Исследование образования вихревых дорожек в атмосфере по спутниковым наблюдениям

А.В. Казанский¹, М.Г. Алексанина^{1,2}

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия ² Дальневосточный Федеральный университет, Владивосток, 690091, Россия E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru

Работа посвящена исследованию механизма формирования атмосферных вихревых дорожек (АВД) по наблюдениям с метеорологических спутников. Кратко описано современное состояние вопроса и сделан вывод об отсутствии понимания этого механизма в современной литературе. Предлагается точка зрения, в которой ведущая роль в процессе формирования АВД отводится центростремительному ускорению. Показано, что центростремительное ускорение, являющееся необходимым атрибутом любого вихря, возникает в пограничном слое при обтекании криволинейной поверхности выпуклого тела и поддерживается балансом с поперечным градиентом давления. На примере пары спутниковых изображений NOAA-15 и NOAA-18 за о. Чеджу в январе 2015 г., разделённых интервалом в 30 мин, проведён расчёт динамических параметров процесса формирования АВД (скорости набегающего потока, скорости сноса вихрей по течению, орбитальной скорости, времени и периодичности образования АВД). Удалось проследить начальный этап образования АВД и показать, что они формируются в результате отрыва сдвигового пограничного слоя, а ведущим механизмом выступает центростремительное ускорение, в работе точку зрения на механизм образования атмосферных вихревых дорожек.

Ключевые слова: атмосферные вихревые дорожки, механизм формирования, центростремительное ускорение, динамический анализ спутниковых изображений

> Одобрена к печати: 17.05.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-256-262

Введение

Атмосферные вихревые дорожки (АВД) часто наблюдаются с подветренной стороны вулканических островов по характерной структуре облачности. Они сродни вихрям Кармана, известным из гидродинамики и наблюдающимся в лабораторных экспериментах при обтекании жидкостью цилиндрического тела, занимающего всё вертикальное сечение сосуда. Разница лишь в том, что в нашем случае обтекается не цилиндр, а поверхность близкая конусу.

После более чем столетия интенсивных исследований «проблема обтекания выпуклого тела остаётся почти полностью эмпирической и описательной территорией знания» (Roshko, 1993). Многолетние интенсивные исследования феномена вихрей Кармана не привели к пониманию механизма их формирования. Имеющиеся теоретические построения основаны на формальном использовании системы точечных вихрей и касаются только некоторых закономерностей уже сформированных цепочек (Кочин и др., 1963). В действительности теоретические и лабораторные исследования в последние 20-30 лет ограничивались нижним участком спектра числа Рейнольдса (Re < 10^7), оставляя область более высоких значений (порядка $10^7 - 10^{10}$) фактически неисследованной. Спутниковые наблюдения АВД позволяют восполнить этот пробел в наших знаниях.

В то время как вихри Кармана наблюдались в лабораторных экспериментах более 100 лет, их атмосферные аналоги стали доступны только с появлением спутниковых изображений начиная с 60-х гг. прошлого века (Chopra, Hubert, 1965; Hubert, Krueger, 1962). Однако потенциал спутниковой информации используется явно недостаточно полно — даже в последнее время к этим изображениям обращаются лишь как к иллюстрациям с целью придания реалистичности результатам численного моделирования (Caldeira, Tomé, 2013; Ito, Niino, 2016;

Li et al., 2008; Nunalee, Basu, 2014). Только в одном известном нам случае (Young, Zawislak, 2006) были проведены расчёты некоторых геометрических характеристик ABД с использованием 30 одиночных изображений радиометра MODIS. Что касается расчётов динамических характеристик ABД (скорость набегающего потока, скорость сноса вихрей по течению, орбитальная скорость, время образования и периодичность), могущих пролить свет на механизм их формирования, непосредственно по спутниковым изображениям, то такие работы нам не-известны. Напротив, даже в одном из последних исследований (Nunalee, Basu, 2014) для скорости сноса вихрей используется предположение, сделанное в работе (Chopra, Hubert, 1965), что она составляет около 85 % от скорости набегающего потока.

Цель данной работы — предложить версию физического механизма формирования вихрей Кармана и провести расчёт динамических параметров этого процесса, используя пару разновременных спутниковых изображений.

