

УДК 523.45.6;532.529.9;551.513

ПРОСТЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ПОВОДУ ПРИПОЛЯРНЫХ ЦИКЛОНОВ ЮПИТЕРА

© 2021 г. Г. С. Голицын*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжневский пер., 3, Москва, 119017 Россия

**e-mail: gsg@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 05.08.2021 г.

Принята к публикации 11.08.2021 г.

5 июля 2016 г. станция НАСА Юнона начала облет Юпитера по меридиональной орбите, обнаружив вблизи полюсов по широте $\pm 82^\circ$ вблизи Северного полюса 8 циклонов и 5 несколько больших циклонов вблизи Южного. В обеих этих публикациях сказано, что происхождение этих циклонов неизвестно. Однако в конце 1960-х гг. было найдено, что у четырех больших планет есть внутренний источник тепла, хотя у Урана он относительно слабее, чем у остальных, где этот источник сравним с потоком тепла от Солнца на их расстояниях. Теория конвекции вращающихся жидкостей позволяет с привлечением дополнительных аргументов получить оценки диаметров и скоростей в циклонах, сравнимые с наблюдаемыми.

Ключевые слова: Юпитер, полярные циклоны, конвекция при вращении

DOI: 10.31857/S0002351521060055

5 июля 2016 г. космическая станция НАСА Юнона начала облет Юпитера по вытянутой меридиональной орбите с периодом 53 сут [1, 2]. Главный результат – это обнаружение 8 циклонов вблизи Северного полюса, СП, и 5 циклонов вблизи Южного, ЮП, с дополнительными циклонами на обоих полюсах, 8 и 5 циклонов на 82° – 83° широте образуют правильные восьмиугольники у СП и пятиугольники у ЮП. Тщательный анализ выявил более мелкие антициклоны, окаймляющие оба полярных циклона. В первой же публикации было сообщено, что тангенциальные скорости u южных 8 циклонов находятся в пределах 60–80 м/с со средним значением 71 ± 8 м/с, диаметры в пределах 4000–4600 км, а у северных циклонов 76 ± 13 м/с с диаметрами 5700–7000 км. Более поздние снимки выявили богатство разнообразной активности в пределах $\pm 80^\circ$ – 90° , но основные картины в 5 и 8 за 2 года наблюдений практически не изменили свои положения и конфигурацию. Причины появления таких паттернов авторам статей неизвестны, кроме расположения циклонов вблизи полюсов, объяснение чего дается изменением параметра Кориолиса с широтой, т.е. так называемым β -эффектом. Образцы этих циклонов даны на рис. 1, где они выявляют оптическую толщину для выходящего излучения в районе 5 мкм.

Вниманию автора эти статьи [1, 2] были представлены лишь в конце апреля с. г. и здесь даны

самые простые идеи, объясняющие эту ситуацию в рамках законов теории вероятности А. Н. Колмогорова и его школы [3–5], а также соображений подобия размерности, их подкрепляющих [6]. Автор в 1970–80 гг. довольно плотно занимался планетными атмосферами, был в тесном контакте с целым рядом ведущих ученых НАСА по планетным исследованиям и около 20 лет был в редколлегии журнала Икарус. За прошедшие 40–50 лет из моих знакомых того периода остался лишь первый автор появившейся у меня на днях статьи [7]. Из ярких впечатлений тех лет я вспоминаю, что у Юпитера, Сатурна и Нептуна тогда были обнаружены внутренние источники тепла, поскольку рассчитанные данные по их альбедо и расстояниям от Солнца давали эффективные температуры T_e заметно меньше, чем наблюдавшиеся $T_0 = 130$ – 134 К. Действительно, [8] только от Солнечного тепла

$$T_e = \frac{279}{R_{cr}^{1/2}} (1 - A)^{1/4},$$

где R_{cr} – расстояние от Солнца в астрономических единицах, 1 а. е. = 1.5×10^8 км. Для Юпитера $R_{cr} = 5.2$, $A = 0.42$, что дает $T_e = 107$ К. Уточнения за последующие полвека вряд ли заметно изменят эту цифру. Тогда наблюдаемые значения T_0 были 130–134 К, что по закону Стефана–Больцмана дает интенсивность внутреннего источника одно-

