НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

Левин В. А., Алексанина М. Г., Дьяков С. Е., Еременко А. С., Казанский А. В.
V. A. Levin, M. G. Aleksanina, S. E. Dyakov, A. S. Eremenko, A. V. Kazansky

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОРОЖЕК КАРМАНА В ОБЛАЧНОСТИ
ЗА КУРИЛЬСКИМИ ОСТРОВАМИ**

**INVESTIGATION OF CLOUD KÁRMÁN VORTEX STREETS BEHIND
THE KURIL ISLANDS**

Левин Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, академик Российской академии наук, профессор, главный научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: levin@iacp.dvo.ru.

Mr. Vladimir A. Levin – Doctor of Physics, academician of RAS, professor, Chief Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: levin@iacp.dvo.ru.

Алексанина Марина Георгиевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: margeo@mail.ru.

Mrs. Marina G. Aleksanina – Phd of Engineering, Senior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: margeo@mail.ru.

Дьяков Сергей Евгеньевич – младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: sergdkv@gmail.com.

Mr. Sergey E. Dyakov – Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: sergdkv@gmail.com.

Еременко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: academy21@gmail.com.

Mr. Aleksandr S. Eremenko – Phd in Engineering, Junior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: academy21@gmail.com.

Казанский Александр Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток). E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru.

Mr. Aleksandr V. Kazansky – Phd in Physics, Senior Researcher of Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: kazansky@iacp.dvo.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты спутникового мониторинга атмосферных дорожек Кармана за Курильскими островами (весна 2012 года). Новизна работы состоит в том, что с использованием только временных пар спутниковых данных были рассчитаны основные гидродинамические параметры, определяющие структуру атмосферных дорожек Кармана. Это числа Рейнольдса, Струхала, Фруда, а также расчёты геометрических параметров и скорость перемещения вихрей по последовательности спутниковых изображений. При проведении расчётов характерный размер препятствия выбирался на высоте верхней границы слоя инверсии по вертикальному профилю температуры атмосферы. Сделано сравнение с широко применяемым подходом «разделяющей линии потока», выделяющей горизонтальное обтекание через препятствие. Показано хорошее соответствие высот физике процесса генерации вихрей, но при этом оценки высот имеют значительные разбросы.

Summary. The paper presents results of satellite monitoring of atmospheric vortex streets behind the Kuril Islands on the spring of 2012. The main hydrodynamic parameters determining the structure of Kármán atmospheric streets were calculated using satellite data. These are the Reynolds, Strouhal, and Froude numbers as well as the calculation of geometric parameters and the speed of vortex drift on a sequence of satellite images. The obstacle typical sizes were chosen at the height of the inversion layer over island boundaries based on vertical atmospheric tem-

perature profiles. We compared the results with the widely used approach of «dividing-streamline» the horizontal flow around an obstacle. A good overall agreement of heights with the physics of vortex generation process was shown, but the estimates of heights revealed considerable variations.

Ключевые слова: дорожки Кармана, спутниковые изображения, числа Струхала и Рейнольдса, частота срыва вихрей, скорость перемещения вихрей.

Key words: Kármán streets, satellite images, Strouhal and Reynolds numbers, vortex shedding frequency, vortex drift speed.

УДК 53.043:532.527

Работа частично поддержана грантом РНФ № 14-50-00034 в части исследования струйно-вихревых образований атмосферы и океана, а также Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности» на 2018 год. При её выполнении использованы информационные ресурсы Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Введение

Цепочка вихрей, которая наблюдается при обтекании жидкостью или газом протяжённых цилиндрических тел с продольной осью, перпендикулярной направлению движения сплошной среды, называется вихревой дорожкой Кармана в честь Теодора фон Кармана, который впервые описал этот процесс в 1912 году [26]. Явление можно наблюдать лишь при ограниченных значениях числа Рейнольдса. Размеры дорожки зависят от размера обтекаемого тела, при этом существует линейная зависимость между шириной дорожки и расстоянием между соседними вихрями [3; 5].

Основная часть исследований облачных дорожек Кармана опирается на модельные расчёты и результаты лабораторных исследований [10; 11; 12; 15; 16; 20; 22; 23 27;]. Большое количество работ посвящено облачным дорожкам Кармана за островом Мадейра в Северо-Восточной Атлантике [7; 9; 17; 19]. В северо-западной части Тихого океана облачные дорожки Кармана регулярно наблюдаются за островом Чеджу [8; 14; 15; 21; 25;]. Несмотря на достаточно большое количество работ по данной теме, исследования единого понимания механизма образования облачных дорожек Кармана в природных условиях всё же нет.

