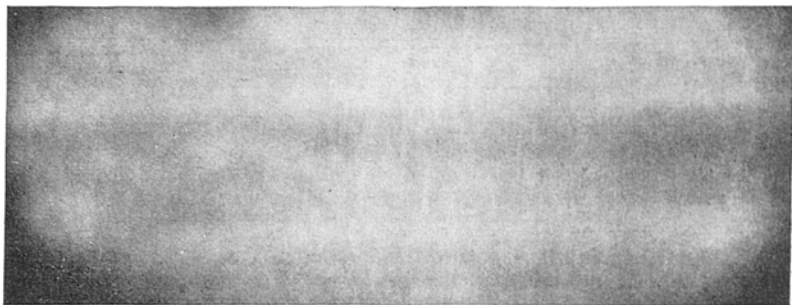


Рис. 4. Фрагмент фильтрованного изображения за 21.05.1983 г. (UT = 18^h48^m). Исходные изображения получены на 60-см телескопе Цейса через красный светофильтр ($\lambda_{\text{эф}} = 0.676$ мкм, $\Delta\lambda = 0.033$ мкм)

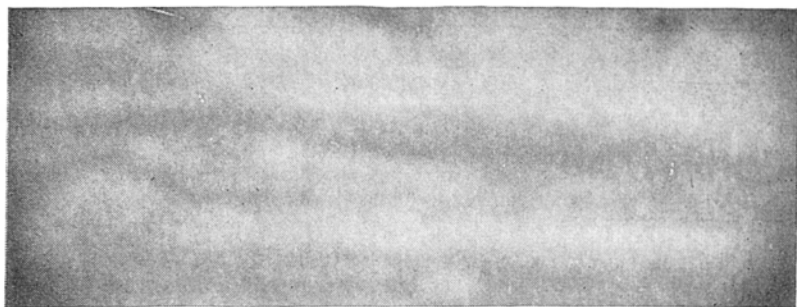


Рис. 5. Та же часть изображения Юпитера, что и на рис. 4, через 288^h (29 оборотов планеты). Исходные изображения получены 02.06.1983 г. (UT = 18^h27^m) на 1-м телескопе Цейса через красный светофильтр ($\lambda_{\text{эф}} = 0.676$ мкм, $\Delta\lambda = 0.033$ мкм) и обработаны на когерентно-оптическом вычислителе АО ХГУ [1, 2, 5]

17 оборотов Юпитера вокруг оси, проведены измерения векторов скорости ветра на некоторых избранных широтах. Выбор конкретных широт определялся наличием в них компактных легко идентифицируемых деталей размерами около 2000 км (т. е. минимальными структурами, уверенно разрешаемыми на обработанных снимках). Поскольку такие детали промежуточного масштаба могут иметь собственную скорость дрейфа, отличающуюся от широтной зональной скорости, и число их в избранном широтном коридоре (3°) невелико, то наши измерения должны иметь несколько большую неопределенность в значении скорости по сравнению с измерениями смещений 300-километровых деталей, по данным КА «Вояджер-1, 2» [10]. Чтобы исключить ошибки, возникающие при проекции сфероида планеты на картинную плоскость, мы проводили измерения только в интервале долгот $\pm 30^\circ$ от центрального меридиана Юпитера. Вычисление ошибок измеряемых скоростей проводилось по методике, аналогичной использованной в [9]. Суммарная погрешность σ_V представляет собой ошибку, вносимую при идентификации деталей в каждом широтном интервале (зависящую от числа деталей), а также ошибку масштаба (одинаковую для всех широт).

Скорости смещений избранных деталей (сжатие меридиана не учитывалось) определялись по формуле

$$V(\varphi) = 2\pi R [T^{-1}(\varphi) - T_0^{-1}] \cos \varphi, \quad (1)$$

где R — экваториальный радиус Юпитера; $T(\varphi)$ — период вращения на широте φ ; T_0 — период вращения III системы координат Юпитера. Период вращения $T(\varphi)$ избранных деталей определяется за временной интервал ΔT между парами изображений по формуле

$$T(\varphi) = \Delta T (N \pm b/2\pi)^{-1}, \quad (2)$$

где N — число оборотов III системы Юпитера; b — выраженное в долях радиуса видимого диска смещение детали в направлении с востока на запад; знак «+» соответствует смещению детали в восточном направлении.

Измерения скоростей зональных потоков в избранных широтах Юпитера

1979 г. [10]			1983 г.		
Широта φ	Скорость V , м/с	Погрешность σ_V , м/с	Широта φ	Скорость V , м/с	Погрешность σ_V , м/с
8.5°	83.6	2.1	8.3°	104.5	3.5
7.6	102.2	1.6			
2.6	105.5	3.3	1.7	107.0	4.8
1.5	99.9	3.0			
−10.4	37.1	1.2	−11.3	28.0	2.8
−11.4	28.4	1.8			
−14.5	−24.2	3.2			
−15.4	−48.8	1.7	−15.5	−9.5	3.2
−16.4	−56.9	1.5			

Примечание. Положительные широты — северные, положительные скорости — восточные.