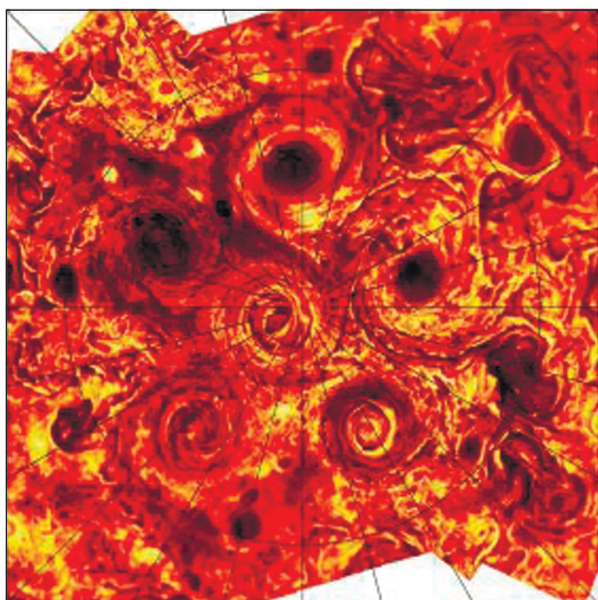
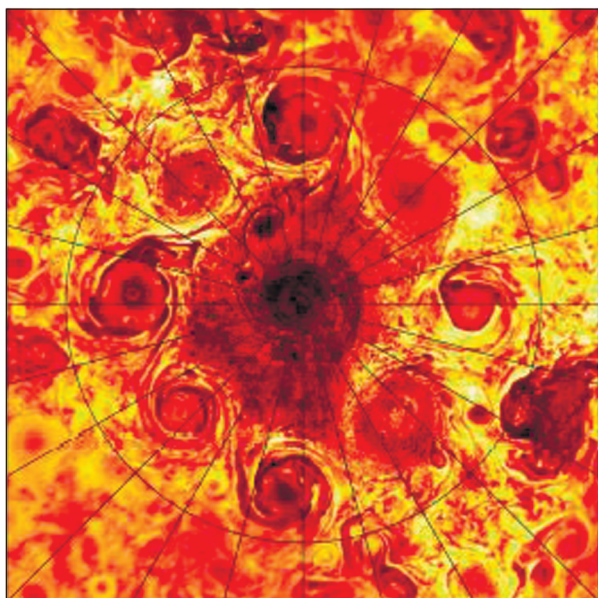


Рис. 1. Крупномасштабные вихри вблизи обоих полюсов Юпитера.

го порядка с приходом солнечной энергии. Благодаря малому наклону оси собственного вращения планеты, $3^\circ 7'$, роль Солнца в создании температурной стратификации полярных широт мала, и это еще один фактор для видимого появления циклонов в высоких широтах. Облачная структура в них выявляется конденсацией в атмосфере паров воды, аммиака и других примесных газов.

Автор в 1980–2000 гг. вел программу по исследованию конвекции во вращающейся жидкости, подробно изложенной в книге [9], а затем под нее в 2018 г. было введено вероятностное обоснование [5]. Теория [3] основана на использовании уравнения Фоккера–Планка для плотности веро-

ятности 6-мерного вектора x_i, u_i и ее эволюции во времени в виде

$$\frac{\partial p(x_i, u_i, t)}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 p}{\partial u_i^2}, \quad (1)$$

т.е. используется субстациональная, а не частная, производная по времени. Это уравнение имеет фундаментальное решение в виде [10, 11]. Это уравнение рассматривает ансамбль частиц, на которые действуют марковские, т.е. δ -коррелированные силы по законам Ньютона, и оно выдает решение в виде [11]:

$$p(x_i, u_i, t) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2\pi Dt} \right)^3 \exp \left[- \left(\frac{u_i^2}{Dt} - \frac{3u_i x_i}{Dt^2} + \frac{3x_i^2}{Dt^3} \right) \right]. \quad (2)$$

А.М. Обухов первым проанализировал это уравнение [12]. Он показал, что коэффициент диффузии $D = \varepsilon/2$, т.е. половина скорости диссипации (генерации, в статистических стационарных условиях) кинетической энергии турбулентности. Формула (2) показывает, что искомое распределение вероятностей нормально. Это решение имеет три масштаба (угловые скобки означают среднее для распределения по ансамблю):

$$\langle u_i^2 \rangle = \varepsilon t, \quad (3)$$

$$\langle u_i x_i \rangle = \varepsilon t^2 \equiv K, \quad (4)$$

$$\langle x_i^2 \rangle = \varepsilon t^3 \equiv r^2, \quad (5)$$

где масштаб (4) по размерности равен коэффициенту вихревого (турбулентного) перемешивания.

