ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2020, № 3, с. 38–44

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ ДОРОЖКИ В РАЙОНЕ ШАНТАРСКИХ ОСТРОВОВ (ОХОТСКОЕ МОРЕ) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2020 г. И. А. Жабин[a], *, Н. Б. Лукьянова[a]

[a] *Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия*

**e-mail: zhabin@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 30.08.2019 г.

Спутниковые изображения в видимом диапазоне MODIS Terra/Aqua и ETM+ Landsat-7/ OLI Landsat-8 использованы для исследования вихревых дорожек (ВД) в районе Шантарских островов (Охотское море). Две устойчивые ВД были обнаружены в проливе Северо-Восточный, разделяющем острова Большой и Малый Шантар. Северная ВД формировалась у о. Камни Диомида, южная – у Безымянной группы скал. Северная ВД имела в длину 9–11 км и состояла из 4–5 пар вихрей противоположного знака вращения (циклон-антициклон). Средний диаметр вихрей составлял 0.73 ± 0.09 км. Вихри в южной дорожке прослеживались на расстоянии 6–7 км, при этом регистрировались 3–5 вихревых пар. Средний диаметр вихрей был равен 0.47 ± 0.07 км. Во время отлива вихри в цепочке распространялись преимущественно в восточном направлении, во время прилива – в западном. Пространственные и временные масштабы явления показывают, что как вихри, так и ВД в проливе Северо-Восточный имеют субмезомасштабную природу. Данные дистанционного зондирования позволили определить геометрические параметры, характеризующие устойчивость океанических ВД. Результаты измерений и расчеты можно использовать как тест, показывающий возможность применения существующей теории подобия к ВД в условиях реального океана. Проведено сравнение значений параметров океанических ВД с результатами, полученными в лабораторных экспериментах и характеристиками атмосферных ВД.

Ключевые слова: вихревая дорожка Кармана, субмезомасштабные вихри и структуры, параметры океанических вихревых дорожек, данные дистанционного зондирования, Шантарские острова, Охотское море

DOI: 10.31857/S0205961420020074

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые следы, которые образуются при обтекании потоком жидкости цилиндрического тела или другого препятствия начали активно изучаться после выхода классической работы Кармана (von Karman, Rubach, 1912) и продолжают вызывать повышенный интерес. Задачи, связанные с формированием вихревых следов за препятствиями имеют важное инженерное значение. Упорядоченный вихревой след, состоящий из двух цепочек вихрей с противоположным знаком вращения (циклон – антициклон) называется вихревой дорожкой Кармана (рис. 1, *а*). В атмосфере вихревые дорожки (ВД) возникают при обтекании потоком воздуха расположенных в океане изолированных островов с высокими вершинами. Исследования атмосферных ВД начали проводиться после вывода на орбиту первых метеорологических спутников Земли (Hubert, Krueger, 1962). Данные дистанционного зондирования позволили определить основные параметры ВД в атмосфере (Etling, 1989; Young et al., 2006). Атмосферные ВД были обнаружены в районе Охотского моря над Курильскими островами (Левин и др., 2018). В океане ВД наблюдаются относительно редко. Пространственные масштабы вихрей в дорожках (1–10 км) попадают в диапазон субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей океана, поэтому ВД не могут быть обнаружены и исследованы при помощи стандартных океанографических съемок. Надежная регистрация вихревых следов за островами возможна только на основе данных дистанционного зондирования. Океанические ВД были обнаружены при помощи аэрофотосъемки в районе Большого барьерного рифа (Wolanski et al., 2018). В этом случае в качестве трассера использовались контрасты цвета морской воды, связанные с присутствием взвешенного и органического вещества в поверхностном слое. Субмезомасштабные приливные вихри в этом районе были также зарегистрированы на “стерео” паре снимков спутника WorldView-3 (Delandmeter et al., 2017). Анализ

данных, полученных при помощи спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой ASAR Envisat, позволил зарегистрировать субмезомасштабную ВД в проливе Лусон (Zheng et al., 2008). На радиолокационном изображении вихревые структуры выделялись по изменениям в шероховатости поверхности океана, которые модулируются ВД. В Охотском море ВД наблюдалась в районе Шантарских островов (Жабин и др., 2017). В этом случае в качестве трассера использовался дрейфующий мелкобитый лед (рис. 1, *б*).