Теоретические предпосылки

В литературе нет единого мнения о механизме формирования вихрей Кармана. В книге (Беляев, Черваков, 2009) приводится такое объяснение: «Поскольку с подветренной части препятствия скорость потока меньше, чем вблизи его боковых сторон, то давление в тыловой зоне будет больше, чем по бокам. Таким образом, вблизи стенки препятствия с подветренной стороны возникает барический градиент (т.е. продольный градиент давления), вынуждающий жидкость двигаться противоположно основному потоку. Это локальное противотечение, взаимодействуя с основным потоком, образует пару вихрей». Такое же описательное объяснение (но не механизм) находим и в других источниках, например (Wu et al., 2006). Обычно для объяснения процесса образования вихрей Кармана просто ссылаются на неустойчивость пограничного (сдвигового) слоя, возникающего при обтекании твёрдой поверхности.

Но есть и другая точка зрения, заключающаяся в том, что по крайней мере в случае АВД неустойчивость пограничного слоя не играет никакой роли, а их образование есть следствие бароклинной неустойчивости в стратифицированной среде (Etling, 1989). В развитие этой идеи была выдвинута специальная, но по-прежнему чисто описательная теория, объясняющая формирование ABД наличием температурной инверсии над вулканическими островами (Ito, Niino, 2016; Nunalee, Basu, 2014; Young, Zawislak, 2006). Однако такое объяснение нельзя признать конструктивным, поскольку из него не вытекает механизма образования ABД. По нашему мнению, температурная инверсия над вулканическими островами способствует образованию облаков, которые служат хорошим средством визуализации динамики процесса, но к нему самому никакого отношения не имеет.

Основная характеристика любого вихря состоит в наличии центростремительного ускорения $\varkappa q^2$, $q = |\mathbf{v}|$ — модуль скорости, кривизна $\varkappa = 1/r$, r — радиус кривизны, обеспечивающего искривление линий тока. Это ускорение сопровождается установлением центростремительного баланса с поперечным (нормальным к линиям тока) градиентом давления: $\rho^{-1} \partial p / \partial n = \varkappa u^2$, где ρ — плотность, n — координата по нормали к линии тока. К моменту отрыва сдвиговый слой из-за искривления линий тока просто обязан приобрести центростремительный баланс, который будет сохраняться и после отрыва сдвигового слоя. Это и есть предлагаемый физический механизм образования вихрей Кармана. Следует отметить, что центробежный баланс появляется только в криволинейной (цилиндрической или натуральной) системе координат (Powers, 2008).

Процедуры анализа спутниковых изображений

Для измерения динамических и геометрических параметров АВД по разновременным изображениям полярно-орбитальных спутников требуются географические проекции с пиксельной точностью. Мы применяем программные средства построения таких проекций, разработанные в Спутниковом центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) (Катаманов, 2014; Левин и др., 2010). В соответствии с поставленной целью нам требовались процедуры определения динамических и некоторых геометрических параметров. К динамическим параметрам относятся: скорость набегающего потока U, скорость сноса вихрей по течению V и орбитальная скорость W. К геометрическим параметрам — диаметр вихрей D и расстояние между вихрями одного направления вращения a. Продемонстрируем эти процедуры на примере пары спутниковых изображений NOAA-15 и NOAA-18 за о. Чеджу (Jeju) 8 января 2015 г., интервал времени между которыми составляет 30 мин (*puc. 1, 2*).



Рис. 1. АВД за о. Чеджу по изображениям спутников NOAA-15 и NOAA-18 за 8 января 2015 г. Красные точки — центры вихрей на первом изображении; синие точки — центры вихрей на втором изображении; зелёные стрелки показывают перемещение центров за 30 мин; жёлтым показано расстояние между парой вихрей *а*



Рис. 2. Схема динамики АВД за о. Чеджу 8 января 2015 г. на спутниковых изображениях NOAA-15 и NOAA-18 (см. обозначения в тексте)

Параметр *U* определялся по движению облаков методом, изложенном в статье (Алексанин и др., 2013). Основой процедур вычисления *V*, *D* и *a* служит вписывание окружностей в наблюдаемые сегменты облачных дуг, т.е. установление их кривизны. Тем самым определя-

ются центры вихрей, прослеживание перемещения которых на паре изображений даёт оценку параметра V (см. *рис. 1*). Аналогичный подход применялся в (Young, Zawislak, 2006) к одиночным изображениям, что позволило рассчитать только геометрические параметры ABД. Использование пары разновременных спутниковых снимков позволяет получить оценку динамических параметров процесса образования ABД. В нашем случае параметры вихревых цепочек измерялись с помощью программы Glance (http://www.satellite.dvo.ru/contentid-18.html).

