
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ БАЛТИЙСКОГО, ЧЕРНОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

© 2012 г. С. С. Каримова

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва*

E-mail: feba@list.ru

Поступила в редакцию 23.08.2011 г.

В работе проводится анализ субмезомасштабных вихревых структур, обнаруженных на радиолокационных изображениях (РЛИ) Envisat ASAR и ERS-2 SAR в Балтийском, Черном и Каспийском морях в 2009–2010 гг. В результате проведенного анализа были выявлены механизмы, с помощью которых вихревые структуры проявляются на РЛИ указанных морей; определены частота встречаемости вихрей на РЛИ и общее количество вихревых структур; осуществлен статистический анализ пространственного масштаба обнаруженных вихревых образований; исследованы особенности пространственного распространения вихрей, а также их межсезонные различия.

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, спиральные вихри, сдвигово-волновое взаимодействие, радиолокационные изображения, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Балтийское море, Черное море, Каспийское море

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования данной работы являются субмезомасштабные вихревые структуры (СВС). Термин “субмезомасштабный” по отношению к океаническим вихрям был введен сравнительно недавно, поэтому следует пояснить, что же под ним понимается.

Как известно, вихревые структуры с диаметром в единицы километров традиционно относят к категории мелкомасштабных, а с диаметром в десятки километров – к категории мезомасштабных. Границей между ними считается величина бароклинной радиуса Россби, характерная для рассматриваемого бассейна (Костяной и др., 2010). Под СВС подразумеваются мелкомасштабные вихри плюс наименее крупная (до примерно 20 км в диаметре) часть мезомасштабных вихрей. Употребление термина “субмезомасштабный” в данной работе можно оправдать тем, что он достаточно удобен, т.к. в точности характеризует масштаб вихрей, детектируемых на радиолокационных изображениях (РЛИ) рассматриваемых в работе морей.

Субмезомасштабные вихри представляют собой наименее исследованный участок спектра океанических вихрей. Это легко объясняется их труднодоступностью для изучения как контактными методами, так и с помощью спутниковых изображений низкого и среднего пространственного разрешения. В отличие от большинства средств океанографических исследований, спут-

никовые РЛИ предоставляют прекрасные возможности для изучения именно субмезомасштабных вихрей вследствие достаточно высокого пространственного разрешения этих данных и специфики визуализации на них гидродинамических структур.

В данной работе проводится анализ вихрей, обнаруженных на РЛИ Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в 2009–2010 гг. над различными участками акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей. Указанные бассейны в значительной степени различаются по их географическому положению, гидрометеорологическим условиям, особенностям донной топографии и очертаниям берегов, по гидрологическому, гидрохимическому и гидробиологическому режиму вод. Вследствие всех существующих различий в каждом из морей сформировалась специфическая система поверхностной циркуляции. Закономерно предположить, что процессы генерации СВС в исследуемых бассейнах так же обладают своими особенностями. В выявлении этих особенностей и состоит цель данного исследования.

Материал статьи организован следующим образом. Вначале приводятся сравнительный анализ поверхностной циркуляции в исследуемых бассейнах, характеристика используемых данных, а также перечисляются механизмы, благодаря которым гидродинамические структуры могут проявляться на РЛИ. После такой, вводной, части

