УДК 532.5:534.143

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН СУБМЕЗОМАСШТАБНЫМ ВИХРЕМ В РАЙОНЕ МОЗАМБИКСКОГО ПРОЛИВА

© 2022 г. Е. А. Марчук^{а,} *, И. П. Чунчузов^{а,} **, И. А. Репина^а, У. М. Йоханнессен^b

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжёвский переулок, 3, Москва, 119017 Россия ^bНаучное общество Нансена, Берген, 5006 Норвегия

*e-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru **e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com Поступила в редакцию 06.05.2022 г. После доработки 05.08.2022 г. Принята к публикации 11.08.2022 г.

В статье исследуется возможный механизм возникновения спиралевидных структур вокруг субмезомасштабного вихря (число Россби $Ro \sim 5$), обнаруженного 22 сентября 2017 г. с помощью анализа PCA-снимка (Sentinel-1A) района океана вблизи Мозамбикского пролива в Африке. Приводится модельный расчет формы волновых линий постоянной фазы (гребней) захваченных внутренних волн в устойчиво-стратифицированном слое термоклина океана, генерируемых движущимися турбулентными неоднородностями плотности и скорости течения внутри вихря. Формы расчетных волновых линий постоянной фазы внутренних волн сравниваются с формой спиралевидных полос на снимке вихря для подтверждения гипотезы авторов о том, что вихри могут генерировать внутренние волны. Анализируются также параметры (вариации интенсивности отраженного радиолокационного сигнала, их спектры и горизонтальные периоды) полосатой спиралевидной структуры и для второго субмезомасштабного вихря диаметром порядка 5 км, обнаруженного на снимке от 25 сентября 2017 г. и имеющего противоположное направление циркуляции течения внутри вихря по сравнению с течением внутри вихря на снимке от 22 сентября 2017.

Ключевые слова: вихреобразование, субмезомасштабные вихри, внутренние волны, волновые линии

DOI: 10.31857/S0002351522060104

1. ВВЕДЕНИЕ

Внутренние волны в океане оказывают существенное влияние на его циркуляцию и перемешивание [1-4]. Одним из малоизученных источников внутренних волн, наряду с другими источниками, такими как нестационарное обтекание приливным течением топографии дна, флуктуации атмосферного давления, фронты океанических течений, являются вихри в океане.

Несмотря на то, что численному моделированию генерации внутренних и инерционно-гравитационных волн вихрями с разными пространственными масштабами и структурой (эллиптические, дипольные и монопольные вихри) посвящено немало работ [4–9], в настоящее время имеются только единичные случаи наблюдения генерации внутренних волн вихрями [10–11]. Именно поэтому, анализ и интерпретация спутниковых снимков и обнаружение на них вихрей одновременно с внутренними волнами в разных частях океана актуальны с точки зрения выяснения реального механизма генерации внутренних волн вихрями и определения связи параметров внутренних волн (длин волн, формы гребней и их фазовой скорости распространения) с параметрами течения самого вихря (масштаб, азимутальная скорость течения и ее сдвиги).

В последнее время интенсивно изучается влияние так называемых спиральных вихрей на динамику океана, однако проблема заключается в объяснении их структуры [12–14]. Манк в [12] показал, что изначальная неустойчивость горизонтального сдвига вихревого течения приводит в конечном итоге к образованию цепочки вихревых структур течения типа "кошачьих глаз" со спиралевидными линиями тока, напоминающих систему спиральных вихрей, обнаруживаемых на спутниковых снимках. Сами линии тока получались из решений уравнений движения несжимаемой, невращающейся (параметр Кориолиса f = 0) или вращающейся (f не равен нулю) жидкости, но с постоянной плотностью. Следует заметить, что из-за отсутствия в модели Манка устойчивой стратификации плотности жидкости [12], свойственной реальному океану, в ней не возникала генерация внутренних волн.

В [13] авторы показали, что часто наблюдаемые на спутниковых снимках циклонические спиральные вихри с масштабами порядка 10 км, могут возникать в результате развивающейся бароклинной неустойчивости циклонических течений. Путем численного моделирования возникновения таких вихрей, они показали связь их структуры с полосами сильных циклонических слвигов и конвергенции течения. По мере усиления наиболее неустойчивой волны образуется узкая фронтальная зона сильного циклонического сдвига и конвергенции, усиливающаяся к поверхности океана. При достижении этой волной нелинейного режима, она закручивается, создавая спиральный вихрь с соответствующим растяжением фронтальной зоны. Пространственные и временные масштабы моделируемых в [13] вихрей оказались весьма близкими к соответствующим масштабам наблюдаемых спиральных вихрей.

В ряде работ по численному моделированию генерации спиралевидных структур вокруг вихрей с малым числом Россби, $Ro = V/(Lf) \ll 1$, (V и *L* – характерные скорость и пространственный масштаб течения, f – параметр Кориолиса), вихревое течение в начальный момент времени задавалось в состоянии геострофического равновесия с *Ro* < 0.1, а генерация спиралевидных инерционно-гравитационных волн (при постоянной частоте Брента-Вяйсяля N во всем слое океана) [8] или инерционных волн в однородном океане при N = 0[9] происходила в результате нарушения этого баланса, вызванного нелинейностью уравнений движения стратифицированной и вращающейся среды. Само излучение этих волн носит спонтанный характер и аналогично излучению акустических волн турбулентными вихрями в соответствии с механизмом этого излучения, предложенным Лайтхиллом [5, 9, 15].