Наиболее сложной процедурой является определение параметра Wи, следовательно, времени образования АВД: $T = \pi D/W$. Эта процедура сводится к прослеживанию развития облачной дуги (изменения её длины) на начальной стадии формирования АВД и будет рассмотрена в следующем разделе.

Результаты анализа спутниковых изображений

Скорость орбитального движения W зарождающегося вихря можно оценить через изменение длины облачной дуги во времени и его диаметр D. В рассматриваемом случае $D \approx 20$ км (удвоенный радиус кривизны). На *рис. 2* хорошо видно развитие начальной стадии процесса: за 30 мин успевает сформироваться примерно треть первого вихря от острова. Длина первой трети пути $\pi D/3 \approx 20,9$ км и, следовательно, орбитальная скорость на начальном этапе формирования $W \approx 11,6$ м/с. На основе этого наблюдения можно получить оценку времени образования вихря: около 1,5 ч. Однако такая оценка будет явно заниженной. Дело в том, что облака участвуют в двух движениях: перемещении (дрейфе, сносе) вихрей как целого и орбитальном движении относительно их центров. В результате наблюдаются волнообразные «облачные дуги», которые следуют только части вихря и далее переходят на другие вихри. Поэтому для наблюдения доступна лишь начальная фаза процесса образования вихрей, а для оценки времени образования нужно определить время полного оборота струи вокруг центра до её замыкания.

Орбитальная скорость W на начальном этапе составляет примерно 58 % от скорости набегающего потока $U \approx 20$ м/с. Замедление потока вызвано торможением при попадании в застойную область за островом, образующуюся при сносе вихрей. Разумно предположить, что и дальнейшее замедление будет происходить в том же темпе. Тогда орбитальные скорости для второй и третей частей вихря составят примерно 6,7 и 3,9 м/с соответственно. Общее время формирования (верхняя оценка) в таком случае — около трёх часов (30 + 52 + 89 мин). Результирующая скорость W получится при выравнивании скоростей после замыкания струи и составит примерно 7,75 м/с.

Снос вихрей является другим необходимым условием образования АВД, так как новые вихри могут формироваться только в свободной (застойной) зоне, возникающей путём сноса предыдущих вихрей по потоку. Это условие отражается в формуле: N = V/a, где N — частота образования вихрей. Обратная величина (период) P = 1/N соответствует времени образования свободной зоны. Очевидно, что время формирования АВД не может быть меньше, чем этот период, т.е. T > P.

Время образования свободной зоны в нашем случае можно получить по вышеприведённой формуле при значениях: $a \approx 60$ км и $V \approx 12,4$ м/с (см. *puc. 1*). Таким образом, $T \approx 1,35$ ч, что согласуется с изложенными выше соображениями.

Заключение и план дальнейшей работы

В данной работе проведён количественный анализ процесса формирования АВД на примере пары спутниковых изображений NOAA-15 и NOAA-18 за о. Чеджу, разделённых интервалом в 30 мин. В отличие от анализа одиночных изображений, проведён расчёт динамических параметров процесса формирования АВД (скорости набегающего потока, скорости сноса вихрей по течению, орбитальной скорости, времени и периодичности образования АВД). Удалось проследить начальный этап образования АВД и выдвинуть гипотезу, что они возникают в результате отрыва сдвигового пограничного слоя, а ведущим механизмом выступает центростремительное ускорение, присутствующее в момент отрыва. Такая точка зрения вступает в спор с существующей теорией о том, что по крайней мере в случае АВД их образование есть следствие бароклинной неустойчивости в стратифицированной среде (Etling, 1989; Ito, Niino, 2016; Nunalee, Basu, 2014; Young, Zawislak, 2006).