В связи с сокращением морских экспедиционных исследований данные дистанционного зондирования стали одним из основных технических средств для изучения океанологических условий Охотского моря (Mitnik, Dudina, 2019). Спутниковые данные дистанционного зондирования, полученные в видимом диапазоне спектра, позволяют определить основные количественные параметры устойчивых ВД в районе Шантарского архипелага и сравнить полученные результаты с теоретическими выводами, с данными лабораторных экспериментов и с характеристиками упорядоченных вихревых структур, наблюдаемых в атмосфере.

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Исследование структуры и основных параметров ВД проводилось на основе информации, полученной при помощи съемочной аппаратуры ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) и OLI (Operational Land Imager), установленной на спутниках Landsat-7 и 8. Синтезированные изображения в естественных цветах (RGB) имели пространственное разрешение 30 м. Для анализа использовались выборка снимков спутников серии Landsat-5,7 и 8 9 (1984–2019 гг.) с облачным покровом менее 10%, полученных в период разрушения ледового покрова (середина мая–середина июля). Для детального анализа и расчета параметров ВД были выбраны три изображения, полученные 11 июля 2005 г. (Landsat-7), 12 июня 2012 г. (Landsat-7) и 2 июня 2017 г. (Landsat-8). В качестве трассера для выделения субмезомасштабных вихрей и ВД использовался дрейфующий морской лед. Центры вихрей определялись при помощи интернет ресурса Landviewer (https//eos.com/landviewer), который позволяет определять координаты точек и расстояние между точками. Центры вихрей определялись визуально как точка пересечения двух перпендикулярных диаметров вихря или как точка пересечения большой и малой полуоси эллипса для вихрей, имеющих форму, близкую к эллиптической. Как дополнительная информация привлекались данные спектрорадиометра MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Terra и Aqua (пространственное разрешение 250 м) и мультиспектрального сенсора MSI (MultiSpectral Instrument) спутника Sentinel-2A (пространственное разрешение 10 м).

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНЕ ШАНТАРСКИХ ОСТРОВОВ

Шантарские острова расположены в южной части обширного северо-западного шельфа Охотского моря. Архипелаг состоит из 15 островов и многочисленных скал и кекуров. Самый большой остров – о. Большой Шантар. Пролив Северо-Восточный, в котором наблюдались ВД, расположен между островами Большой и Малый Шантар (рис. 2, *а*). Максимальная глубина пролива около 30 м. В проливе расположены два скалистых острова, северный называется Камни Диомида, южная частично притопленная группа скал не имеет собственного названия (Безымянные группа скал, рис. 2, *б*). В зимний период в районе Шантарских островов наблюдаются исключительно суровые климатические условия. В среднем ледовый покров наблюдается в период с ноября по июль. Разрушение ледового покрова начинается в мае и происходит под воздействием весеннего радиационного прогрева, приливов и ветровых деформаций льда. В июне большая часть крупных заливов и основные проливы Шантарского архипелага заняты мелкобитым подвижным льдом, распределение которого позволяет регистрировать поверхностные проявления субмезомасштабных процессов. Приливные явления на шельфе Шантарских островов определяются в основном главной лунной полусуточной приливной волной M2, имеющей период 12.4 ч. Приливо–отливные колебания уровня в заливах составляют 5–8 м, скорости приливных течений в проливах между островами могут достигать значений 2 м/с. В относительно короткий теплый период морская акватория Шантарского архипелага отличается очень высокой биологической продуктивностью и биоразнообразием. В настоящее время здесь функционирует национальный парк России “Шантарские острова”, созданный с целью сохранения уникальных природных морских и наземных экосистем.