В районе Курильских островов облачные вихревые дорожки Кармана наблюдаются редко. Однако за 15-16 апреля 2012 г. на спутниковых изображениях наблюдалось до 9-10 облачных дорожек Кармана разного масштаба. Почти при одних и тех же условиях ветра и состояния атмосферы можно было наблюдать разнообразие форм и поведения облачных дорожек Кармана.

Имеющиеся спутниковые наблюдения в рассматриваемых случаях позволили провести расчёты основных геометрических и гидродинамических параметров, ответственных за образование вихревых цепочек в атмосфере. В данной статье представлены результаты проведённых измерений и расчётов.

Объекты и данные

Курильские острова – цепь вулканических островов между полуостровом Камчатка и островом Хоккайдо. За 16 апреля 2012 г. на спутниковых изображениях наблюдалось около 10 облачных дорожек Кармана разного масштаба (см. рис. 1.) При имеющемся разрешении (1,1 км радиометр AVHRR/NOAA и 250 м радиометр MODIS/AQUA) наиболее чётко наблюдались облачные вихревые дорожки Кармана за четырьмя островами средней Курильской гряды – о. Матуа, о. Расшуа, о. Кетой и о. Симушир. Минимальный интервал времени между спутниковыми наблюдениями составил 13 минут.

Для расчёта вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы по данным радиометров ATOVS (спутники NOAA-15,-18,-19) использовались адаптированные под параллель-

ную обработку программные пакеты Европейского космического агентства – AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar. Профили рассчитываются на 43 стандартных уровнях по вертикали. Для каждой точки в зависимости от географических координат и времени года определяется наиболее подходящее стандартное начальное приближение профиля из имеющихся в пакете RTTOV. Отбирались только профили, прошедшие жёсткий контроль по точности.

Для расчёта скорости набегающего потока воздуха использовался усовершенствованный кросскорреляционный метод построения перемещений облачных маркеров по последовательности спутниковых изображений [1]. Предполагалось, что скорость потока постоянна по вертикали от поверхности до верхней границы инверсии. Параметры вихревых дорожек и смещения отдельных вихрей рассчитывались по изображениям визуально.

Рис. 1. Курильские острова по состоянию на 16 апреля 2012 г.:
видимый канал NOAA-19/AVHRR – время UTC 02:49. Показаны скорости перемещений
облачности, рассчитанные автоматически (белые стрелки) и скорости смещения отдельных
вихрей, рассчитанные визуально (тёмно-серые стрелки)

Используемые методы

В реальной атмосфере облачные вихревые цепочки чаще всего наблюдаются за вулканическими островами в море и образуются в тех случаях, когда нижний слой атмосферы ограничен сверху выраженной инверсией, располагающейся гораздо ниже вершины острова или гребня хребта [11]. Инверсия препятствует обтеканию препятствия сверху, в результате чего реализуется в основном боковое обтекание. Предполагается существование границы раздела двух типов обте-

кания препятствия, уровень которой назван *dividing streamline* и который лежит выше уровня инверсии. В атмосфере при наличии сильной стратификации и достаточно выраженной инверсии, а также, если препятствие достаточно высоко, следует ожидать отрыва вихрей. В этих условиях поток ниже линии деления вынужден обогнуть остров в почти горизонтальной плоскости с возможным образованием вихрей с вертикальной осью. Индикаторами этого режима являются безразмерные числа Рейнольдса и Струхала. Чтобы их рассчитать, требуются оценки параметров ветра и характерного размера препятствия d .

Безразмерной частотой генерации вихрей является число Струхала St , которое связано с числом Рейнольдса для потока, порождающего след от препятствия [6]. Основным соотношением для вихрей дорожки Кармана является то, что это число зависит только от единственной безразмерной величины – параметра подобия, называемого числом Рейнольдса Re [2]:

$$Re = \rho V_w \frac{d}{\mu}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды; V_w – скорость набегающего на препятствие потока; d – линейный размер препятствия; μ – коэффициент её динамической вязкости.

Значения числа Струхала для препятствия в виде кругового цилиндра в так называемой за-критической области ($Re \gg 10^7$) у разных исследователей отличается и соответствует диапазону 0,22...0,30 [6; 4]. Строго говоря, лабораторные эксперименты, которые соответствовали бы нашим случаям, когда $Re \sim 10^{10}$, отсутствуют, так как не генерируются состояния, когда $Re \gg 10^7$, поэтому придётся ориентироваться на эти оценки.