В отличие от упомянутых выше работ по численному моделированию генерации спиралевидных вихрей с $Ro \ll 1$, в [11] был предложен механизм генерации внутренних волн субмезомасштабными вихрями с Ro > 1. В этой работе предполагалось, что постоянно существующие турбулентные неоднородности скорости и плотности океанического течения переносятся (из-за адвекции) круговым течением вихря на его пери-

ферии, вызывая при этом нестационарные возмущения радиальной и вертикальной компонент скорости вихревого течения в окрестности этих неоднородностей. Такие возмущения в устойчиво стратифицированном океане приводят к генерации внутренних волн.

Настоящая работа посвящена исследованию связи между параметрами субмезомасштабных вихрей (характерными размерами, азимутальными скоростями) в северной части Мозамбикского пролива в вблизи побережья Африки и характеристиками спиралевидных структур вокруг вихрей, выявленных с использованием РСА снимков, с целью объяснения возможного механизма генерации этих структур и проверки гипотезы о возможности генерации этими вихрями внутренних волн.

2. МЕТОДИКА

Выявление субмезомасштабных вихрей со спиралевидными полосами проводилось по данным PCA-снимков спутника Sentinel — 1 [11]. В качестве района исследования было выбрано восточное побережье Африки от мыса Рас-Хафун (полуостров Сомали) до Мозамбикской котловины. В данной работе будут рассмотрены два случая формирования субмезомасштабных вихрей, генерирующих спиралевидные полосы.

Регион Мозамбикского пролива был выбран не случайно. Изучение базы данных траекторий мезомасштабных вихрей AVISO (https://www.aviso. altimetry.fr/), анимированных данных поверхностных течений в океане и данных гидрофизических (https://www.nasa.gov/topics/earth/ наблюдений features/perpetual-ocean.html) показало наличие мезомасштабных антициклонических вихрей (диаметром до 300-350 км), разделенных субмезомасштабными циклоническими вихрями (диаметром до 10-15 км) в северной части Мозамбикского пролива. Формирование самой вихревой структуры Мозамбикского течения требовало объяснения и изучалось в [16-17]. Многолетние гидрологические наблюдения долгоживущих мезомасштабных антициклонических вихрей в [17-18], движущихся на юг вдоль западной границы Мозамбикского пролива, и сравнение наблюдений с численным моделированием формирования этих вихрей в [19], позволили описать примерную структуру Мозамбикского течения, изображенную на рис. 1.

Распространение вихрей в Мозамбикском канале моделировалось в [19–21], а их временная изменчивость, перенос и возможные механизмы генерации изучались в [22–28]. В [5] было показа-



Рис.1 (воспроизведен из [19]). Основные океанографические особенности циркуляционной системы Мозамбикского пролива и района вокруг Мадагаскара. Южно-экваториальное течение (SEC), Северо-восточное Мадагаскарское течение (NEMC), Юго-Восточное Мадагаскарское течение (SEMC), Восточноафриканское прибрежное течение (EACC), Южно-Индийское противотечение (SICC), течение мыса Игольного (AC) и квазипостоянные антициклонические вихри Мозамбикского пролива (MZ). Стрелки указывают направление потока. Циклические особенности представляют поле вихрей, по часовой стрелке для циклонических вихрей и против часовой стрелки для антициклонических вихрей. Фоновые контуры показывают изобаты на высотах 200, 1000, 2000 и 4000 м. Батиметрия, заштрихованная серым цветом, имеет глубину менее 200 м [19]. Красным квадратом выделена территория Коморских островов, которая является регионом исследования.

но на примере модели эллиптического вихря, что генерируемые им внутренние волны, уносят его энергию и момент количества движения, тем самым влияя на эволюцию во времени и диссипацию энергии вихревого движения. В то же время, каскадный процесс нелинейных взаимодействий внутренних волн определенных масштабов приводит к генерации волн более малых масштабов и, в конечном итоге, к обрушению волн и генерации мелкомасштабной турбулентности [2–3]. Проводимый ниже анализ механизма генерации внутренних волн вихрями важен для понимания каскадных процессов передачи энергии с помощью внутренних волн от мезомасштабных вихревых движений к мелкомасштабной турбулентности. Эти процессы влияют как на перемешивание океана, так и установление спектра распределения энергии по масштабам этих движений.

На снимке от 22 сентября 2017 г. (рис. 2) виден субмезомасштабный вихрь вблизи сильного течения вдоль островов Нгазиджа и Мохели (Коморские острова). К вихрю (обведен квадратом) примыкает на его периферии периодическая полосатая структура спиралевидной формы (рис. 3). Расстояния между ближайшими спиралевидными полосами растут при удалении от центральной части вихря. Их оценка дает приближенные значения 2, 2.5 и 4 км, а диаметр центральной части



Рис. 2. Снимок (Sentinel-1, 22 сентября 2017 г.) субмезомасштабных вихрей вблизи сильного течения (направление указано стрелкой) вдоль островов Нгазиджа (Ngazidja) и Мохели (Mwali) (Коморские острова). Один из вихрей (внутри квадрата) имеет периодическую полосатую структуру спиральной формы на своей периферии.