Выражая время из (5) $\tau_0 = (r^2/\varepsilon)^{1/3}$ и подставляя его в (3) и (4), получим закон Колмогорова–Обухова для структурной функции скорости и закон Ричардсона–Обухова для коэффициента турбулентного перемешивания (вихревой диффузии) (см. [12]). Масштабы (3) и (5) проявляются и в том, что замены переменных $u_i = \tilde{u}_i (Dt)^{1/2}$ и $x_i = \tilde{x}_i (Dt^3)^{1/2}$, где тильда – символ безразмерности, исключает из уравнения (1) коэффициент диффузии D , превращая его в безразмерное, т.е. описание становится полностью автомодельным [4]. Численные расчеты этой работы показывают выполнение масштабов (3) и (5) даже при небольших размерах ансамбля $N = 10$, особенно (5), поскольку повторное интегрирование скоростей и осреднение результатов этому способствует. Если число интегрируемых частиц равно 100, то эти моменты распределений (2) уже практически не отличаются от моментов для бесконечных ансамблей (3) и (5).

В статье [1] дана таблица тангенциальных скоростей в их максимуме примерно на 1500 км от центра вихря для всех $15 = 9 + 6$ циклонов, в том

числе и полярных. Для северного полушария средняя скорость по 9 объектам равна 86 ± 11 м/с, а для южного — 76 ± 8 м/с, диаметры первой группы в пределах от 4000 до 4600 км, а во второй — от 5600 до 7000 км без конкретизации к индивидуальным циклонам. Поэтому мы можем оперировать лишь средними величинами. Общий разброс у формальной комбинации со скоростями и диаметром типа (3) и (5) будет порядка 20%. Скорости формально брались на расстояниях 1500 км от центра, что при разбросе значений диаметров порядка 15–20% может дать дополнительный разброс. Желательно знать радиальную функцию скорости, что пока дает [7] лишь для отдельного циклона.

Для оценки разброса реальных данных и выполнения в них соотношений (3) и (5) оценим для картин обоих полюсов комбинацию $a^2 = x_i^2$

$$\left(\frac{\langle u^2 \rangle t^{-1}}{\langle d^2 \rangle t^{-3}} \right)^{1/2} = \beta, \quad (6)$$

где за время t возьмем период собственного вращения 35424 с, величину обратную параметру Кориолиса, который в приполярных областях равен 2ω . Подставляя в (6) средние скорости и диаметры, для СП получим $\beta = 0.71$, а для ЮП — $\beta = 0.43$. Это является, по всей видимости, отражениями внутренней асимметрии обоих полушарий планеты, ярким проявлением которого служит Большое красное пятно, БКП, находящееся в южном полушарии примерно на 20° ю.ш. Открытое в 1665 г. Хуком, оно перемещается по широте, меняя свои размеры. Это явно конвективное образование, не связанное с твердой поверхностью, которая в настоящее время оценивается на глубинах порядка 20% радиуса планеты и состоит из металлизированного водорода. Происхождение и природа БКП по-прежнему нуждаются в разработке.

Оценим полную мощность внутреннего источника тепла на Юпитере и на его основе плотность потока плавучести. Первую величину оценим как разность потоков тепловой лучистой энергии при температурах $= 130$ и 107 К, используя закон Стефана–Больцмана $q_i = \sigma(T_0^4 - T_e^4)$. Это дает $q_i \approx 9$ Вт/м². Плотность потока плавучести равна

$$b = \frac{k\alpha g q_i}{\rho c_p}, \quad (7)$$

где $\alpha = 1/T$ — коэффициент температурной сжимаемости идеального газа по закону Шарля, $g = 25$ м/с² — ускорение силы тяжести, ρ — плотность газа на уровне измерений (примерно на порядок меньшая плотности воздуха), $c_p \approx 1.5 \times 10^{-4}$ Дж/К —

теплоемкость газа, k — коэффициент превращения лучистого потока тепла в турбулентный (в земной атмосфере $k = O(10^{-2})$). Собирая все величины, получим для Юпитера $b \approx 0.1$ м²/с³. Несмотря на грубость и приблизительность таких оценок, они сходятся с таковыми по порядку величины со значениями β , если брать за время t период вращения планеты.