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ ДОРОЖКИ В ПРОЛИВЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ

В Северо-Восточном проливе две ВД формируются при взаимодействии сильного приливного потока со скалами Камни Диомида и с Безымянной группой скал (рис. 2). По данным спектрорадиометра MODIS можно получить общее представление об изменчивости вихревых дорожек в приливном цикле. Во время отлива течения в

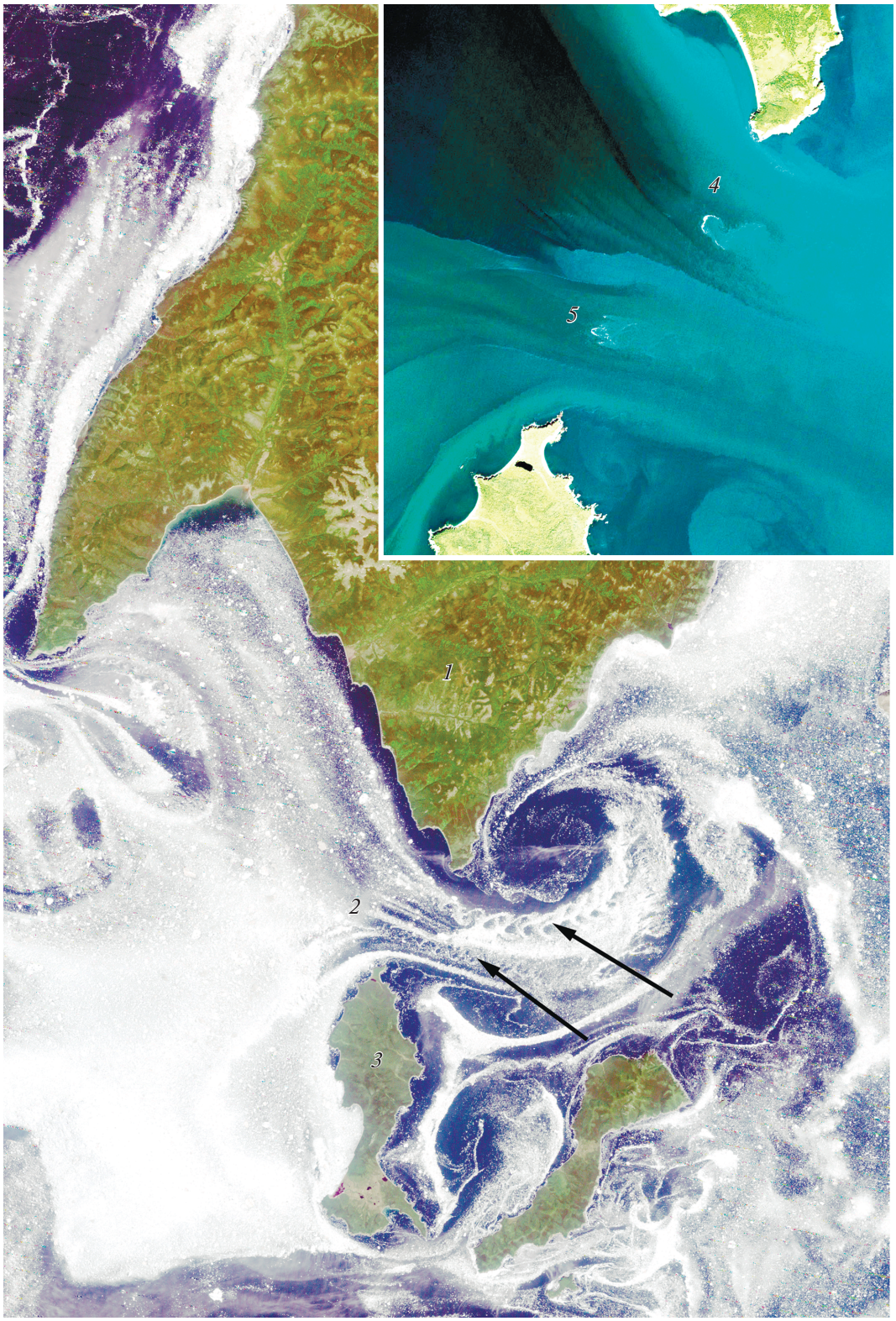

Рис. 1. Спутниковое изображение центральной части Шантарского архипелага (спутник Landsat-7, 11 июля 2005 г.) и два скалистых острова в проливе Северо-Восточный (вставка, спутник Sentinel-2A, 10 августа 2016 г.). Условные обозначения: *1* – о. Большой Шантар, *2* – пролив Северо-Восточный, *3* – о. Малый Шантар, *4* – о. Камни Диомида, *5* – Безымянная группа скал. Стрелками показано положение вихревых дорожек (отлив).

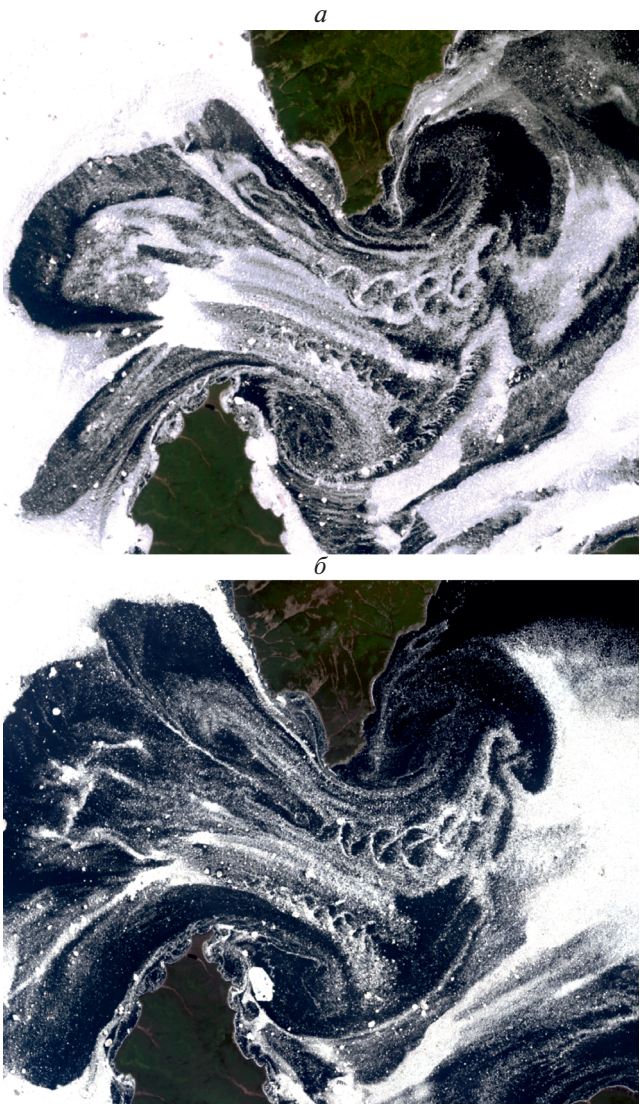

Рис. 2. Вихревые дорожки в проливе Северо-Восточный на спутниковых снимках, полученных 12 июня 2012 г. (*а*, Landsat-7) и 2 июня 2017 г. (*б*, Landsat-8).

проливе направлены с запада на восток, вихри в дорожках вытянуты, соответственно, в восточном направлении (рис. 2, *а*). Вихревые структуры северной вихревой дорожки (Камни Диомида) отклоняются влево по мере удаления от препятствия. Пары вихрей южной ВД (Безымянная группа скал) распространяются прямолинейно. При смене направления течений на противоположное (отлив-прилив) в поле мелкобитого морского льда наблюдается разрушение вихрей. Во время прилива в Северо-Восточном проливе наблюдаются течения западного направления. В этот период ВД вытянуты в западном направлении. К западу от пролива наблюдается более сплоченный лед, поэтому на спутниковых изображениях спектрорадиометра MODIS (не показаны) пары вихрей в дорожках выражены менее отчетливо.