Рис. 3. Увеличенный в размере вихрь внутри квадрата на рис. 2. Полосатая структура на его периферии пересечена линией с указанным направлением, вдоль которой получена интенсивность отраженного сигнала в зависимости от расстояния *r* (см. ниже рис. 6, где начальное и конечное значения *r* соответствуют началу и концу показанной стрелки). Средняя светлая полоса, через которую проходит разрез, "расщеплена" на несколько более тонких светлых и темных полос, чередующихся с периодом порядка сотни метров и являющихся возможным проявлением внутренних волн. Чередующиеся темные и светлые полосы видны также и справа от центральной части вихря.

вихря составляет примерно 4 км. На одной из светлых спиралевидных полос, через которые проходит разрез на рис. 3, именно на средней полосе, заметно "расщепление" этой полосы на более тонкие светлые и темные полосы, чередующиеся с периодом порядка 100 м. Мы предполагаем, что эти тонкие светлые и темные полосы являются проявлением внутренних волн. На других светлых полосах, через которые проходит разрез, такое "расщепление" неразличимо. Однако, на вариациях интенсивности отраженного радиолокационного сигнала вдоль разреза, показанных ниже на рис. ба, видно, что крупномасштабные колебания интенсивности с периодами порядка нескольких км, связанные с широкими спиралевидными полосами, содержат мелкомасштабные колебания с периодами порядка сотни метров. Справа от центральной части вихря на рис. 3 тоже заметно чередование светлых и темных полос с периодом порядка нескольких сотен метров, которое мы тоже считаем возможным проявлением внутренних волн.

С целью поиска четких проявлений вихрей и определения их границ мы использовали методологию, описанную в статье [29] и методику выделения вихрей на поверхности океана, разработанную в работах [30, 31], которая заключалась в следующем:

 поиск и визуальное выделение на поверхности океана спиралевидных структур в виде чередующихся темных и светлых полос, которые продолжаются также и за условными границами центральной части вихря;

 – если спиралевидную структуру можно вписать в эллипс или круг, то она определялась, как принадлежащая вихрю;

 – определялись два диаметра центральной части вихря (максимальный и минимальный) и их средний (средне-арифметический) диаметр.

Проводившиеся в разные годы (с 1996 по 2000 гг.) измерения скорости течения в зависимости от времени на разных глубинах океана (до 250 м) в регионе Мозамбикского пролива обнаруживали повороты вектора скорости течения при прохождении антициклонных вихрей через датчики измерений [28]. Как следует из рис.7 и 8 в [28], при таких поворотах вектора скорости временные изменения компонент скорости относительно их средних значений лежали в интервале 0.1–1 м/с.

Следует заметить, что исследуемые вихри находятся вблизи экватора на широтах (12°- 12.5° ю.ш.), для которых параметр Кориолиса f = $= (3.0-3.2) \times 10^{-5}$ рад/с, поэтому оценка числа Россби для вихревого течения с радиусом L=2 км и азимутальной скоростью V = 0.3 м/с дает значения Ro = V/(Lf) = 4.5-5. Подобные субмезомасштабные вихри с Ro > 1 и полосатой структурой спиралевидной формы наблюдались в разных частях океана [32]. Пространственная структура течения в одном из таких вихрей подробно анализировалась с помощью его инфракрасного снимка в [32]. Восстановленная в [32] азимутальная скорость течения достигала на периферии вихря значений 0.3-0.4 м/с. Возможный механизм генерации спиралевидных полосатых структур вокруг субмезомасштабного вихря был дан в [11]. В последней работе учитывалось, что реальное вихревое течение является изначально турбулентным и содержит случайные неоднородности скорости течения, температуры и плотности разных горизонтальных и вертикальных масштабов. Адвекция этих неоднородностей круговым течением вихря с азимутальной скоростью, зависимой от расстояния от центра вихря, вызывает нестационарные возмущения в радиальной компоненте скорости течения вблизи периметра вихря, где азимутальная скорость максимальна, и вертикальные смещения частиц среды в тонком слое высокой статической устойчивости вблизи поверхности океана (термоклине). Эти нестационарные смещения в ограниченной области устойчиво-стратифицированной среды, окружающей движущуюся неоднородность, приводят к генерации внутренних волн, расходящихся от этой области.