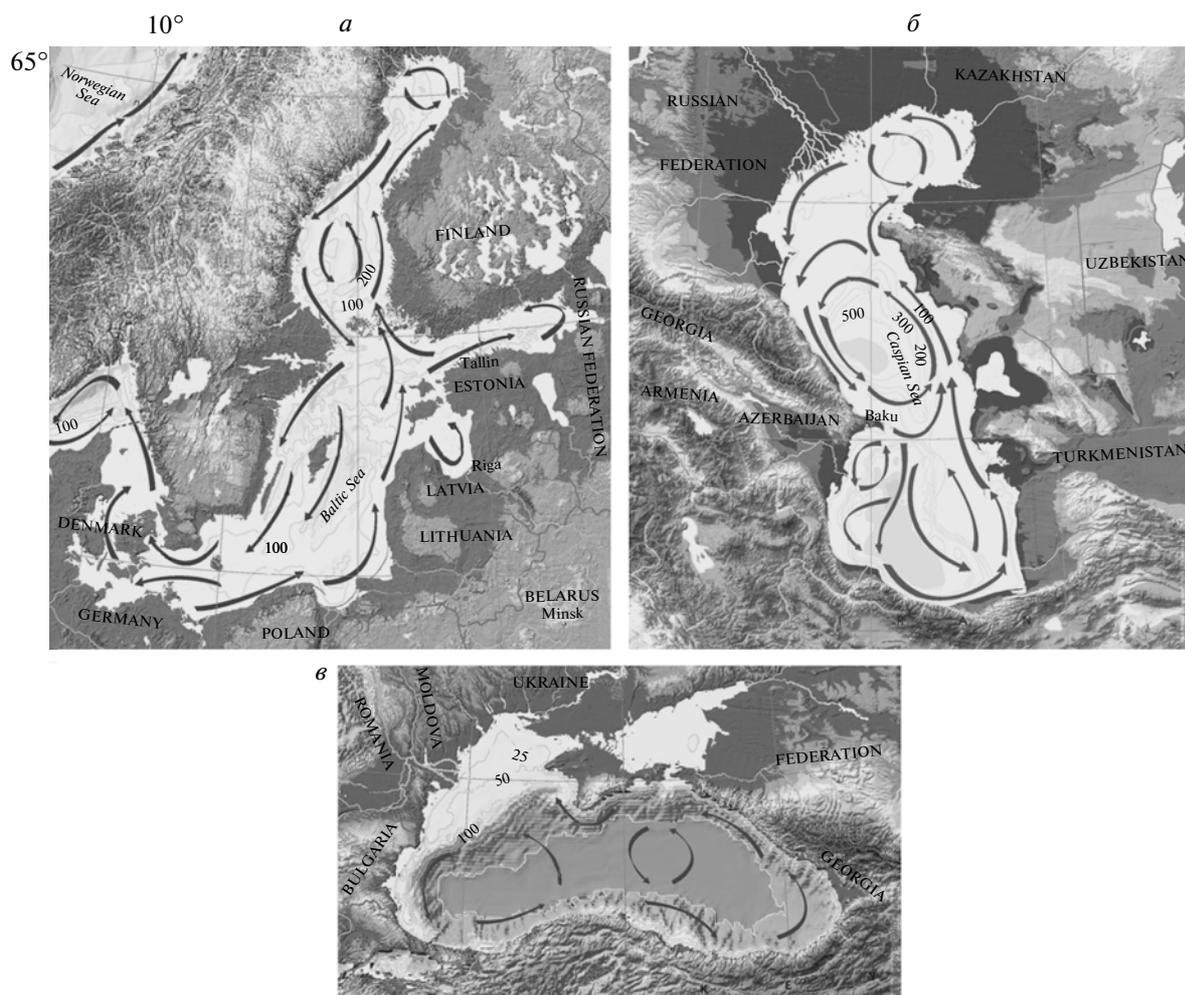


Рис. 1. Схемы поверхностной циркуляции: *а* – Балтийского, *б* – Каспийского и *в* – Черного морей (источник: Европейское агентство по окружающей среде – European Environmental Agency, www.eea.europa.eu).

статьи обсуждаются результаты проведенных наблюдений, т.е. рассматриваются частота встречаемости СВС на проанализированных изображениях, общее количество вихрей, обнаруженных в различных бассейнах, статистические характеристики диаметра вихрей, особенности пространственного распределения вихревых структур. В заключении перечислены основные выявленные закономерности.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ БАЛТИЙСКОГО, ЧЕРНОГО И КАСПИЙСКОГО МОРЕЙ

Особенности береговой и частично донной топографии исследуемых бассейнов показаны на рис. 1. Там же схематично показаны их системы поверхностной циркуляции. Коротко рассмотрим отличительные особенности каждого из бассейнов.

Балтийское море

Балтийское море представляет собой достаточно мелководный (средняя глубина около 55 м) морской бассейн, который характеризуется сложностью очертаний его береговой линии. Вследствие особенностей донной и береговой топографии он подразделен на большое число суббассейнов (рис. 1*а*). Благодаря поступлению большого количества речных вод воды моря устойчиво стратифицированы, что в значительной степени затрудняет перемешивание этих вод.

На формирование поверхностных течений бассейна наибольшее влияние оказывают ветровое воздействие и термохалинные эффекты (Andrejev et al., 2004).

В среднем поверхностная циркуляция моря характеризуется формированием циклонических круговоротов в каждом из суббассейнов (рис. 1*а*). Эта циркуляция подвержена сезонной изменчивости (Lehmann, Hinrichsen, 2000). В частности,

ранней весной, когда ветровое воздействие минимально, интенсивность течений определяется преимущественно бароклинностью вод. Осенью и зимой, при интенсивных западных ветрах, проявляются эффекты экмановской накачки.

Вследствие мелководности и относительной замкнутости суббассейнов на интенсивность течений большое влияние оказывает трение о берега и дно бассейна. Поэтому скорости течений в этом море относительно невелики (Leppäranta, Myrberg, 2009).

При краткосрочном рассмотрении течения на поверхности моря определяются преимущественно ветром. Вследствие частой переменчивости погодных условий определяемые ими течения также непостоянны.

СВС – как циклонические, так и антициклонические – с размерами 5–50 км были обнаружены в различных районах моря. В качестве механизмов их формирования указываются меандрирование основных течений, бароклинная и топографическая их неустойчивость, а также атмосферное воздействие (Leppäranta, Myrberg, 2009).

Таким образом, по сравнению с двумя другими бассейнами, Балтийское море отличается наименьшей глубиной, наибольшим количеством суббассейнов и, как следствие, наиболее слабой и неустойчивой поверхностной циркуляцией. Бароклиновый радиус деформации Россби для этого моря наименьший – 1–10 км (Osiński et al., 2010).

Черное море

Черное море – глубокий водоем (средняя глубина 1253 м) со сравнительно простыми очертаниями береговой линии (рис. 1а). Донная топография морской котловины характеризуется узким шельфом и крутым континентальным склоном практически всюду, кроме северо-западной части моря.

Основная черта поверхностной циркуляции Черного моря – наличие мощного течения, охватывающего всю его периферическую часть и следующего в циклоническом направлении ориентировочно над бровкой шельфа – Основного черноморского течения (ОЧТ). Причины его формирования – бароклинные эффекты, связанные с поступлением речных вод, и циклоническая завихренность поля ветра над бассейном. Как и в случае с циклоническими круговоротами в Балтийском море, ОЧТ подвержено сезонным модуляциям, определяемым интенсивностью ветрового воздействия (Sur, Ilyin, 1997; Zatsepin et al., 2003).

В некоторых работах указывается наличие внутри ОЧТ также двух или трех циклонических субкруговоротов (рис. 1а), но их существование

не было подтверждено дрейферными экспериментами (Poulain et al., 2005).

Черное море отличается также характерной системой формирования СВС. Один из выдающихся элементов этой схемы – так называемые квазистационарные антициклонические вихри. Наиболее устойчивыми и часто наблюдающимися считаются Батумский, Севастопольский и Кавказский антициклоны. Однако спутниковые наблюдения показали, что вместо одного антициклонического вихря в указанных районах, как правило, формируются более сложные вихревые образования – диполи и мультиполюсы (Гинзбург и др., 1996; 1998а, 1998б, 2000а; Каримова, 2011).