В плане дальнейшей работы предусмотрена автоматизация процедур расчёта динамических параметров АВД, включая исследование их эволюции. Также намечено рассмотрение других случаев, в частности АВД за Курильскими островами (*puc. 3*). Этот случай интересен тем, что представляет разные режимы турбулентности: АВД за островами Матуа, Расшуа, Кетой, Симушир и простой турбулентный след за о. Ушишир. Отметим, что во всех режимах с АВД наблюдается наличие начальной облачной дуги, что позволяет провести анализ процесса образования АВД по описанному выше сценарию. Кроме того, особенности АВД за о. Симушир (АВД наблюдается строго за горой, а не за всем островом) указывают на необходимость адаптации моделей АВД к топографии островов. Ожидается, что сравнительный анализ разных случаев позволит получить новые выводы о природе турбулентности и роли центростремительного ускорения в её возникновении.



Рис. 3. АВД за Курильскими островами: Изображение за 16 апреля 2012 г. (02:16:59 UTC) со спутника AQUA/ MODIS в видимом спектральном диапазоне. Сплошными окружностями обозначены острова, за которыми наблюдаются АВД. Пунктирной окружностью показан о. Ушишир, за которым наблюдаются стся простой турбулентный след

Работа поддержана программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров» — проект «Моделирование с помощью суперкомпьютеров опасных океанических и иных природных явлений и контроля техногенных объектов».

Литература

1. Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 131–142.

- 2. Беляев Е. Н., Черваков В. В. Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ, 2009. 278 с.
- 3. *Катаманов С. Н.* Точная географическая привязка изображений AVHRR/NOAA без реперных точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 78–91.
- 4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматлит, 1963. Ч. 1. 253 с.
- 5. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М. Г., Дьяков С. Е., Недолужко И. В., Фомин Е. В. Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников // Открытое образование. 2010. № 5. С. 41–49.
- 6. *Caldeira R. M., Tomé R.* Wake response to an ocean-feedback mechanism: Madeira island case study // Boundary-Layer Meteorology. 2013. V. 5. P. 1–18.
- Chopra K., Hubert L. Mesoscale eddies in wake of islands // J. Atmospheric Sciences. 1965. V. 22. No. 6. P. 652–657.
- 8. *Etling D.* On atmospheric vortex streets in the wake of large islands // Meteorology and Atmospheric Physics. 1989. V. 41. P. 157–164.
- Hubert L., Krueger A. Satellite pictures of mesoscale eddies // Monthly Weather Review. 1962. V. 90. No. 11. P. 457–463.
- 10. *Ito J.*, *Niino H.* Atmospheric Kármán vortex shedding from Jeju Island, East China Sea: A numerical study // Monthly Weather Review. 2016. V. 144. P. 139–148.
- 11. Li X., Zheng W., Zou C., Pichel W. A SAR observation and numerical study on ocean surface imprints of atmospheric vortex streets // Sensors. 2008. V. 8. No. 5. P. 3321–3334.
- 12. *Nunalee C. G., Basu S.* On the periodicity of atmospheric von Kármán vortex streets // Environmental Fluid Mechanics. 2014. V. 14. P. 1335–1355.
- 13. *Powers J. M.* Lecture notes on intermediate fluid mechanics. Notre Dame, Indiana, USA: University of Notre Dame, 2008. 340 p.
- Roshko A. Perspectives on bluff body aerodynamics // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993. V. 49. P. 70–100.
- 15. Wu J. Z., Ma H. Y., Zhou M. D. Vorticity and vortex dynamics. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer, 2006. 13 p.
- 16. *Young G. S., Zawislak J.* An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets // Monthly Weather Review. 2006. V. 134. P. 2285–2294.