Данные дистанционного зондирования в видимом диапазоне, полученные со спутников Landsat 7 и 8, позволяют в деталях рассмотреть двумерную пространственную структуры ВД в поле мелкобитого дрейфующего льда (рис. 1, *б* и рис. 3). Время получения спутниковых данных приблизительно соответствует времени наступления малой воды на о. Малый Шантар (максимальные скорости течения во время отлива). Дорожка у Камней Диомида имела в длину 9–11 км и состояла из 4–5 пар хорошо выраженных вихрей противоположного знака вращения. Антициклоны располагались на северной, циклоны – на южной стороне дорожки. Наибольшее количество пар вихрей в дорожке по данным спектрорадиометра MODIS было равно 7. Средний размер вихрей в этой цепочке, определяемый по диаметру области открытой воды в центре, составлял 0.73 ± 0.09 км, общее количество выделенных вихрей равно 29. Вихри в северной дорожке двигались по периферии циклонического субмезомасштабного запрепятственного вихря, который формируется во время отлива за м. Филиппа (южная оконечность о. Большой Шантар). Это объясняет аномальную траекторию движения вихрей в этой дорожке. Вихри в южной дорожке за группой Безымянных скал распространялись прямолинейно. Длина цепочки вихрей достигала 6–7 км, при этом отчетливо регистрировались 3–5 вихревых пар. Средний диаметр вихрей был равен 0.47 ± 0.07 км. Общее количество выделенных вихрей равно 27. Разница в диаметрах вихрей в северной и южной дорожках связана в основном с различиями в размерах и форме островов.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ ДОРОЖЕК

Из теории вихревых дорожек Кармана следует, что циркуляция в вихревом следе за препятствием остается устойчивой при определенном значении параметров, характеризующих расстояние между вихревыми структурами (von Karman, Rubach, 1912). Условие устойчивости означает, что в пределах ВД завихренность может сохраняться в вихревом следе на значительных расстояниях от препятствия. К основным геометрическим параметрам, характеризующих ВД относятся: расстояние между цепочками вихрей с противоположным знаком вращения – h, расстояние между двумя вихревыми структурами в цепочке – a, ширина препятствия – D (рис. 1, *в* и рис. 4). Из теории следует (von Karman, Rubach, 1912), что для потока невязкой жидкости, обтекающей цилиндр, соотношение h/a равно 0.28. Лабораторные эксперименты показали, что этот параметр