Другая характерная группа вихрей – прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), формирующиеся между ОЧТ и берегом вследствие трения, оказываемого последним. Как правило, ПАВ имеют эллипсовидную форму; большая ось таких вихрей расположена примерно параллельно береговой линии. В большинстве случаев формирование ПАВ происходит в районах с наименьшей шириной шельфа, т.е. преимущественно вдоль Кавказского побережья (Каримова, 2008; Каримова, 2011). В работе (Гинзбург и др., 2000б) было показано, что ПАВ могут длительно и стремительно эволюционировать, а также превращаться в вихри открытого моря.

В работе (Каримова, 2011) был проведен анализ нестационарных вихревых структур бассейна, в результате которого было установлено, что наиболее распространенными группами таких вихрей являются вихри Анатолийского побережья, грибовидные течения (вихревые диполи) и вихревые цепочки. Практически все вихревые структуры из перечисленных классов наблюдались в зоне ОЧТ.

Таким образом, из трех рассматриваемых морей Черное море отличается наиболее глубокой котловиной с наиболее простыми очертаниями береговой линии. Отсутствие обособленных суббассейнов приводит к формированию здесь единой циркуляционной системы с мощным кольцевым течением, в зоне которого наблюдается подавляющее число мезомасштабных вихревых структур этого моря. Значения бароклинового радиуса деформации Россби для этого моря оказываются промежуточными по сравнению с другими бассейнами: 15–20 км в открытых частях моря (Журбас и др., 2004) и около 12 км в шельфовых районах (Ginzburg et al., 2000).

Каспийское море

Каспийское море обладает вытянутой в меридиональном направлении котловиной со средней глубиной около 200 м (рис. 1б). На основании

Таблица 1. Количество РЛИ, полученных для различных бассейнов и в разных режимах съемки (в числителе данные для 2009 г., в знаменателе – для 2010 г.)

Море/Режим съемки	Envisat WSM	Envisat IMM	ERS-2 IMM	Всего
Балтийское	261/500	7/15	53/128	321/643
Черное	97/125	156/134	76/100	329/359
Каспийское	147/194	14/28	»	161/222
Всего	505/819	177/177	129/228	811/1224

особенностей строения дна бассейн моря подразделяется на три суббассейна – Северный, Средний и Южный Каспий.

Вследствие мелководности Северного Каспия основным фактором, определяющим характер течений в этой части моря, является ветровое воздействие.

Традиционная схема формирования общей циркуляции в Среднем и Южном Каспии выглядит следующим образом: под влиянием преобладающих ветров северных румбов создается дрейфовый поток вод из северной части моря вдоль его западного берега на юг. Впоследствии этот поток замыкает циклоническую циркуляцию в Среднем Каспии (Добровольский, Залогин, 1982). Циркуляция в Южном Каспии также считается циклонической, но она не столь хорошо выражена, как в Среднем. Между Апшероном и устьем Куры образуется местная антициклональная циркуляция (рис. 1б).

Существуют и альтернативные варианты. Например, в работе (Tuzhilkin, Kosarev, 2005) указывается на существование в Среднем Каспии дипольной системы с циклоническим вихрем в северо-западной части и антициклонической – в юго-восточной. При этом в Южном Каспии, по мнению этих авторов, также формируется диполь, но с противоположным расположением циклонической и антициклонической составляющих.

Скорость и устойчивость дрейфовых течений в средней и южной частях моря изменяются в зависимости от силы и продолжительности ветра и неодинаковы от места к месту. По инструментальным наблюдениям, наиболее значительные скорости (до 80 см/с) отмечаются у западных берегов Среднего Каспия при сильных северных ветрах (Добровольский, Залогин, 1982).

Мезомасштабные вихри в бассейне формируются преимущественно в результате атмосферных воздействий, особенностей донной топографии и очертаний береговой линии (Shipilova, 2000). В качестве важных источников генерации вихревых структур указываются также апвеллинговые процессы (Гинзбург и др., 2006). Так, на фронте апвеллинга часто наблюдаются короткоживущие циклонические вихри с диаметром ~20 км, анало-

гичные наблюдавшимся у м. Херсонес в Черном море (Гинзбург и др., 1998в).

Таким образом, по особенностям донной топографии, числу суббассейнов и устойчивости поверхностной циркуляции из трех исследуемых бассейнов Каспийское море занимает промежуточное положение. Значения бароклинного радиуса деформации Россби для этого бассейна максимальны – 17–22 км в глубоководных районах и 3–8 км в шельфовых (Архипкин и др., 1992).

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

Данная работа основана на анализе РЛИ, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА) ASAR и SAR, установленных на спутниках Европейского космического агентства Envisat и ERS-2 соответственно. В анализе были использованы изображения, полученные в различных частях Балтийского, Черного и Каспийского морей в 2009–2010 гг. Общее количество изображений – свыше 2000. Пространственное разрешение ~150 м.

Распределение изображений по отдельным бассейнам и режимам съемки представлено в табл. 1. Режим WSM (Wide Swath Medium Resolution) характеризуется широкой полосой обзора получаемых изображений, IMM (Image Mode Medium Resolution) – узкой. До изменения параметров орбиты спутника Envisat значения ширины полосы для этих режимов составляли 400 и 100 км соответственно. На данный момент эти значения требуют уточнения.

Как следует из табл. 1, наибольшее количество изображений было получено для Балтийского моря; в 2010 г. к этому морю относилось более половины всех изображений. Кроме того, как можно заметить, подавляющее число этих изображений было получено в широкой полосе обзора, в то время как для Черного моря преобладала узкая полоса.