Число Струхала связано с частотой срыва вихрей f соотношением [19]

$$S_t = f \frac{d}{V_w}, \quad (2)$$

где f – частота вихреобразования; d – характерный линейный размер препятствия; V_w – скорость набегающего потока.

Зная число Струхала, можно рассчитать частоту вихреобразования:

$$f \approx \frac{(S_t V_w)}{d}. \quad (3)$$

С другой стороны, частота вихреобразования определяется через скорость смещения вихрей V_v [19]:

$$f \approx \frac{V_v}{a}, \quad (4)$$

где a – расстояние между вихрями одного знака вращения. При наличии последовательности спутниковых изображений с временным интервалом, за которым облачность сохраняет свою структуру, можно рассчитать (по перемещению центров) скорости смещений вихрей V_v , скорость набегающего потока V_w и остальные геометрические характеристики вихревых цепочек – поперечный размер b и расстояние между двумя вихрями одного знака вращения a (см. рис. 2). В таком случае можно получить соотношения, позволяющие напрямую вычислить число Струхала St :

$$S_t \approx \frac{(V_v d)}{(a V_w)} \approx \frac{V_v d}{V_w a}. \quad (5)$$

Рис. 2. Схема динамики облачной дорожки Кармана над островом:
 V_w – набегающий на остров поток; V_v – скорость смещения вихрей дорожки;
 a – расстояние между ближайшими вихрями одного знака вращения; b – поперечный размер дорожки; d – характерный размер препятствия

Результаты измерений и расчётов

Для расчёта безразмерного числа Рейнольдса Re величина относительной плотности воздуха бралась как $\rho = 1,019 \text{ кг/м}^3$, а величина вязкости воздуха μ – как $1,68 \times 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Эти величины можно считать постоянными по пространству и времени. Построенные для исследуемых островов вертикальные профили температуры над Курильскими островами – Матуа, Расшуа, Кетой и Симушир – за 16 апреля 2012 г. показали наличие инверсии на высоте значительно меньшей, чем высота вулканических островов (см. рис. 3).

Характерным размером препятствия d была принята ширина поперечного к потоку профиля острова на высоте, которая соответствует верхней границе инверсии. Для этого были построены профили островов, перпендикулярные потоку, по данным спутниковой топографии (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) с пространственным разрешением 90 м.

Оценка высоты верхней границы инверсии получалась следующим образом. В слое инверсии температура была почти постоянной, а выше слоя наблюдалось её почти линейное уменьшение. Пересечение линейной аппроксимации температуры выше слоя инверсии с вертикальной линией постоянной температуры в слое инверсии дало высоту верхней кромки для Курильских островов. Высоты на Курильских островах были почти идентичны и незначительно колебались около уровня, соответствующего 520 м. Для каждого острова профили в набегающем потоке перед ним и сразу за ним были почти идентичны и отличались только незначительной сдвижкой по шкале температуры – около $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (за островом значение температуры было выше).

Рис. 3. Максимальные высоты и атмосферные профили температуры перед островами по состоянию на 16 апреля 2012 г.: а – Матуа; б – Расшуа; в – Кетой; г – Симушир

Частота вихреобразования f определяется согласно формуле (4) через скорость смещения вихрей V_v и расстояние между двумя вихрями одного знака вращения a [19]. Частоты f рассчитывались для пар вихрей, взятых в разных местах дорожек. В расчётах использовались только максимальные частоты, которые наблюдались сразу за островами. Характеризующие стабильность вихревых цепочек – числа Рейнольдса и Струхала – рассчитывались согласно соотношению (5). В табл. 1 приведены значения чисел Рейнольдса и Струхала, вычисленные для полученных значений характерного диаметра препятствия. В одном случае диаметр d_{inv} брался на высоте H_{inv} темпе-

ратурной инверсии атмосферного профиля, а в другом случае d_{hc} брался на высоте H_{hc} раздвоения потока, преодолевающего препятствие.