Если азимутальная скорость течения превышает фазовую скорость внутренних волн, то внутренние волны расходятся от движущегося источника подобно тому, как корабельные волны расходятся от движущегося корабля. Таким образом, в [11] было показано, что спиралевидные полосы вокруг вихря могут быть следом на поверхности океана спиралевидных гребней внутренних волн, расходящихся от их источников, движущихся вместе с круговым вихревым движением. Изложенный выше механизм генерации внутренних волн будет применен в настоящей статье для объяснения возникновения спиралевидных полос вокруг субмезомасштабного вихря в Африке (на рис. 3).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ВОЛНОВЫХ ГРЕБНЕЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ДВИЖУЩИМИСЯ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ПЛОТНОСТИ НА ПЕРИФЕРИИ ВИХРЯ

Круговая циркуляция ограниченных по размеру неоднородностей плотности или температуры внутри вихря на некоторой глубине устойчивостратифицированного океана генерирует след в виде гребней внутренних волн. При прямолинейном движении источника (неоднородности с более высокой плотностью по сравнению со средней плотностью окружающей среды) со скоростью, например, V = 0.3 м/с, которая предполагается превышающей фазовые скорости внутренних гравитационных мод в термоклинном волноводе (это предположение всегда справедливо при толщине слоя термоклина порядка 10 м и типичной частоте Брента-Вяйсяля в этом слое (см. [11]), формы волновых линий (гребней или ложбин) этих мод, подобны форме корабельных поверхностных волн от движущегося корабля (рис. 4а). Уравнения, описывающие форму линий постоянной фазы в трехслойной модели океана, исходящих от источника, движущегося по круговой траекто-



Рис. 4. (а) Формы волновых гребней от движущегося влево твердого тела в стратифицированном океане на глубине слоя термоклина; (б) Зависимость расстояния от центра вихря до волновых гребней от азимута (teta) и (в) Увеличенный фрагмент (квадрат) волновых линий, показывающий отдельные гребни с интервалом между ними (локальной длиной волны) порядка 100 м.

рии, были получены в [11] и приведены ниже в Приложении.

Гребни волн на рис. 4а (показано только три гребня) формировались в течение всего периода времени движения источника влево (32.4 ч), от начала его движения до момента прихода в точку x = 0 (начало координат).

Расчет линий постоянной фазы волн на рис. 4. проводился для трехслойной модели стратификации океана со скачком плотности на глубине слоя термоклина океана [11]. При круговом-же движении неоднородностей, на периферии вихря с максимальной азимутальной скоростью V = 0.3 м/с на расстоянии R = 1 км от его центра, форма гребней

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 6 2022



Рис. 5. Расчет формы волновых линий от движущегося источника внутренних волн с азимутальной скоростью V = 0.3 м/с на расстоянии r = 1 км от центра вихря (вверху) и сравнение расчетной формы волновых линий со спиралевидной полосатой структурой вихря на снимке (внизу).

становится спиралевидной (см. рис. 46, в и рис. 5 вверху). Расстояние от центра вихря до витков спирали, где каждый виток содержит несколько гребней волны с локальной длиной волны ~100 м, показанных на рис. 4в, растет с увеличением углового расстояния (teta), пройденного неоднородностями за весь промежуток времени от начала движения. При этом растет расстояние между витками спирали, образующимися при последовательных полных оборотах источника по круговой траектории. Этот рост объясняет рост интервала между полосами спиралевидной структуры на снимке (рис. 5, внизу), которую мы совместили с расчетными волновыми линиями (сплошные линии). Отношение расстояния между последовательными витками спирали к их расстоянию от центра характеризуется параметром спиральности (см. формулу (3) и рис. 3 в [14]).

Следует отметить, что светлые полосы в правой верхней четверти изображения вихря на рис. 3 и 5 (внизу) имеют скорее форму прямых, а не спиралевидную форму. Это отличие, возможно, связано с наличием внешнего неоднородного течения, показанного стрелками на рис. 2, которое вызывает дифференциальную адвекцию разных частей вихревой структуры, деформируя его форму. Это влияние мы не учитывали в модели. В отличие от рассматриваемого вихря с циклонической циркуляцией течения внутри него, большинство субмезомасштабных вихрей на южных широтах, описанных в [25], были антициклоническими.

В приведенных выше расчетах волновых линий азимутальная скорость $V \sim 0.3$ м/с была выбрана, исходя, во-первых, из типичных скоростей течения V = 0.1-0.4 м/с внутри субмезомасштабного вихря в [32], восстановленного из IR снимка вихря; во-вторых, из диапазона изменений проекций вектора скорости течения 0.1-1 м/с при его поворотах в периоды прохождения вихрей через сеть измерений скорости течения вблизи Мозамбикского пролива [28], и, в третьих, при скорости в 0.3 м/с достигается удовлетворительное согласие формы и параметров моделируемой и наблюдаемой на снимке спиралевидной структуры вихря.

Чтобы оценить масштабы пространственных вариаций волнового поля в зависимости от расстояния r вдоль линии разреза на рис. 3, поперечной к полосатой спиралевидной структуре вихря, мы получили зависимость интенсивности отраженного сигнала W(r) (рис. 6а) и горизонтальный спектр сигнала W(r) (рис. 6б). Обращает на себя внимание наличие квазипериодических вариаций W(r) на рис. 6а с максимумами на расстояни-



Рис. 6. Зависимость интенсивности отраженного сигнала W(r) от расстояния *r* вдоль линии разреза на рис. 3, поперечной к полосатой спиралевидной структуре вихря (а) и горизонтальный спектр сигнала W(r) (б), где $f = K/(2\pi)$, *K*-горизонтальное волновое число.