Чтобы исключить неравномерность поступления РЛИ в различные сезоны как фактора, определяющего внутригодовое распределение обнаруженных вихрей, был произведен анализ сезонного распределения полученных изображений

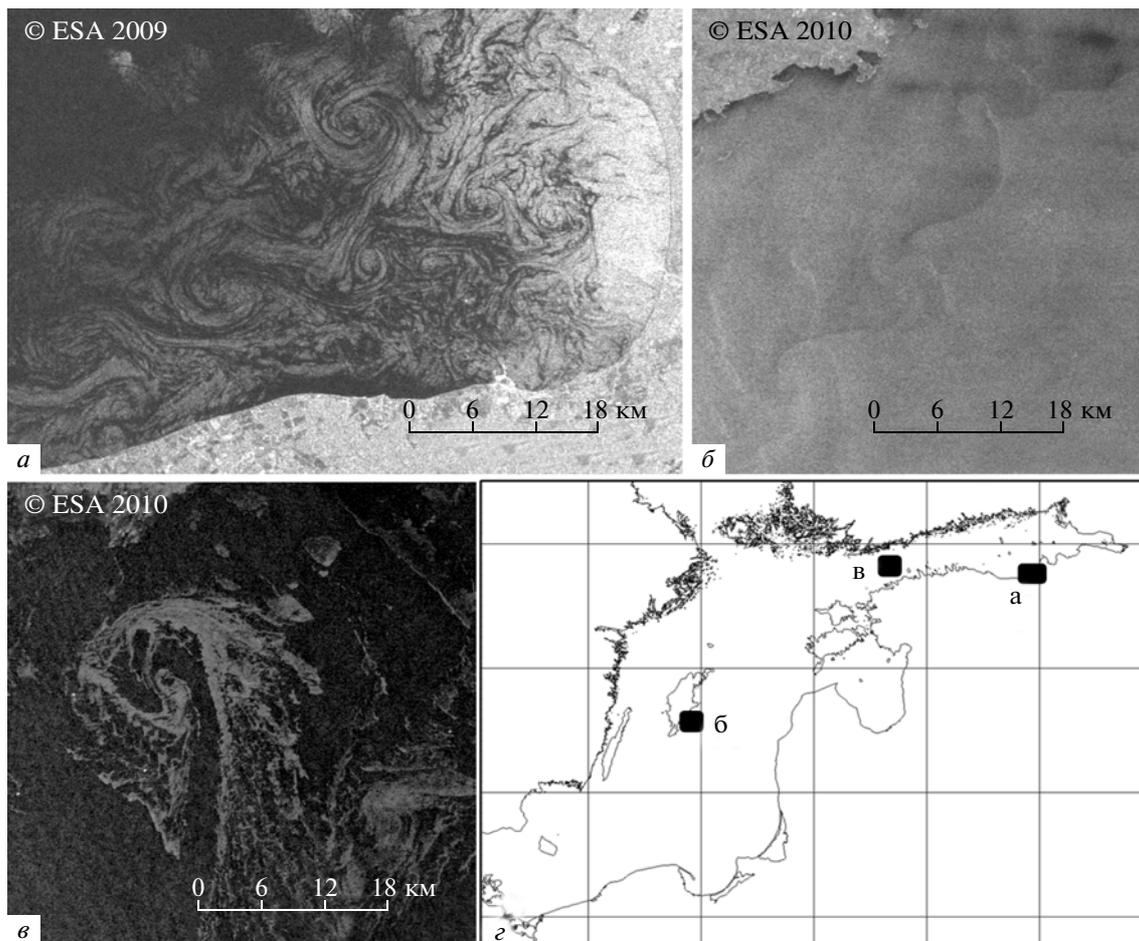


Рис. 2. Проявление на РЛИ Envisat ASAR вихревых структур с помощью различных механизмов: *а* – сликового (РЛИ получено 22.06.2009 г. в 08:47 UTC), *б* – сдвигово-волнового (14.04.2010 г., 20:10 UTC), *в* – ледового (12.01.2010 г., 20:02 UTC); *з* – местоположение представленных фрагментов.

(здесь и в дальнейшем выделение сезонов произведено из гидрологических соображений: к зиме относятся январь, февраль, март; к весне – апрель, май, июнь; к лету – июль, август, сентябрь; к осени – октябрь, ноябрь, декабрь). Проведенный анализ показал, что распределение РЛИ по сезонам можно считать достаточно равномерным.

МЕХАНИЗМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РЛИ

Визуализация гидродинамических структур на РЛИ возможна посредством различных механизмов: сликового, сдвигово-волнового, термического и ледового (Dokken, Wahl, 1996; Johannessen et al., 2005). Наибольшее значение при исследовании гидродинамических структур имеют два первых.

Сливовой механизм обусловлен подавлением гравитационно-капиллярных волн поверхностными пленками естественного происхождения, которые концентрируются в зонах конвергенции,

образуя на поверхности воды нитевидные слики, закручивающиеся в спирали, и таким образом визуализируют структуру вихря (Alpers, Huhnerfuss, 1989; Espedal et al., 1998). Этот механизм функционирует при скоростях ветра 3–5 м/с, при которых короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние РЛ-сигнала, уже появляются, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки (Dokken, Wahl, 1996).

Пример визуализации вихрей с помощью этого механизма представлен на рис. 2*а*. Фрагмент РЛИ на этом рисунке отражает акваторию Нарвского залива; на рис. 2*г* положение представленного фрагмента обозначено буквой “а”.

Для краткости вихри, визуализированные с помощью этого механизма, будут в дальнейшем называться “черные” вихри.

Второй механизм – сдвигово-волновой – обусловлен взаимодействием гравитационно-капиллярных волн и сдвиговых течений и проявляется