Таблица 1

Число Струхала St и Рейнольдса Re , характерный размер препятствия d по высоте инверсии температуры h_{inv} и высоте линии, разделяющей поток h_c

Острова	V_w , m/s	V_v , m/s	a , km	h_{inv} , m	d_{inv} , m	St_{inv}	$Re_{inv} \times 10^{10}$	h_c , m	d_{hc} , m	St_{hc}	$Re_{hc} \times 10^{10}$
Матуа	14	8,49	12	525	3683	0,18	0,31	578	3570	0,18	0,30
Расшуа	14	11,15	16	525	5000	0,24	0,42	305	10252	0,51	0,87
Кетой	14	8,75	13	525	5420	0,26	0,46	512	5486	0,26	0,46
Симушир	14	8,03	19	525	6800	0,20	0,57	712	5676	0,17	0,48

Из табл. 1 видно, что число Струхала St в большинстве случаев меньше величин диапазона, соответствующего закритичным числам Рейнольдса, то есть при $Re > 10^7$ число St принимает величину в пределах 0,22...0,3. Вероятно, это связано с не совсем корректной оценкой характерного размера препятствия. Вихри формируются в слое от поверхности до верхней границы инверсии, поэтому в качестве эффективного диаметра препятствия d необходимо использовать некоторый характерный размер, расположенный ниже слоя инверсии.

Были проведены сравнения высот инверсии с высотой h_c линии воздушного потока, отделяющей горизонтальное обтекание от потока через препятствие. Расчёты проводились по формулам, приведённым в работе [11]. С использованием вертикальных профилей температуры производились расчёты потенциальной температуры θ . После этого рассчитывалась частота Вейселя – Брента N для каждого уровня высоты z , представленного в вертикальных профилях:

$$N = \left(\frac{g \delta \theta}{\theta_0 \delta z} \right), \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; θ_0 – средняя потенциальная температура в слое, для которого считается баланс (7). С использованием рассчитанной скорости набегающего потока V_w , высоты препятствия (высоты острова), частоты Вейселя – Брента для получения характерной высоты потока h_c был произведён расчёт интеграла согласно выражению, представленному [24]:

$$\frac{1}{2} V_w^2 (h_c) = \int_{h_c}^H N^2(z) (H - z) dz. \quad (7)$$

Так как высота h_c является неизвестной, то её вычисление производится путём подбора h_c до совпадения левой и правой частей интеграла. После получения высоты h_c производилось вычисление числа Фруда [24] для каждого из островов:

$$Fr = 1 - \frac{h_c}{H}. \quad (8)$$

С использованием атмосферных профилей и скорости набегающего потока для каждого случая были вычислены числа Фруда и высоты, на которых происходит расщепление потоков. Атмосферные профили для Курильских островов идентичны по пространству и имеют фактически

одну и ту же высоту верхнего уровня инверсии – 520 м. Разумно ожидать, что и линия разделения потоков также будет иметь одну и ту же высоту. Однако разброс h_c значительный (300...700 м). В то же время средняя величина h_c близка к величине верхней границы инверсии. По-видимому, это идентичные величины, но оценка по температурным профилям атмосферы более надёжна.

Обсуждение и заключение

Для классических вихревых дорожек, образующихся при обтекании круглого цилиндра, известны 6 режимов, определяемых величиной числа Рейнольдса, лежащей в диапазоне $0...10^7$ [18]. При числах Рейнольдса свыше 10^7 возникает закритическая область турбулентности, которая также характеризуется наличием вихревой дорожки, но для которой геометрические соотношения классических дорожек Кармана могут не выполняться.

В данной работе впервые представлено исследование по спутниковым данным облачных дорожек Кармана за Курильскими островами. Это исследование подтверждает точку зрения о том, что образование облачных дорожек Кармана обусловлено наличием инверсии в вертикальном профиле температуры атмосферы. В данном случае препятствие оказывается цепочкой изолированных островов. Образуются именно дорожки Кармана, в противном случае наблюдался бы описанный в работе [28] турбулентный след за сеткой.

Анализ полученных табличных значений (см. табл. 2) и графиков (см. рис. 4) показывает, что наиболее устойчивыми (длинными, стабильными по размеру вихрей и скорости их перемещения) и соответствующим классическим дорожкам Кармана по соотношению поперечных размеров к продольным b/a являются вихревые дорожки за островами Матуа и Кетой.

Рис. 4. Отношение поперечного размера к продольному размеру (b/a) и поперечного размера к характерному диаметру препятствия (b/d), взятому на высоте температурной инверсии атмосферного профиля в облачных вихревых цепочках на Курилах по состоянию на 16 апреля 2012 г.