ях *г* примерно 100, 1500 и 2800 м, и минимумами на расстояниях 500, 2400 и 3900 м. Средний период этих вариаций порядка 1500 м. Однако, видны также квазипериодические вариации с гораздо более короткими периодами, которые можно обнаружить на спектре вариаиций W(r) на рис. 6б. Спектр показывает наличие спектральных максимумов при $f_1 = 0.0003 \text{ m}^{-1}, f_2 = 0.0006 \text{ m}^{-1},$ где $f = k/(2\pi)$, а k – горизонтальное волновое число. Наблюдаемые спектральные максимумы соответствуют горизонтальным масштабам 3 и 1.6 км, и сравнимы по величине с измеренными нами расстояниями между полосами спиралевидной структуры на изображении вихря. Кроме того, имеется максимум на высокой частоте f $n = 0.008 \text{ m}^{-1}$, которому соответствует масштаб в 125 м, близкий к интервалу между соседними гребнями внутренних волн (на рис. 4в). Полученное нами согласие расчетной формы волновых линий внутренних волн и спиралевидной полосатой структуры на снимке говорит об адекватности разработанной нами модели генерации этой структуры.

В спектре (рис. 6б) имеются также другие спектральные максимумы, например, на комбинационной частоте $f_3 = f_1 + f_2 = 0.0009 \text{ м}^{-1}$ и других комбинационных гармониках с $f_1 = 0.0003$ и $f_2 = 0.0006 \text{ м}^{-1}$. Такие гармоники могут образовываться вследствие нерезонансных нелинейных взаимодействий указанных спектральных компо-



Рис. 7. Снимок субмезомасштабного вихря с диаметром около 5 км (внутри прямоугольника), обнаруженного 25 сентября в 15:28 ч. на широте около 11°30' Ю.Ш. вблизи о. Нгазиджа (Ngazidja) (а) и этот-же вихрь, показанный в увеличенном масштабе (б). Показаны также разрезы (профили 1, 2 и 3) вдоль разных частей спиралевидной полосатой структуры.

нент f_1 , и f_2 вызванных адвективной нелинейностью уравнений движения среды (связанной с нелинейным членом $(\vec{v}\nabla)\vec{v}$ в этих уравнениях). Нерезонансные взаимодействия внутренних волн с горизонтальными длинами волн порядка 100 м и с вертикальными масштабами менее 100 м приводят к каскадному процессу передачи волновой энергии в сторону более малых вертикальных масштабов, на которых происходит обрушение внутренних волн в мелкомасштабную турбулентность [33]. Благодаря процессам обрушения внутренних волн, генерируемых вихрями, эти волны являются некоторым промежуточным звеном в передаче энергии от субмезомасштабных вихрей к мелкомасштабной турбулентности, тем самым внося свой вклад в перемешивание океана.

На основании наших оценок расстояний между спиралевидными полосами на снимке вихря на рис. 3. (порядка 1–3 км) и наличия "расщепления" каждой полосы на более тонкие полосы с

интервалом между ними порядка 100 м (соответствующем частоте $f_n = 0.008 \text{ м}^{-1}$ в спектре W(r), мы предположили, что такая "тонкая" чередующаяся структура полос разных масштабов может возникать в поле генерируемых вихрем внутренних волн и их гармоник, вызванных адвекцией волн переменными сдвигами течения, вызванными самими же волнами. При этом, вызванные волнами и их гармониками периодические вертикальные смещения частиц среды и модуляция концентраций пленочной примеси (сурфактанта) вблизи поверхности океана приводят к соответствующей модуляции подавления капиллярногравитационных волн и чередованию сликов разных масштабов. Заметим, что в модели интенсификации нитевидных структур-филаментов [34], переменные во времени горизонтальные сдвиги скорости течения, деформирующие его, задавались авторами определенным образом в начальном условии. Нелинейная адвекция возмущений



Рис. 8. Зависимости интенсивности отраженного сигнала W(r) от расстояния *r* вдоль линий разреза (профили 1–3) на рис. 76, проведенных через разные части полосатой спиралевидной структуры вихря (а) и соответствующие им горизонтальные спектры сигнала W(r).

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 6 2022

течения приводила с течением времени к усилению его градиентов и интенсификации нитевидных структур. Однако, сами авторы отмечали, что поскольку они рассматривали только отдельные филаменты, у них не было простого объяснения механизма возникновения пространственного интервала между филаментами и периодичности их разделения.

4. СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЙ ВИХРЬ ОТ 25 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Еще один субмезомасштабный вихрь диаметром порядка 5 км был обнаружен на снимке от 25 сентября 2017 г. вблизи о. Нгазинджа на широте около 11°30' ю.ш. (рис. 7а). Этот-же вихрь показан в увеличенном масштабе на рис. 76. Хорошо видна его полосатая структура спиралевидной формы, указывающая на антициклоническое направление циркуляции течения внутри этого вихря, противоположное к направлению течения в вихре на снимке от 22 сентября (на рис. 3 и 5). Показаны также разрезы вдоль разных частей полосатой структуры, для которых построены зависимости интенсивности отраженного сигнала W(r)от расстояния r вдоль линий разреза (рис. 8а) и соответствующие им горизонтальные спектры W(r)(рис. 8б).