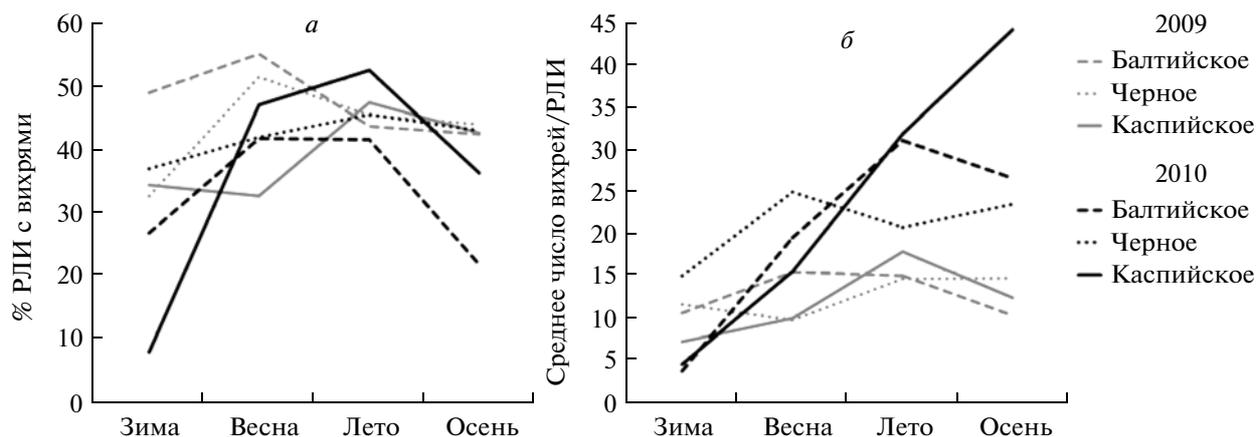


Рис. 3. Межсезонная изменчивость доли РЛИ с обнаруженными вихревыми структурами: *а* – в общем количестве проанализированных РЛИ и *б* – среднего количества вихрей на одном РЛИ с обнаруженными вихревыми структурами.

в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала (Johannessen et al., 1994). В различных случаях этот механизм проявляется по-разному, в зависимости от геометрии съемки, интенсивности сдвигового течения, скорости ветра и пр. (Ivanov, Ginzburg, 2002). Благодаря этому механизму фрагменты вихревых структур могут проявляться на РЛИ при скоростях ветра до 12 м/с (Dokken, Wahl, 1996).

Вследствие повышенного рассеяния сигнала, осуществляемого сдвигово-волновым взаимодействием, эта категория вихрей получила в данной работе краткое название “белые” вихри.

Пример визуализации белых вихрей показан на рис. 2б. Представленная цепочка вихрей была обнаружена к юго-востоку от о. Готланд. Расположение показанного фрагмента обозначено на рис. 2з буквой “б”. Дополнительные иллюстрации проявления белых вихрей на РЛИ различных акваторий Мирового океана можно найти в работах (Fu, Holt, 1982; Ivanov, Ginzburg, 2002; Lavrova et al., 2010; Каримова, 2010).

Ледовый механизм имеет значение только в бассейнах с регулярным образованием ледяного покрова. Из рассматриваемых морей этот механизм вносит вклад только в визуализацию вихрей Балтийского моря. Проявление вихрей с помощью ледовых трассеров продемонстрировано на рис. 2в.

Термический механизм связан с изменением характеристик атмосферного пограничного слоя, а следовательно, и скорости ветра в области гидрологического термического фронта, поэтому этот механизм имеет значение для визуализации более крупномасштабной составляющей гидродинамических структур в океане, нежели те, что рассматриваются в данной работе.

ЧАСТОТА ОБНАРУЖЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РЛИ

Для оценки частоты встречаемости вихрей на РЛИ была определена доля РЛИ с вихревыми структурами в общем числе проанализированных РЛИ. В среднем около 39% всех имеющихся изображений содержало какие-либо проявления вихревых структур. Для Балтийского, Черного и Каспийского морей были получены значения 37.3%, 42.3% и 37.9% соответственно.

Межсезонная изменчивость этого параметра для отдельных бассейнов за 2009 и 2010 гг. может быть отслежена по рис. 3а. Из приведенного графика видно, что в целом для 2009 г. обнаруживаемость вихревых структур была выше, чем для 2010 г.: 44.2% против 35.3% в 2010 г.

В представленном распределении параметра отчетливо прослеживается годовой ход: в весенне-летний период встречаемость вихревых структур выше, чем в осенне-зимний. В среднем, зимой доля РЛИ с обнаруженными вихрями составила 28.0%, весной – 45.2%, летом – 44.1%, осенью – 35.5%.

Также было оценено среднее количество вихрей на одном изображении. При отнесении числа обнаруженных вихрей к числу всех задействованных изображений (среднее I типа) было получено значение 6.7 вихрей/РЛИ. Для Балтийского, Черного и Каспийского морей эти значения составили соответственно 6.4, 6.7 и 7.8 вихрей/РЛИ. Средние значения для отдельных сезонов расположились следующим образом: 9.5 (лето), 7.1 (весна), 6.5 (осень) и 2.5 (зима) вихря/РЛИ.

При отнесении количества вихрей к числу только тех РЛИ, где были обнаружены вихревые структуры (среднее II типа), величина среднего составила 17.7 вихрей/РЛИ. Для Балтийского, Черного и Каспийского морей были получены

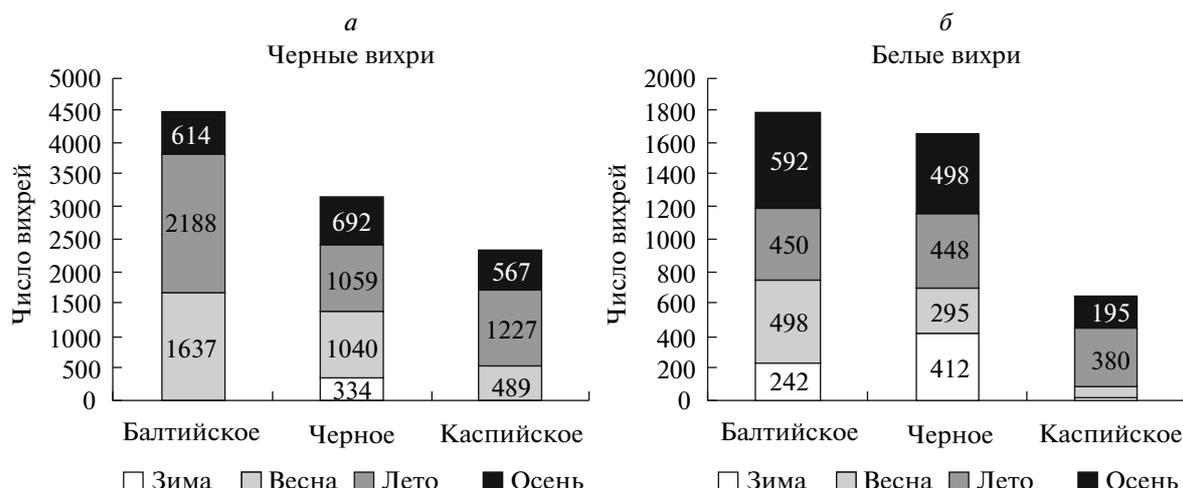


Рис. 4. Распределение обнаруженных вихрей по сезонам: а – черных и б – белых.