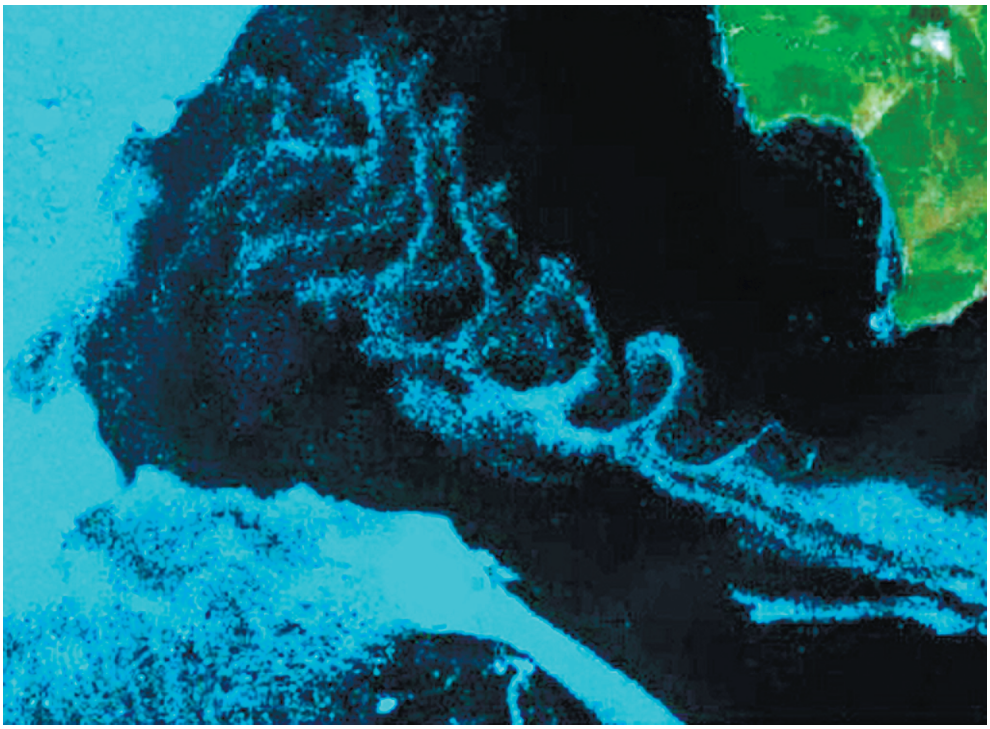

Рис. 3. Вихревая дорожка за о. Камни Диомида в проливе Северо-Восточный. Спутниковое изображение получено 22 мая 2002 г. (ASTER Terra).

зависит от формы препятствия, характеристик потока, расстояния от препятствия и изменяется в диапазоне от 0.28 до 0.52 (Chopra, Hubert, 1965). Безразмерная ширина ВД, которая определяется как h/d, приблизительно равна 1.2 (Wille, 1960).

Для вихревых дорожек в проливе Северо-Восточный центры вихрей определялись как центры внутренней области открытой воды в вихрях. Для северной ВД, которая образуется за скалами Камни Диомида, были получены следующие значения геометрических параметров: расстояние между цепочками вихрей $h = 0.76 \pm 0.06$ км, расстояние между центрами вихрей в цепочке $a = 1.48 \pm 0.19$ км, размер препятствия, определенный по ширине пенного следа за островом $d = 0.44$ км. При этих значениях основной параметр $h/a = 0.51$, безразмерная ширина $h/d = 1.7$.

Для южной ВД у Безымянной группы скал расстояние между цепочками вихрей $h = 0.46 \pm 0.06$ км, расстояние между центрами вихрей в цепочке $a = 1.0 \pm 0.2$ км, размер препятствия по ширине пенного следа за островом $d = 0.26$ км. При этих значениях основной параметр $h/a = 0.46$, безразмерная ширина $h/d = 1.8$.

В проливе Северо-Восточный сильные приливные реверсивные течения со скоростями до 2 м/с направлены преимущественно вдоль оси пролива, при этом стратификация разрушена за счет приливного перемешивания. Поэтому наблюдаемые различия параметров ВД, рассчитанных для северной и южной дорожек, в основном связаны с размерами и формой препятствий. Полученные значения основного параметра h/a, определяющего устойчивость ВД, отличаются от теоретического значения, полученного Карманом для невязкой жидкости (0.28), но попадают в интервал значений, полученный при проведении лабораторных экспериментов (0.28–0.52). Значения безразмерной ширины практически не отличаются для южной и северной цепочек, но превышают теоретическое значение 1.2. Это показывает, что основные результаты, полученные в ходе теоретических и лабораторных исследований при помощи теории подобия можно использовать для изучения океанических ВД. В случае атмосферных ВД (Young et al., 2008) типичные значения геометрических параметров были определены как 0.42 для соотношения характерных размеров

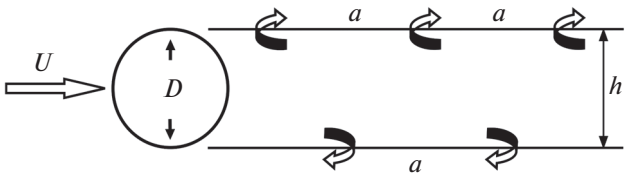

Рис. 4. Геометрические параметры вихревой дорожки Кармана.