Несколько важных моментов следует уточнить. Во-первых, формулы (3) и (5) получены А.Н. Колмогоровым для однородных по плотности сред. В атмосфере Юпитера в поле силы тяжести плотность убывает экспоненциально с глубиной, во-вторых, то, что мы видим, — это облака примесных газов. Поэтому проблему следовало бы исследовать численно с учетом этих и других факторов. Но в целом без всякого сомнения природа циклонов конвективна, и это конвекция во вращающейся жидкости, как и природа земных ураганов, спиральных пятен на морской поверхности и др. [11]. В [7] исследовано поле завихренности скорости и ее дивергенции, что указывает, без сомнения, на конвективную структуру внутри циклонов. Наши грубые оценки четко указывают на конвекцию во вращающейся жидкости.

С другой стороны, оценку потока плавучести можно получить из инвариантов А.Н. Колмогорова (3) и (5) $b = u^2/t$ и $b = d^2/t^3$, где за время t условно примем период собственного вращения Юпитера $t = 0.41t_{\oplus} = 35424$ с. На самом деле, если исходить из теории подобия, то тут могут стоять множители $O(1)$. При средней для планеты скорости в циклонах $u = 80$ м/с получаем из (3) $b = 0.18$ м²/с³, а из (5) при среднем диаметре циклонов $d = 6300$ км получим $b = 0.89$ м²/с³. Хотя два значения b различаются в 5 раз, но помня численные множители $O(1)$ и совпадение порядков величин в значениях плотности потока плавучести и то, что вывод формул для масштабов скоростей производился в 1934 г. для однородных сред, совпадение порядков величин для b можно признать удовлетворительным для объектов вблизи Северного полюса, у которого 9 циклонов с учетом полярного. Безразмерное выражение (6) дает значение параметра $\beta_1 = 0.71$. Аналогичный расчет для более крупных 5 циклонов вокруг Южного полюса + циклон на самом полюсе дает $\beta_2 = 0.43$. Обе группы объектов расположены внутри широт $\theta = |\pm 82^\circ|$, т. е. занимают одинаковые площади вокруг полюсов. Считая значения γ_1 и γ_2 как-то относящиеся к проценту заполнения этих пространств и что внутренние потоки плавучести мало отличаются друг от друга в разных полушариях, находим отношения на циклон $\beta_1/9 : \beta_2/6 = 1.007 = 1.0$. Можно считать, что общие завихренности вблизи обоих полюсов на площадях $\theta > |\pm 82^\circ|$ одинаковы, как и потоки плавучести.

Вероятно, циклоны вблизи ЮП возникают с более мелких глубин, чем у СП, поэтому их размеры и скорости поменьше, чем вблизи противоположного полюса.

Автора спрашивают о природе Большого красного пятна, которое несколько раз обходило свою широту и меняло свои размеры, т.е. это свободный вихрь. Он мог бы возникнуть при падении на планету заметного астероида.

О происхождении самих приполярных циклонов можно высказать догадку, основанную на прослушивании в 2009 г. (последнее мое пребывание в США) докладов по численному моделированию процессов во влажной атмосфере с вращением, подпитываемых только солнечной энергией. В такой атмосфере через 10–15 дней образовывались интенсивные вихри типа ураганов. В приполярных областях Юпитера приток от Солнца пренебрежим, гораздо больше приток внутренней энергии, приток тепла от конденсации паров в облаках за длительный промежуток в среднем по времени должен быть равен нулю, и эти циклоны кажутся имеющими достаточно крупные вертикальные размеры. Поэтому в силу только что сказанного следовало бы моделировать и их вертикальную структуру, чего пока нет. Допустимо лишь сказать, что образуются приполярные циклоны в разных полушариях на различных глубинах и, вероятней, в ЮП на больших глубинах, например, потому, что там БКП.

Хочется помянуть еще одно обстоятельство. В 1960-х гг. привлекло внимание приливное уравнение Лапласа [13, 14]. Для малых колебаний сжимаемой сферической атмосферы оно было модифицировано Хафом [16]. В [13] были проведены расчеты его собственных функций и собственных значений уравнения Хафа в зависимости от скорости вращения планеты. Конкретные расчеты в [13] проводились для атмосфер Земли и Юпитера. Для последней планеты было найдено, что собственные функции группируются в полосу вблизи экватора, а на широтах свыше примерно 30° они экспоненциально спадают к нулю. Собственным параметром для уравнения Хафа является безразмерное число $\gamma = 4\omega^2 r^2 / c^2$, где r – радиус планеты, c – адиабатическая скорость звука. Для Юпитера расчеты велись при $\gamma = 1200$. Такая структура собственных функций качественно объясняла отсутствие полосатой структуры на диске планеты для широт $\theta \geq |30^\circ|$. Для Земли $\gamma = O(1)$ собственные функции покрывают все широты, содержат волны Россби, и в работе [15] таким образом были проинтерпретированы возмущения, наблюдаемые в средних широтах с хорошим совпадением рассчитанных и реальных скоростей. Можно думать, что отсутствие волновых возмущений в высоких широтах Юпитера не мешает

возникновению там приполярных циклонов конвективного происхождения.