значения соответственно 17.1, 15.9 и 20.2 вихрей/РЛИ.

Межсезонная изменчивость среднего II типа для отдельных бассейнов и годов показана на рис. 3б. Несмотря на то что в 2009 г. доля РЛИ с обнаруженными вихрями была выше, чем в 2010 г., при рассмотрении среднего количества вихрей – как первого, так и второго типов – лидирует 2010 г. В 2009 г. среднее II типа составило 12.8, а в 2010 г. – 21.4 вихрей/РЛИ.

При рассмотрении среднего II типа по отдельным сезонам значения расположились следующим образом (в порядке убывания): лето (21.6), осень (18.3), весна (15.8) и зима (8.9 вихрей/РЛИ).

Выявленное понижение доли РЛИ с вихревыми структурами и среднего количества вихрей в зимнее время по сравнению с остальными сезонами объясняется, по-видимому, преобладанием зимой высоких скоростей приповерхностного ветра, препятствующих проявлению на РЛИ каких-либо гидродинамических структур.

ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ОБНАРУЖЕННЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Всего за период 2009–2010 гг. было обнаружено около 14 тыс. вихревых структур. Практически все они (около 98%) обладали циклонической завихренностью.

Анализ распределения обнаруженных вихрей по отдельным бассейнам показал, что число вихрей – как черных, так и белых – в каждом из морей пропорционально количеству проанализированных для этих бассейнов изображений. Такая пропорциональность наряду со сходными значениями среднего количества вихрей на одном РЛИ, обсуждавшегося в предыдущем разделе, свиде-

тельствует о сопоставимой субмезомасштабной вихревой активности в исследуемых морях.

В результате анализа также было установлено, что количество черных вихрей во всех морях преобладает над числом белых. В среднем 79% обнаруженных проявлений вихревых структур были визуализированы с помощью сликового механизма (черные вихри), а оставшийся 21% – с помощью сдвигово-волнового (белые вихри). При рассмотрении соотношения между черными и белыми вихрями в отдельных бассейнах было выявлено, что наибольшая доля белых вихрей наблюдалась в Черном море (34.6%), затем – в Балтийском (28.6%) и наименьшая – в Каспийском (22.0%).

В Балтийском море некоторый вклад в визуализацию вихрей внес также ледовый механизм. С его помощью было проявлено около 4% всех вихревых структур, обнаруженных в этом бассейне. Несмотря на образование обширного ледяного покрова в Северном Каспии, “ледовые” вихри в этом бассейне детектированы не были.

Межсезонная изменчивость количества черных и белых вихрей показана на рис. 4а и б соответственно. Как можно заметить, практически все “черные” вихри были обнаружены летом, весной и, в меньшей степени, осенью. Значительное количество зимних “черных” вихрей было обнаружено только в Черном море. В среднем летом было детектировано около 45.0% всех черных вихрей, весной – 32.0%, осенью – 19.0%, зимой – 3.7%.

При анализе распределения белых вихрей для Балтийского и Черного морей по сравнению с черными вихрями можно отметить увеличение доли вихревых структур, обнаруженных в осенне-зимнее время (рис. 4б). В Каспийском море распределение по сезонам белых вихрей в целом аналогично распределению черных вихрей. В сред-

Таблица 2. Выборочные статистики пространственного масштаба вихрей (все параметры, кроме N , в км)

Группа вихрей	N	Диапазон	Мода	Медиана	Среднее	σ
Балтийское море, черные	2826	1.2–48	4	5.3	6.4	4.0
Балтийское море, белые	1114	2.3–32	7	7.6	8.5	3.8
Черное море, черные	1329	1.1–66	6	6.2	7.4	5.4
Черное море, белые	621	1.5–32	10	8.4	9.3	4.0
Каспийское море, черные	1456	1.2–38	4	6.8	7.9	4.6
Каспийское море, белые	461	2.8–33	6	9.0	9.7	3.6
Черные	5611	1.1–66	4	6.0	7.0	4.6
Белые	2196	1.5–33	8	8.2	9.0	3.9
Ледовые	239	1.5–41	6	6.0	7.0	4.8
АЦ*	85	2–75	–	16.7	23.9	19.3
Грибовидные течения	84	3–61	6	11.0	14.4	10.4
Циклонические	8046	1.1–66	4	6.6	7.6	4.5

*Примечание. АЦ – антициклонические.

нем зимой наблюдалось 16.4% всех белых вихрей, весной – 20.8%, летом – 31.3% и осенью – 31.5%.

По нашему предположению, выявленный годовой ход в проявлении вихревых структур связан, прежде всего, с сезонной изменчивостью интенсивности напряжения ветра. В холодное время года более высокие скорости приповерхностного ветра способствуют срабатыванию сдвигово-волнового механизма. В то же время более слабые ветры, наблюдаемые в теплое время года, благоприятствуют проявлению сликового механизма.

Дополнительный вклад в межсезонную изменчивость количества черных вихрей может осуществляться изменчивостью количества пленок на поверхности воды в результате сезонного хода жизнедеятельности фитопланктона. Для проверки данной гипотезы требуются дальнейшие исследования.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАСШТАБА ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Для ~8250 наиболее хорошо выраженных вихревых структур был определен их пространственный масштаб. В качестве такового выбирался либо диаметр, либо – в случае эллиптических вихрей – длина большей оси эллипса. Для грибовидных структур измерялась ширина “шляпки гриба”, т.е. определялось расстояние между двумя наиболее удаленными точками, относящимися к вихревой части грибовидной структуры. Поскольку шляпка гриба составлена из двух вихрей – циклонического и антициклонического, – значения ее ширины впоследствии были поделены на два.