h/a и 1.61 для безразмерной ширины h/d. Классические ВД исследовались в лабораториях как двухмерные структуры. Различия в геометрических параметрах, полученных в лабораторных экспериментах и в реальных геофизических ситуациях, показывают, что структура ВД зависит от внешних условий, таких как трехмерная форма препятствия, скорость потока, вязкость, масштабы движения и стратификация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования, полученные в видимом диапазоне со спутников Terra, Aqua и Landsat-7, 8, показали, что в проливе Северо-Восточный Шантарского архипелага регулярно наблюдаются две субмезомасштабные ВД. Вихревые структуры формируются при взаимодействии сильных приливо-отливных течений с небольшими скалистыми островами, расположенными в этом проливе. Положение и горизонтальная протяженность вихревых структур значительно изменяются в приливном цикле. По спутниковым данным выполнены оценки основных геометрических параметров, характеризующих устойчивость ВД. Средний диаметр субмезомасштабных вихрей в северной дорожке, которая наблюдалась вблизи острова Камни Диомида, составлял 0.73 км, в южной дорожке (Безымянная группа скал) – 0.47 км. Значения геометрических параметров океанических ВД попадают в диапазон значений, полученных в результате лабораторных исследований вихревых дорожек Кармана. Различия в диаметрах вихрей и геометрических параметрах северной и южной вихревых дорожек в основном связаны с размерами и формой препятствий, а не с океанографическими условиями (скорость приливного потока и вертикальная стратификация). Вихревые следы за островами могут оказывать влияние на перенос биогенных элементов, загрязняющих веществ и планктона на морской акватории национального парка “Шантарские острова”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жабин И.А., Лукьянова Н.Б., Дубина В.А. Структура и динамика вод морской акватории национального парка “Шантарские острова” по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 5. С. 3–14.

Левин В.А., Алексанина М.Г., Дьяков С.Е., Еременко А.С., Казанский А.В. Исследование дорожек в облачности за Курильскими островами // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. № 4–1(36). С. 106–115.

Batchelor G.K. An introduction to fluid dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1967. 615 p.

Chopra K.P., Hubert L.F. Mesoscale eddies in wakes of islands // J. Atmos. Sci., 1965. V. 22. P. 652–657.

Delandmeter P., Lambrechts J., Marmorino G.O. et al. Submesoscale tidal eddies in the wake of coral islands and reefs: satellite data and numerical modelling// Ocean Dynamics. 2017. V. 67. № 4. P. 897–913.

Etling D. On Atmospheric Vortex Streets in the Wake of Large Islands // Meteorol. Atmos. Phys. 1989. V. 41. P. 157–164.

Hubert L.F., Krueger A.F. Satellite pictures of mesoscale eddies // Mon. Wea. Rev., 1962. V. 90. P. 457–463.

Mitnik L., Dubina V. The Sea of Okhotsk: Scientific Applications of Remote Sensing. In: Remote Sensing of the Asian Seas. Springer. 2019. P. 159–175.

von Kármán T., Rubach H. Über den mechanismus des flüssigkeits—und luftwiderstandes. Phys. Z. 1912. 13. P. 49–59.

Wille R. Karman vortex street // Adv. Appl. Mech. 1960. V. 6. P. 273–287.

Wolanski E. Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier Reef. Boca Raton: CRC Press, 2018. 208 p.

Young G., Zawislak J. An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets // Mon. Wea. Rev., 2006. V. 134. P. 2285–2294.

Zheng Q., Lin H., Meng J., Hu X., Song T., Zhang Y., Li C. Sub-mesoscale ocean vortex trains in the Luzon Strait // J. Geophys. Res., 2008. V. 113. P. C04032.