A study of atmospheric vortex streets formation using satellite observations

A. V. Kazansky¹, M. G. Aleksanina^{1,2}

¹ Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia ² Far Eastern Federal University, Vladivostok 690091, Russia E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru

This work is dedicated to a study of the formation mechanism of atmospheric vortex streets (AVS) using satellite observations. The status of current research is briefly described and a conclusion is drawn about the absence of understanding of this mechanism in contemporary literature. The main disadvantage consists of a lack of comprehension of the leading role of centripetal acceleration in the process of AVS formation. It is shown that centripetal acceleration, which is a necessary attribute of any vortex, appears in the boundary layer flowing around a curved surface of a bluff body and it is supported by balancing with the transverse pressure gradient. Based on the example of the pair of satellite images NOAA-15 and NOAA-18 past the Jeju Island in January 2015, with an interval of 30 minutes, the calculation of the dynamic parameters of the process of AVS formation (velocity of incident flow, drift speed of vortices, orbital velocity, time and periodicity of AVS formation) is carried out. It has been possible to trace the initial stage of AVS formation and to show that they are formed as a result of shift boundary layer detachment, and the centripetal acceleration which is present at the moment of separation, emerges as the driving mechanism. This confirms the theory proposed in this work.

Keywords: atmospheric vortex streets, formation mechanism, centripetal acceleration, dynamic analysis of satellite images

Accepted: 17.05.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-256-262

References

- 1. Aleksanin A. I., Aleksanina M. G., Karnatskii A. Yu., Avtomaticheskii raschet skorosteii poverkhnostnykh techenii okeana po posledovatel'nosti sputnikovykh izobrazhenii (Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 131–142.
- 2. Belyaev E. N., Chervakov V. V., *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* (Mathematical modeling of liquid propellant rocket engines), Moscow: MAI, 2009, 278 p.
- 3. Katamanov S. N., Tochnaya geograficheskaya privyazka izobrazhenii AVHRR/NOAA bez repernykh tochek (Accurate NOAA/AVHRR image navigation without ground control points), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 78–91.
- 4. Kochin N. E., Kibel I. A., Roze N. V., *Teoreticheskaya gidromekhanika* (Theoretical fluid mechanics), Moscow: Fizmatlit, 1963, Pt. 1, 583 p.
- Levin V.A., Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., D'yakov S.E., Nedoluzhko I.V., Fomin E.V., Razrabotka tekhnologii sputnikovogo monitoringa okruzhayushchei sredy po dannym meteorologicheskikh sputnikov (Development of technologies for satellite environmental monitoring based on meteorological satellite data), *Otkrytoe obrazovanie*, 2010, No. 5, pp. 41–49.
- 6. Caldeira R. M., Tomé R., Wake response to an ocean-feedback mechanism: Madeira island case study, *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, Vol. 5, pp. 1–18.
- Chopra K., Hubert L., Mesoscale eddies in wake of islands, J. Atmospheric Sciences, 1965, Vol. 22, No. 6, pp. 652–657.
- 8. Etling D., On atmospheric vortex streets in the wake of large islands, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1989, Vol. 41, pp. 157–164.
- 9. Hubert L., Krueger A., Satellite pictures of mesoscale eddies, *Monthly Weather Review*, 1962, Vol. 90, No. 11, pp. 457–463.
- 10. Ito J., Niino H., Atmospheric Kármán vortex shedding from Jeju Island, East China Sea: A numerical study, *Monthly Weather Review*, 2016, Vol. 144, pp. 139–148.
- 11. Li X., Zheng W., Zou C., Pichel W., A SAR observation and numerical study on ocean surface imprints of atmospheric vortex streets, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 5, pp. 3321–3334.
- 12. Nunalee C. G., Basu S., On the periodicity of atmospheric von Kármán vortex streets, *Environmental Fluid Mechanics*, 2014, Vol. 14, pp. 1335–1355.
- 13. Powers J. M., *Lecture notes on intermediate fluid mechanics*, Notre Dame, Indiana, USA: University of Notre Dame, 2008, 340 p.
- 14. Roshko A., Perspectives on bluff body aerodynamics, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, Vol. 49, pp. 70–100.
- 15. Wu J. Z., Ma H. Y., Zhou M. D., *Vorticity and vortex dynamics*, Berlin –Heidelberg New York: Springer, 2006, 13 p.
- 16. Young G.S., Zawislak J., An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets, *Monthly Weather Review*, 2006, Vol. 134, pp. 2285–2294.