В целом диаметр обнаруженных вихрей варьировал в достаточно широких пределах – от 1 до 75 км. В то же время размер 99% всех вихрей находился в пределах 1–20 км. Значение характерного (т.е. наиболее часто встречаемого) размера вихрей составило 4.5 км.

В табл. 2 представлены оцененные выборочные статистики для следующих групп вихрей: черные и белые вихри для каждого из исследуемых морей, черные вихри во всей совокупности, белые вихри во всей совокупности, ледовые вихри, антициклонические вихри, грибовидные течения и циклонические вихри во всей совокупности, т.е. черные, белые и ледовые, вместе взятые.

Гистограммы частотного распределения диаметров для отдельных групп вихрей показаны на рис. 5. Как можно заметить из рисунка, для черных вихрей, вследствие их численного превосходства, была получена достаточно совершенная по форме гистограмма (рис. 5а). Отличительная черта этой гистограммы – ее асимметричность. Значения частот резко возрастают при значениях диаметра от 1 до 5 км, после чего наблюдается сначала быстрое, а затем медленное уменьшение частот до значений диаметра ~ 20 км.

Гистограмма для белых вихрей (рис. 5б) обнаруживает большую симметрию, чем она для черных вихрей; максимум частот в этом случае сдвинут в область больших диаметров – около 7 км. Следует отметить, что достижение полной симметричности распределения при получении, например, дополнительных данных для значений диаметра в области левого склона гистограммы вряд ли возможно, потому что гистограмма при

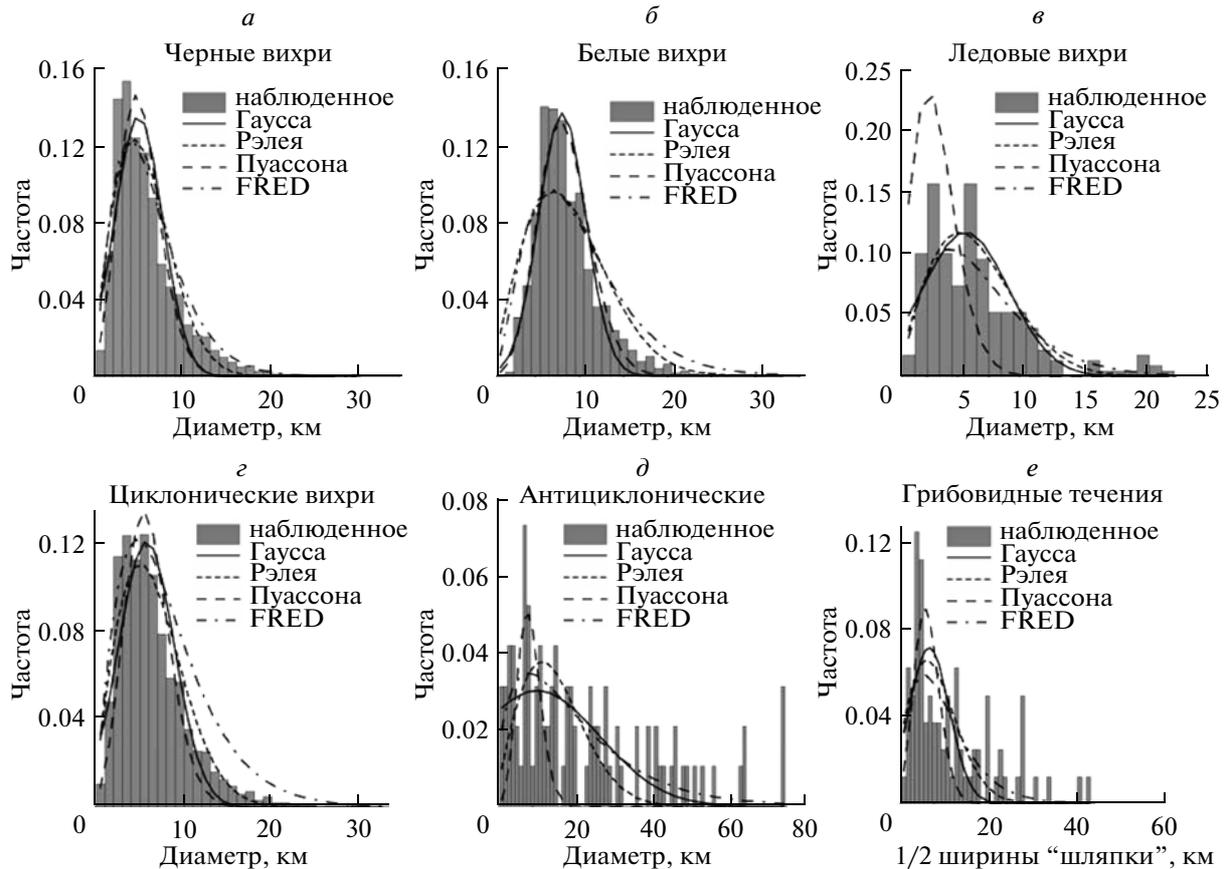


Рис. 5. Частотные гистограммы диаметров различных групп вихрей: *a* – черных; *б* – белых; *в* – ледовых; *г* – всех циклонических; *д* – антициклонических; *е* – грибовидных течений (показаны значения для половины ширины шляпки гриба).

этом должна была бы заходить в область отрицательных значений диаметра.

Гистограмма для ледовых вихрей показана на рис. 5в. В целом она схожа с гистограммой для черных вихрей с поправкой на значительно меньший объем выборки: как следует из табл. 2, всего 239 ледовых вихрей было измерено.