Satellite Remote Sensing of Submesoscale Vortex Streets in the Shantar Islands Region of the Sea of Okhotsk

I. A. Zhabin[1] and N. B. Luk’yanova[1]

[1]*V. I. Il’ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia*

This study uses the visible MODIS Terra/Aqua and ETM+ Landsat-7/ OLI Landsat-8 images to illustrate the ocean submesoscale vortex streets (VS) in the Shantar Islands region of the Sea of Okhotsk. Two VSs (“northern” and “southern” VSs) that occurred in the North-Eastern Strait located between Bolshoy (Large) Shantar and Malyy (Small) Shantar Islands are observed. Northern VS was formed near the Diomid’s Stones Island, southern VS was registered near Anonymous group of rocks. Northern VS had in length of 9–11 km and consisted of 4–5 pairs of cyclonic-anticyclonic vortices. Mean diameter of vortex was equal (0.73 ± 0.09) km. Vortices in the southern street extended to distance of 6–7 km, at the same time 3–5 vortex pairs were registered. Mean diameter of vortex was equal (0.47 ± 0.07) km. During ebb tide all vortices generally propagate eastward, during flood tide the direction changed on western. Spatial and temporal scales implying that both vortex and vortex train observed in the North-Eastern Strait have a submesoscale nature. Remote sens-

ing data are used to extract geometrical parameters characterizing stability of oceanic VS. These measurements and calculations are used to test the applicability of existing similarity theory to oceanic vortex street geometry. Values of parameters of oceanic VS are compared to the results received in laboratory experiments and to characteristics of vortex trains in the atmosphere.

Keywords: Von Karman vortex street, submesoscale eddies and structure, parameters of oceanic eddy trains, remote sensing data, the Shantar Islands, the Sea of Okhotsk

REFERENCES

Batchelor G.K. An introduction to fluid dynamics, Cambridge, England: Cambridge University Press, 1967. 615 p.

Chopra K.P., Hubert L.F. Mesoscale eddies in wakes of islands. J. Atmos. Sci. 1965. V. 22. P. 652–657.

Delandmeter P., Lambrechts J., Marmorino G.O. et al. Submesoscale tidal eddies in the wake of coral islands and reefs: satellite data and numerical modelling, Ocean Dynamics. 2017. V. 67. № 4. P. 897–913.

Etling D. On Atmospheric Vortex Streets in the Wake of Large Islands, Meteorol. Atmos. Phys., 1989. V. 41. P. 157–164.

Hubert L.F., Krueger A.F. Satellite pictures of mesoscale eddies. Mon. Wea. Rev. 1962. V. 90. P. 457–463.

Levin V.A., Aleksanina M.G., Dyakov S.E. et al. Issledovanie dorozhek v oblachnosti za Kuril'skimi ostrovami [Investigation of cloud Karman vortex streets behind the Kuril Islands], Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2018. № 4–1(36). P. 106–115.

Mitnik L., Dubina V. The Sea of Okhotsk: Scientific Applications of Remote Sensing. In: Remote Sensing of the Asian Seas, Springer. 2019. P. 159–175.

von Kármán T., Rubach H. Über den mechanismus des flüssigkeits—und luftwiderstandes, Phys. Z., 1912, 13, P. 49–59.

Wille R. Karman vortex street. Adv. Appl. Mech. 1960. V. 6. P. 273–287.

Wolanski E. Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier Reef, Boca Raton: CRC Press, 2018. 208 p.

Young G., Zawislak J. An observational study of vortex spacing in island wake vortex streets, Mon. Wea. Rev., 2006. V. 134. P. 2285–2294.

Zhabin I.A., Luk'yanova N.B., Dubina V.A. Struktura i dinamika vod morskoi akvatorii natsional'nogo parka "Shantarskie ostrova" po dannym sputnikovykh nablyudenii [The water structure and dynamics of the Shantar Islands National Park aquatory (the Sea of Okhotsk) according to satellite data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 5. P. 3–13.

Zheng Q., Lin H., Meng J., Hu X., Song T., Zhang Y., Li C. Sub-mesoscale ocean vortex trains in the Luzon Strait. J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. C04032.