Все спектры содержат множественные спектральные максимумы, спадающие по интенсивности при уменьшении горизонтальных масштабов вариаций W(r) от нескольких километров до десятков метров. Вклад в вариации W(r) с периодами в сотни метров могут давать внутренние волны, генерируемые самим вихрем, и спектральные компоненты, образующиеся в результате нелинейных взаимодействий этих волн. Вызванные волнами квазипериодические вариации интенсивности отраженного сигнала W(r) определяются визуально для профиля 2 на рис. 76, а также по соответствующему для этого профиля спектру на рис. 86, содержащему спектральные максимумы на частотах f = 0.004, 0.007 и 0.008 м⁻¹ или периодах в 250, 143 и 125 м, соответственно. Таким образом, проведенный здесь анализ двух снимков субмезомасштабных вихрей указывает на возможность генерации внутренних волн этими вихрями с волновыми гребнями сприралевидной формы вне зависимости от направления циркуляционного течения внутри них (циклонического или антициклонического).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано возможное объяснение механизма возникновения спиралевидных структур вокруг субмезомасштабного вихря (число Россби Ro ~ 5), обнаруженного 22 сентября 2017 г. с помощью PCA-снимка (Sentinel-1). района океана вблизи Мозамбикского пролива в Африке. Показано, что спиралевидная форма полос на снимке вихря и характерные масштабы вариаций интенсивности отраженного сигнала в зависимости от расстояния от центральной части вихря, объясняются формой волновых линий (гребней) внутренних волн, генерируемых в устойчиво-стратифицированном слое термоклина океана турбулентными неоднородностями плотности (или температуры), движущимися вместе с круговым вихревым течением.

Полученный горизонтальный спектр вариаций интенсивности отраженного сигнала W(r) в зависимости от расстояния *г* вдоль линии разреза, поперечной к полосатой спиралевидной структуре вихря, показывает наличие спектральных максимумов на волновых числах $f_1 = 0.0003 \text{ м}^{-1}, f_2 =$ = 0.0006 м⁻¹, соответствующих горизонтальным масштабам 3, 1.6 км. Эти масштабы сравнимы по величине с измеренными нами расстояниями между спиралевидными полосами структуры на изображении вихря. Кроме того, имеется максимум на высокой частоте $f_n = 0.008 \text{ м}^{-1}$, соответствующий масштабу в 125 м, близкому к рассчитанной нами длине волны внутренних волн (порядка 100 м). Полученное согласие расчетной формы линий постоянной фазы внутренних волн с формой спиралевидной полосатой структуры на снимке говорит об адекватности разработанной нами модели генерации этой структуры.

Параметры полосатой спиралевидной структуры были изучены также и для второго субмезомасштабного вихря диаметром порядка 5 км, который был обнаружен на снимке от 25 сентября 2017 г. на широте около 11°30' Ю.Ш. Направление циркуляции течения внутри этого вихря оказалось противоположным направлению течения в вихре на снимке от 22 сентября 2017. Спектральный анализ вариаций интенсивности отраженного сигнала W(r) вдоль разрезов, проведенных через разные части полосатой структуры вокруг вихря, выявил множественные спектральные максимумы, спадающие по интенсивности при уменьшении горизонтальных масштабов вариаций W(r) от нескольких километров до десятков метров. Для одного из разрезов (профиль 2 на рис. 76) периодические вариации интенсивности W(r) с периодами в несколько сотен метров были обнаружены визуально и по спектрам этих вариаций. Вклад в вариации с периодами в сотни метров могут давать внутренние волны, генерируемые самим вихрем, и спектральные компоненты, образующиеся в результате нелинейных взаимодействий этих волн. Проведенный здесь анализ двух снимков субмезомасштабных вихрей указывает на возможность генерации внутренних волн этими вихрями вне зависимости от направления циркуляционного течения внутри них (циклонического или антициклонического).

Данная работа была частично поддержана грантом Российского научного фонда (РНФ) №21-17-00021 (Раздел 2) и частично Научным Обществом Нансена (Раздел 3), которым авторы выражают свою благодарность.

ПРИЛОЖЕНИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ПОСТОЯННОЙ ФАЗЫ ВНУТРЕННИХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВИХРЕМ

Уравнения, описывающие линии постоянной фазы (гребни и впадины волн) для внутренних волн в тонком (по сравнению с длиной волны) устойчиво-стратифицированном слое термоклина, который находится над нижним (придонным) слоем произвольной толщины h_0 , могут быть представлены в следующей параметрической форме [11]:

$$x_{m} = 2\pi m h_{0} F^{2} \cos^{3}(\varphi) [1 - F^{2} \cos^{2}(\varphi) + 2tg^{2}(\varphi)]$$
(A1)

$$[1 - F^{2} \cos^{2}(\varphi)]^{-2}, \quad (m = 1, 2, 3...),$$

$$y_{m} = -x_{m} tg(\varphi) [1 + F^{2} \cos^{2}(\varphi)] [[1 - F^{2} \cos^{2}(\varphi) + (A2) + 2tg^{2}(\varphi)]^{-1}, \quad (-\pi/2 < \varphi < \pi/2),$$

где $F = V/(g\epsilon h_0)^{1/2}$ — число Фруда в нижнем слое океана толщиной h_0 , *m*-номера волновых линий (гребней) в текущий момент времени *t*, отсчитываемый от момента t = 0 начала движения источника влево со скоростью V(рис. 4a), а $\epsilon \equiv -\Delta \rho/\rho$ величина относительного скачка плотности в тонком слое термоклина с максимальной частотой Брента-Вяйсяля N (которая значительно превышает значения этой частоты в приповерхностном и придонном слоях океана).

Для параметров $\varepsilon = 6 \times 10^{-4}$, $h_0 = 100$ м, V = 0.3 м/с, выбранных в [11], число Фруда *F* было равно 0.39. Эти-же значения *V* и *F* были выбраны и в нашем случае для расчета спиралевидных линий постоянной фазы (рис. 5 вверху), так как именно для этих значений были получены расчетые фазовые линии (показанные для m = 100, 101, 102), наиболее близкие по своей форме и параметрам к наблюдаемой спиралевидной полосатой структуре на снимке (рис. 5 внизу).

При переходе от прямолинейного движения волнового источника к его круговому движению со скоростью *V* вдоль круговой траектории радиусом *R* удобно перейти от декартовых координат (*x*, *y*) произвольной точки, расположенной на небольшом расстоянии от периметра окружности, к ее криволинейным координатам (*r*, θ) с помощью следующего преобразования переменных: *r* = *R* + *y*, $\theta = x/R$. Тогда, уравнения (A1) и (A2) фазовых линий $x = x_m(\varphi)$, $y = y_m(\varphi)$, переходят в следующие уравнения в параметрической форме, записанные относительно параметра $\theta_m = x_m/R - yг$ лового расстояния, проходимого источником вдоль круговой траектории за время *t* от начала движения в момент *t* = 0:

$$X(\theta_m) = r\sin\theta = (R + y_m)\sin\theta_m, \qquad (A3)$$

$$Y(\theta_m) = r\cos\theta = (R + y_m)\cos\theta_m.$$
(A4)

Фазовые линии (А3) и (А4) за пределами круговой траектории источника имеют спиралевидную форму (рис. 5 вверху), и для произвольного радиального направления от центра круга локальное расстояние между соседними фазовыми линиями увеличивается с ростом расстояния от него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Eckart C. Internal waves in the ocean // Physics of Fluids. 1961. V. 4. P. 791–799.
- 2. *Munk W.* Internal waves and small scale processes. In Evolution of Physical Oceanography Scientific Surveys in Honor of Henry Stommel. The MIT Press, Cambridge, 1981. P. 264–291.
- 3. *Miropolsky Yu.Z.* Dynamics of the Internal Gravity Waves in the Ocean. Springer-Science+Business Media B.V. 2001. 752 P.
- 4. *Wunsch C. and Ferrari R.* Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans //Ann. Rev. Fluid Mech. 2004. V. 36. P. 284–314.
- Plougonven R., Zeitlin V. Internal gravity wave emission from a pancake vortex: An example of wave-vortex interaction in strongly stratified flows // Phys. Fluids. 2002. V. 14. P. 1259–1268. https://doi.org/10.1063/1.1448297
- Plougonven R., Snyder C. Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different baroclinic life cycles // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. P. 2502–2520.
- Shakespeare C. Spontaneous generation of internal waves // Phys. Today. 2019. V. 72. P. 34–39. https://doi.org/10.1063/PT.3.4225
- Bo Zhao, Zhenhua Xu, Qun Li, Yang Wang, and Baoshu Yin Transient generation of spiral inertia gravity waves from a geostrophic vortex // Phys. Fluids. 2021. V. 33. 032119. https://doi.org/10.1063/5.0039786
- Wang P, Özgökmen T.M. Spiral inertial waves emitted from geophysical vortices // Ocean Modelling. 2016. V. 99. P. 22–42.
- 10. Johannessen O.M., Sandven S., Chunchuzov I.P. and Shuchman R.A.. Observations of internal waves generated by an anticyclonic eddy: a case study in the ice edge

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 6 2022

region of the Greenland Sea // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2019. V. 71 (1).