Таково качественное объяснение всей видимой структуры диска Юпитера.

В заключение выражаю глубокую благодарность О.Г. Чхетиани за обращение моего внимания к этой тематике, помощь в работе и обсуждение ее результатов, а также рецензенту, чьи замечания и вопросы существенно улучшили первоначальный текст.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani A. et al.* Clusters of cyclones encircling Jupiter's poles // *Nature*. 2018. 555. P. 216–219.
2. *Tabataba-Vakili F. et al.* Long-term tracking of circumpolar cyclones on Jupiter from polar observations with JunoCam // *Icarus*. 2020. V. 335. 113405.
3. *Kolmogorov A.N.* Zufällige Bewegungen // *Ann. Math.* 1934. V. 35. P. 116–117.
4. *Гледзер Е.Б., Голицын Г.С.* Скейлинг и конечные ансамбли частиц в движении с притоком энергии // *Докл. РАН*. 2010. Т. 433. № 4. С. 466–470.
5. *Голицын Г.С.* Законы случайных блужданий А.Н. Колмогорова 1934 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 3. С. 5–15.
6. *Голицын Г.С.* Полярные и тропические ураганы: их энергия, размеры и количественные критерии их генерации // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44. № 5. С. 579–591.
7. *Ingersoll A.P. et al.* Polygonal patterns of cyclones on Jupiter: convective forcing and anticyclonic shielding // *Proc. Nat. Ac. Sci.* 2021. In print.
8. *Golitsyn G.S.* A similarity approach for the general circulation of planetary atmospheres // *Icarus*. 1970. V. 13. № 1. P. 1–24.
9. *Boubnov B.M., Golitsyn G.S.* Convection in Rotating Fluids. Dordrecht: Cluwer Acad. Publ., 1995. 224 p.
10. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Т. 2. § 24. М.: Наука, 1967. 720 с.
11. *Голицын Г.С.* Вероятностные структуры макромира: землетрясения, ураганы, наводнения... М.: Физматлит. 2021. 176 с.
12. *Obukhov A.M.* Turbulence in lagrangian terms // *Adv. in Geophysics*. 1959. V. 7. P. 115–117.
13. *Голицын Г.С., Дикий Л.А.* Собственные колебания планетных атмосфер в зависимости от скорости вращения планеты // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1966. Т. 2. № 3. С. 225–233.
14. *Longuet-Higgins M.S.* The eigenfunctions of Laplace's tidal equation over a sphere // *Phil. Trans. Roy. Soc.* 1968. V. 262. № 1132. P. 511–607.
15. *Diky L.A., Golitsyn G.S.* Calculation of the Rossby wave velocities in the Earth's atmosphere // *Tellus*. 1968. V. 20. № 2. P. 314–317.
16. *Hough S.S.* On the application of harmonic analysis to the dynamical theory of the tides. Part II. On the general integration of Laplace's dynamical equation // *Phil. Trans. Roy. Soc.* 1898. V. 191. P. 139–185.

Simple Arguments for Origin of Near Poles Clusters of Cyclones at Jupiter

G. S. Golitsyn*

Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: gsg@ifaran.ru*

NASA Juno station started on July 5, 2016, meridional orbiting of the planet Jupiter has discovered near its poles at latitudes $\pm 82^\circ$ 8 cyclones near North Pole and 5 slightly larger cyclones close to the South Pole. It is said at both of these references that the origin of the cyclones is unknown. But in late 1960s the internal heat sources have been found at 4 giant planets input, though for Uranus it was considerably weaker, than at others where they were comparable to the solar energy at their distances. The theory of convection in rotating fluids allows one together with some other arguments to obtain estimates of diameters and velocities for the cyclones close to the observed ones.

Keywords: Jupiter, polar cyclones, convection at rotation