Отношение поперечных размеров к продольным b/a лежит в пределах $0,4 \dots 0,6$. Отношение поперечного размера к характерному диаметру препятствия b/d , где d берётся по высоте верхней кромки температурной инверсии, также согласуется с результатами других исследований на других вулканических островах [13] и лежит в пределах $0,9 \dots 2,45$. Такое соотношение геометрических параметров вихревых цепочек не соответствует классическим отношениям дорожек Кармана при числе Рейнольдса до 200 ($Re < 200$). В закритической области турбулентности при числах Рейнольдса свыше 10^7 должны быть другие соотношения. Кроме того, заниженные значения числа Струхала, которые являются показателем частоты срыва вихрей, указывают на то, что характерный диаметр d препятствия надо брать ниже линии температурной инверсии атмосферного профиля.

Таблица 2

Геометрические соотношения вихревых цепочек: отношение поперечного размера к продольному (b/a) и отношение поперечного размера к характерному диаметру препятствия (b/d) (d берётся по высоте температурной инверсии)

Острова	b/a	b/d
Матуа	0,45	1,49
Расшуа	0,29	0,92
Кетой	0,63	1,47
Симушир	0,46	1,29

Случай от 16 апреля 2012 г. на Курильских островах интересен тем, что при идентичности набегающих на острова потоков наблюдается разнообразие форм облачных вихревых цепочек. С использованием только данных спутникового мониторинга для вихревых атмосферных дорожек за островами Курильской гряды в северо-западной части Тихого океана 16 апреля 2012 г. были рассчитаны величины частот вихреобразования, числа Струхала и Рейнольдса – основные гидродинамические параметры. Для их расчёта оценивались характерные размеры препятствия двумя способами. Первый основан на расчёте высоты линии разделения потока dividing streamline h_c [11] и оценке горизонтального размера вертикального сечения острова на этой высоте d_{hc} . Второй основан на расчёте высоты верхней кромки слоя инверсии по спутниковым атмосферным вертикальным профилям температуры с оценкой аналогичного характерного размера острова.

Атмосферные профили для Курильских островов идентичны по пространству и имеют фактически одну и ту же высоту верхнего уровня инверсии. Эта высота почти совпала со средней высотой h_c , что указывает на возможную идентичность этих двух способов. Однако из-за значительного разброса величин h_c на Курильских островах первый способ менее надёжен. Острова ниже верхнего уровня слоя инверсии h_{inv} дорожки не генерировали.

Вихревые дорожки, по-видимому, формируются в слое инверсии, и характерный размер препятствия должен соответствовать размеру сечения на высоте ниже верхней границы слоя инверсии, но выше основания острова. На это косвенно указывают числа Струхала, которые меньше соответствующих оценок для закритических чисел Рейнольдса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанин, А. И. Автоматический расчёт скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений / А. И. Алексанин, М. Г. Алексанина, А. Ю. Карнацкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 131-142.
2. Ареф, Х. Вихревая динамика волновых следов / Х. Ареф // Нелинейная динамика. – 2006. – Т. 2. – №. 4. – С. 411-424.
3. Кочин, Н. Е. О неустойчивости вихревых цепочек Кармана / Н. Е. Кочин // Доклады АН СССР 24. – 1939. – №. 1. – С. 18.
4. Achenbach, E. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 / E. Achenbach, E. Heinecke // Journal of fluid mechanics. – 1981. – Vol. 109. – P. 239-251.