Результаты измерений скоростей ветра на некоторых избранных широтах Юпитера с указанием неопределенности значений этой величины представлены в таблице. Здесь помещены также данные КА «Вояджер-1, 2» за 1979 г. из работы [10] со средними квадратичными ошибками измерений скоростей в широтном интервале 1°. Как видно из таблицы, существуют вариации зонального потока на широте примерно 15° S в период с 1979 по 1983 г., которые объясняются динамическими процессами, происходившими в полосе SEB.

Наблюдения Юпитера 1983 г. с высоким угловым разрешением позволяют проследить кратковременные изменения небольших атмосферных образований, время жизни которых значительно меньше времени существования квазистабильных вихрей в полосе SEB. Для изучения динамики таких деталей наиболее эффективна линейная фильтрация наземных изображений Юпитера, так как на исходных наземных изображениях малые слабоконтрастные детали не наблюдаются [5, 6]. Примерами могут быть наблюдения диссипации в течение 17 дней узкой (не более 1.0'') дугообразной детали в высоких северных широтах (примерно 60—70° N) [7], а также изменения, происходившие с вихрями в полосе SEB при их сближении с Большим Красным Пятном (БКП). Взаимодействуя с БКП, вихри в полосе SEB образуют вначале вытянутые, (рис. 2—5), а затем (по мере увеличения расстояния от БКП) все более компактные новые яркие детали (вихри) диаметром около 1.0''. На приводимых изображениях широтного коридора между 8° N и 38° S север находится вверх, БКП — слева (на западном краю диска). Ха-

ракетное время заметных изменений этих небольших деталей по фильтрованным изображениям составляет 5—7 дней, что вполне согласуется с отмеченными по данным «Вояджер-1» пятидневными изменениями динамики мелких облачных деталей между крупномасштабными вихрями [9].

Малые (менее 2000 км) образования облачного слоя Юпитера, время заметной эволюции которых меньше пяти дней, пока нельзя наблюдать с поверхности Земли. В случае применения к высококачественным наземным изображениям эффективной методики обработки и соответствующих вычислительных средств возможно изучение таких малых быстро изменяющихся облачных структур этой планеты. Что касается облачных образований Юпитера промежуточного масштаба, то информация, полученная из фильтрованных изображений, сопоставима с космическими наблюдениями и в настоящее время эффективно дополняет картину пространственно-временных изменений на Юпитере между полетами космических аппаратов.

1. Дудинов В. Н., Цветкова В. С., Кришталь В. А. Применение когерентно-оптических методов для обработки астрономических изображений.— Л.: Наука, 1979.— С. 60—71.— (Новая техника в астрономии.— Вып. 6).
2. Кришталь В. А., Кузьменков С. Г., Черный В. Г. Эксперименты по когерентно-оптической обработке астрономических изображений // Астрометрия и астрофизика.— 1979.— Вып. 37.— С. 80—84.
3. Оптическая обработка информации. Применения / Под ред. Д. Кейсесента.— М.: Мир, 1980.—350 с.
4. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Э. Оппенгейма.— М.: Мир, 1980.—380 с.
5. Цветкова В. С., Черный В. Г. О возможностях апостериорной обработки астрономических изображений // Письма в Астрон. журн.— 1984.—10, № 6.— С. 469—473.
6. Цветкова В. С., Черный В. Г. Фотометрия астрономических изображений, подвергнутых линейной фильтрации // Вестн. Харьк. ун-та. Методы астрономических наблюдений. Солнечная система.— 1985.— № 278.— С. 38—43.
7. Черный В. Г. Наземные исследования Юпитера в период 1978—1983 гг.: отражательная способность и вид планеты в видимом диапазоне // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.—1, № 4.— С. 39—46.
8. Beebe R. F., Ingersoll A. P., Hunt G. F. et al. Measurements of wind vectors, eddy momentum transports and energy conversions in Jupiter's atmosphere from Voyager 1 images // J. Geophys. Res. Lett.— 1980.—7, N 1.— P. 1—4.
9. Ingersoll A. P., Beebe R. F., Mitchell J. L. et al. Interaction of eddies and mean zonal flow on Jupiter as inferred from Voyager 1 and 2 images // J. Geophys. Res.— 1981.—86, N A10.— P. 8733—8743.
10. Limaye S. S., Revercomb H. E., Sromovsky L. A. et al. Jovian winds from Voyager 2. Part 1: Zonal mean circulation // J. Atmos. Sci.— 1982.—39, N 7.— P. 1413—1432.
11. Mitchell J. L., Terrile R. J., Smith B. A. et al. Jovian cloud structure and velocity fields // Nature.— 1979.—280, N 5725.— P. 776—778.
12. Read P. L., Hide R. Long lived eddies in the laboratory and in the atmospheres // Ibid.— 1983.—302, N 5904.— P. 126—129.
13. Sromovsky L. A., Revercomb H. E., Suomi V. E. Jovian winds from Voyager 2. Part II: Analysis of eddy transport // J. Atmos. Sci.— 1982.—39, N 7.— P. 1433—1445.
14. Williams G., Yamagata T. Geostrophic regimes, intermediate solitary vortices and Jovian eddies // Ibid.— 1984.—41, N 4.— P. 453—478.