- Chunchuzov I.P., Johannessen O.M. and Marmorino G.O. A possible generation mechanism for internal waves near the edge of a submesoscale eddy // Tellus a: Dynamic meteorology and oceanography. 2021. V. 73 (1). P. 1–11.
- Munk W., Armi L., Fischer K., and Zachariasen F. Spirals on the sea // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2000. V. 456. P. 1217–1280.
- Eldevik T., and Dysthe K.B. Spiral eddies // Journal of Physical Oceanography. 2002. V. 32. № 3. P. 851– 869.
- Zhurbas V., Väli G., and Kuzmina N. Rotation of floating particles in submesoscale cyclonic and anticyclonic eddies: a model study for the southeastern Baltic Sea // Ocean Sci. 2019. V. 15. P. 1691–1705.
- Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. I. General theory // Proc. Roy. Soc. 1952. A 211. P. 564– 587.
- 16. *Sætre R., da Silva A.J.* The circulation of the Mozambique Channel // Deep Sea Res. 1984. V. 31. P. 508–585.
- 17. Donguy J.R., Piton B. The Mozambique Channel revisited // Oceanol. Acta 1991. V. 14. P. 549–558.
- de Ruijter W.P.M., Ridderinkhof H., Lutjeharms J.R.E., Schouten M. and Veth C. Observations of flow in the Mozambique Channel // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 10. P. 1502.
- Hal I., Backeberg B., Penven P., Ansorge I., Reason C., and Ullgren J.E. Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models // Deep Sea Res. 2014. Part II. V. 100. P. 38–53.
- Backeberg B.C., Bertino L., and Johannessen J.A. Evaluating two numerical advection schemes in HYCOM for eddy-resolving modelling of the Agulhas Current // Ocean Sci. 2009. V. 5. P. 173–190.
- Reason C.J.C., Lutjeharms J.R.E., Hermes J., Biastoch A., Roman R. Interocean exchange south of Africa in an eddy-permitting model // Deep Sea Res. II. 2003. V. 50. P. 281–298.
- 22. van der Werf P.M., van Leeuwen L.J., Ridderinkof H., and de Ruijter W.P.M. Comparison between observations and models of the Mozambique Channel transport: seasonal cycle and eddy frequencies // J. Geophys. Res. 2010. V.115. P. CO2002.
- Biastoch A., Kraus W. The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas Current // J. Phys. Oceanogr. 1999. V. 29. P. 2303–2317.

- Backeber B.C., Reason C. A connection between the South Equatorial Current north of Madagascar and Mozambique Channel. Geophys // Res. Lett. 2010. V. 37. P. L04604.
- 25. Ridderinkhof H., Van der Werf P.M., Ullgren J.E., Van Aken H.M., Van Leeuwen P.J., De Ruijter W.P.M. Seasonal and interannual variability in the Mozambique Channel from moored current observations. J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. C06010.
- 26. Schouten M.W., de Ruijter W.P.M., van Leeuwen P.J., and Dijkstra H.A. An oceanic teleconnection between the equatorial and southern Indian Ocean, Geophys // Res. Lett. 2002. V. 29. № 16. P. 1812.
- Harlander U., Ridderinkhof H., Schouten M.W., and de Ruijter W.P.M. Long-term observations of transport, eddies, and Rossby waves in the Mozambique Channel // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, P. CO2003.
- Schouten M.W., de Ruijter W.P.M., van Leeuwen P.J., and Ridderinkhof H. Eddies and variability in the Mozambique Channel // Deep Sea Res. 2003. Part II. V. 50. P. 1987–2003.
- Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data // J. Geophys. Res. Oceans. 2020. V. 125.
- Митяеина М.И. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- Каримова С.С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 31–47.
- 32. Marmorino G.O., Smith G.B., North R.P. and Burkard B. Application of Airborne Infrared Remote Sensing to the Study of Ocean Submesoscale Eddies // Front. Mech. Eng. 2018. https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00010
- Chunchuzov I. Nonlinear formation of the three-dimensional spectrum of mesoscale wind velocity and temperature fluctuations in stably stratified atmosphere // J. Atmos. Sci. 2018. V. 75. P. 3447–3467.
- McWilliam J.C., Colas F. and Molemaker M.J., Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines // Geophys. Res. Lett., 2009. V. 36. P. L18602.

Study of the Generation Mechanism of Spiral Structures Around Sub-Mesoscale Eddy Near the Mozambique Strait off Africa Detected on Satellite Sentinel-1 Images

E. A. Marchuk^{1, *}, I. P. Chunchuzov^{1, **}, I. A. Repina¹, and O. M. Johannessen²

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, 119017 Russia ²Nansen Scientific Society, Bergen, 5006 Norway *e-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru **e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com

The paper studies a possible mechanism for the formation of spiral structures around sub-mesoscale eddies (Rossby number Ro \sim 5) detected on September 22, 2017 by SAR image (Sentinel-1) of an ocean

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

area near the Mozambique Strait (Africa). We present a calculation of wave crest shapes of internal waves in a stably stratified ocean thermocline layer generated due to the advection by the eddy current of its turbulent density inhomogeneities. The shapes of the calculated internal wave crests compared well with the shape of the spiral bands in the eddy image thereby supporting our hypothesis that eddies can generate internal waves. The parameters (variations of the intensity of the reflected radar signal, their spectra and horizontal periods) of the striped spiral structure are also analyzed for the second sub-mesoscale eddy with a diameter of about 5 km, detected in the image from September 25, 2017 and having the opposite direction of circulation of the current inside the eddy as compared to the current inside the eddy in the image from September 22, 2017.

Keywords: eddy formation, sub-mesoscale eddies, internal waves, wave phase lines