5. Batchelor, G. K. An introduction to fluid dynamics [Электронный ресурс] / G. K. Batchelor. – Cambridge university press, 2000. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>.
6. Blevins, R. D. Flow Induced Vibration / R. D. Blevins. – Van Nostrand Reinhold Co. – 1990. – P. 451.
7. Caldeira, R. M. Wake response to an ocean-feedback mechanism: Madeira Island case study [Электронный ресурс] / R. M. Caldeira, R. Tomé // Boundary-layer meteorology, 2013. – Vol. 148. – №. 2. – P. 419-436. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9817-y>.
8. Chung, Y. S. Mountain-generated vortex streets over the Korea South Sea [Электронный ресурс] / Y. S. Chung, H. S. Kim // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29. – №. 3. – P. 867-877. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/01431160701281080>.
9. Couvelard, X. et al. Wind mediated vorticity-generation and eddy-confinement, leeward of the Madeira Island: 2008 numerical case study [Электронный ресурс] / X. Couvelard // Dynamics of Atmospheres and Oceans. – 2012. – Vol. 58. – P. 128-149. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2012.09.005>.
10. Epifanio, C. C. The dynamics of orographic wake formation in flows with upstream blocking [Электронный ресурс] / C. C. Epifanio, R. Rotunno // Journal of the atmospheric sciences. – 2005. – Vol. 62. – №. 9. – P. 3127-3150. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1175/JAS3523.1>.
11. Etling, D. On atmospheric vortex streets in the wake of large islands [Электронный ресурс] / D. Etling // Meteorology and Atmospheric Physics. – 1989. – Vol. 41. – №. 3. – P. 157-164. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/BF01043134>.
12. Heinze, R. The structure of Kármán vortex streets in the atmospheric boundary layer derived from large eddy simulation [Электронный ресурс] / R. Heinze, S. Raasch, D. Etling // Meteorologische Zeitschrift. – 2012. – Vol. 21. – №. 3. – P. 221-237. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0313>.
13. Horvath A. Inter-Comparison of WRF Model Simulated Winds and MISR Stereoscopic Winds Embedded within Mesoscale von Kármán Wake Vortices / A. Horvath, C. G. Nunalee, K. J. Mueller // AGU Fall Meeting Abstracts. – 2014.
14. Ito, J. Atmospheric Kármán Vortex Shedding from Jeju Island, East China Sea: A Numerical Study / J. Ito, H. Niino // Monthly Weather Review. – 2016. – Vol. 144. – №. 1. – P. 139-148.
15. Jensen, N. O. Vortex cloud street during AMTEX 75 / N. O. Jensen, E. M. Agee // Tellus. – 1978. – Vol. 30. – №. 6. – P. 517-523.
16. Kang, S. D. A numerical study on the Kármán vortex generated by divergence of momentum flux in flow past an isolated mountain / S. D. Kang, F. Kimura, S. Takahashi // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. – 1998. – Vol. 76. – №. 6. – P. 925-935.
17. Li, X. et al. A SAR observation and numerical study on ocean surface imprints of atmospheric vortex streets [Электронный ресурс] / X. Li // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – №. 5. – P. 3321-3334. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s8053321>.
18. Lienhard, J. H. Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders / J. H. Lienhard. – Technical Extension Service, Washington State University, 1966. – P. 300.
19. Nunalee, C. G. On the periodicity of atmospheric von Kármán vortex streets [Электронный ресурс] / C. G. Nunalee, S. Basu // Environmental Fluid Mechanics. – 2014. – Vol. 14. – №. 6. – P. 1335-1355. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9340-9>.
20. Rotunno, R. Further results on lee vortices in low-Froude-number flow / R. Rotunno, P. K. Smolarkiewicz // Journal of the atmospheric sciences. – 1991. – Vol. 48. – №. 19. – P. 2204-2211.
21. Ruscher, P. H. A numerical simulation of an atmospheric vortex street / P. H. Ruscher, J. W. Deardorff // Tellus. – 1982. – Vol. 34. – №. 6. – P. 555-566.
22. Schär, C. Vortex formation and vortex shedding in continuously stratified flows past isolated topography / C. Schär, D. R. Durran // Journal of the atmospheric sciences. – 1997. – Vol. 54. – №. 4. – P. 534-554.
23. Snyder, W. H., Thomson, R. S., Eskridge, R. E. The structure of strongly stratified flows over hills: Dividing streamline concept / W. H. Snyder, R. E. Lawson, I. P. Castro [and other] // Journal of fluid mechanics. – 1985. – Vol. 152. – P. 249-288.
24. Smolarkiewicz, P. K. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part I: Baroclinically generated lee vortices / P. K., R. Rotunno // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1989. – Vol. 46. – №. 8. – P. 1154-1164.
25. Tsuchiya, K. The clouds with the shape of Kármán Vortex Street in the wake of Cheju Island, Korea / K. Tsuchiya // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. – 1969. – Vol. 47. – №. 6. – P. 457-465.
26. Von Kármán, T. Über den Mechanismus des Flüssigkeits-und Luftwiderstandes (On the mechanism of the resistance in fluids) / T. Von Kármán, H. Rubach // Phys. Z. – 1912. – №. 13. – P. 49-59.
27. Young, G. S. An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets [Электронный ресурс] / G. S. Young, J. Zawislak // Monthly weather review. – 2006. – Vol. 134. – №. 8. – P. 2285-2294. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1175/MWR3186.1>.
28. Wu, J. Z. Vorticity and vortex dynamics / J. Z. Wu, H. Y. Ma, M. D. Zhou. – Springer Science & Business Media, 2007.