На рис. 5г показана гистограмма для всех измеренных циклонических вихрей, т.е. для черных, белых и ледовых вихрей вместе взятых. Как можно заметить, эта гистограмма совмещает в себе черты гистограмм для черных и белых вихрей.

Гистограмма для антициклонических вихрей (рис. 5д) отличается значительно большей долей мезомасштабных вихрей. Диапазон значений диаметра вихрей в этом случае расширился до 75 км.

Гистограмма для грибовидных структур (рис. 5е) также отличается достаточно широким охватом зафиксированных размеров, но большинство значений отмечалось все же в диапазоне от 3 до 30 км.

Полученные распределения диаметров были аппроксимированы рядом теоретических моде-

лей. Исходя из формы частотных гистограмм, были выбраны следующие аналитические распределения: Гаусса, Рэля, Пуассона, а также так называемая модель FRED (Fast Rise – Exponential Decay). Аппроксимация производилась методом наименьших квадратов с помощью градиентных процедур определения минимума функции невязки.

Параметры полученных распределений показаны в табл. 3. Они включают: μ – среднее гауссова распределения; σ_G – стандартное отклонение гауссова распределения; $\chi_G^2, \chi_R^2, \chi_P^2, \chi_F^2$ – кумулятивные тестовые статистики Пирсона для гауссова, рэлеевского и пуассоновского распределений, а также для модели FRED соответственно; σ_R – параметр рэлеевского распределения; λ – параметр пуассоновского распределения; y, t_0 – параметры модели FRED

$$f(x) = A/(4t_0)x^y \exp(-x/(4t_0)),$$

где A – амплитуда, x – переменная; Δx – ширина диапазона осреднения частот, примененная при процедуре аппроксимации.

Таблица 3. Статистические показатели пространственного масштаба вихрей (все параметры, кроме χ^2 в км)

Группа вихрей	<i>P</i> Гаусса*			<i>P</i> Рэлея*		<i>P</i> Пуассона*		FRED			Δx
	μ	σ_G	χ_G^2	σ_R	χ_R^2	$\bar{\lambda}$	χ_P^2	y	t_0	χ_F^2	
Балтийское море, черные	4.83	2.20	1.25	4.38	1.33	5.15	0.98	1.85	0.54	1.31	0.5
Балтийское море, белые	7.55	2.37	0.15	6.54	0.73	7.88	0.15	2.40	0.67	0.69	1.0
Черное море, черные	5.51	2.72	0.95	4.91	0.95	5.78	0.91	1.59	0.68	1.02	0.4
Черное море, белые	8.27	3.10	0.06	7.22	0.24	8.51	0.04	2.43	0.72	0.19	1.0
Каспийское море, черные	6.42	3.18	0.45	5.72	0.45	8.82	3.79	2.08	0.64	0.42	0.5
Каспийское море, белые	8.92	2.70	0.30	7.82	0.66	9.25	0.27	2.25	0.86	0.66	1.0
Черные	5.36	2.71	1.30	4.82	1.17	5.57	1.07	1.81	0.60	1.12	0.7
Белые	8.01	2.67	0.23	7.03	1.07	8.33	0.16	2.11	0.79	1.09	1.0
Ледовые	5.60	3.51	0.15	5.09	0.13	9.68	0.97	1.72	0.64	0.15	То же
АЦ*	11.2	16.3	0.006	12.45	0.006	9.17	0.02	0.75	2.99	0.003	3.0
Грибовидные течения	8.76	4.61	0.02	8.18	0.02	8.33	То же	1.81	1.05	0.02	2.0
Циклонические	6.21	2.97	3.57	5.50	3.74	6.43	0.71	1.77	0.70	4.01	0.3

*Примечание. *P* – распределение; АЦ – антициклонические.

Результаты графического сопоставления полученных аналитических распределений с наблюдаемыми распределениями также представлены на рис. 5, где аналитические графики показаны с помощью линий различной перфорации.

Как можно заметить из графиков, ни одно из аналитических распределений не описало с достаточной точностью выявленное эмпирическое распределение. Если применить кумулятивную тестовую статистику Пирсона χ^2 в качестве меры соответствия аппроксимированных распределений наблюдаемым (табл. 3), то обнаружим, что в большинстве случаев наилучшее соответствие продемонстрировало пуассоновское распределение.

Таким образом, учитывая обнаруженную возможность описания эмпирических распределений пуассоновским приближением, мы можем заключить, что образование субмезомасштабных вихревых структур обладает свойствами, известными из теории пуассоновских потоков: диаметр конкретного вихря не зависит ни от количества существующих структурных элементов, ни от их предыстории, ни от состояния порождающих их системы (Покровская, Шарков, 1994).

При анализе данных, представленных в табл. 2 и 3, можно заметить две примечательные тенденции. Во-первых, практически все оценки среднего значения диаметров для отдельных бассейнов – как выборочные, так и аппроксимированные; как

для черных, так и для белых вихрей – возрастают в следующем порядке: Балтийское море–Черное море–Каспийское море. Таким образом, значения характерного размера вихрей для отдельных морей оказались пропорциональными значениям бароклинного радиуса деформации Россби для этих морей, которые оцениваются в 4–10, 15–20 и 17–22 км соответственно (Ginzburg et al., 2000; Osiński et al., 2010; Архипкин и др., 1992).

Во-вторых, для всех бассейнов характерные размеры белых вихрей оказались большими, чем характерный размер черных. Требуются дальнейшие исследования, чтобы выяснить, является ли эта закономерность следствием особенностей визуализации на РЛИ черных и белых вихрей, либо белые вихри действительно отличаются от черных по своим гидродинамическим параметрам.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Для исследования особенностей пространственного распределения вихревых структур центры всех обнаруженных вихрей были нанесены на обобщенные схемы. При анализе полученных схем были выявлены следующие закономерности.

Балтийское море

Схемы пространственного распределения обнаруженных вихрей в Балтийском море – как об-

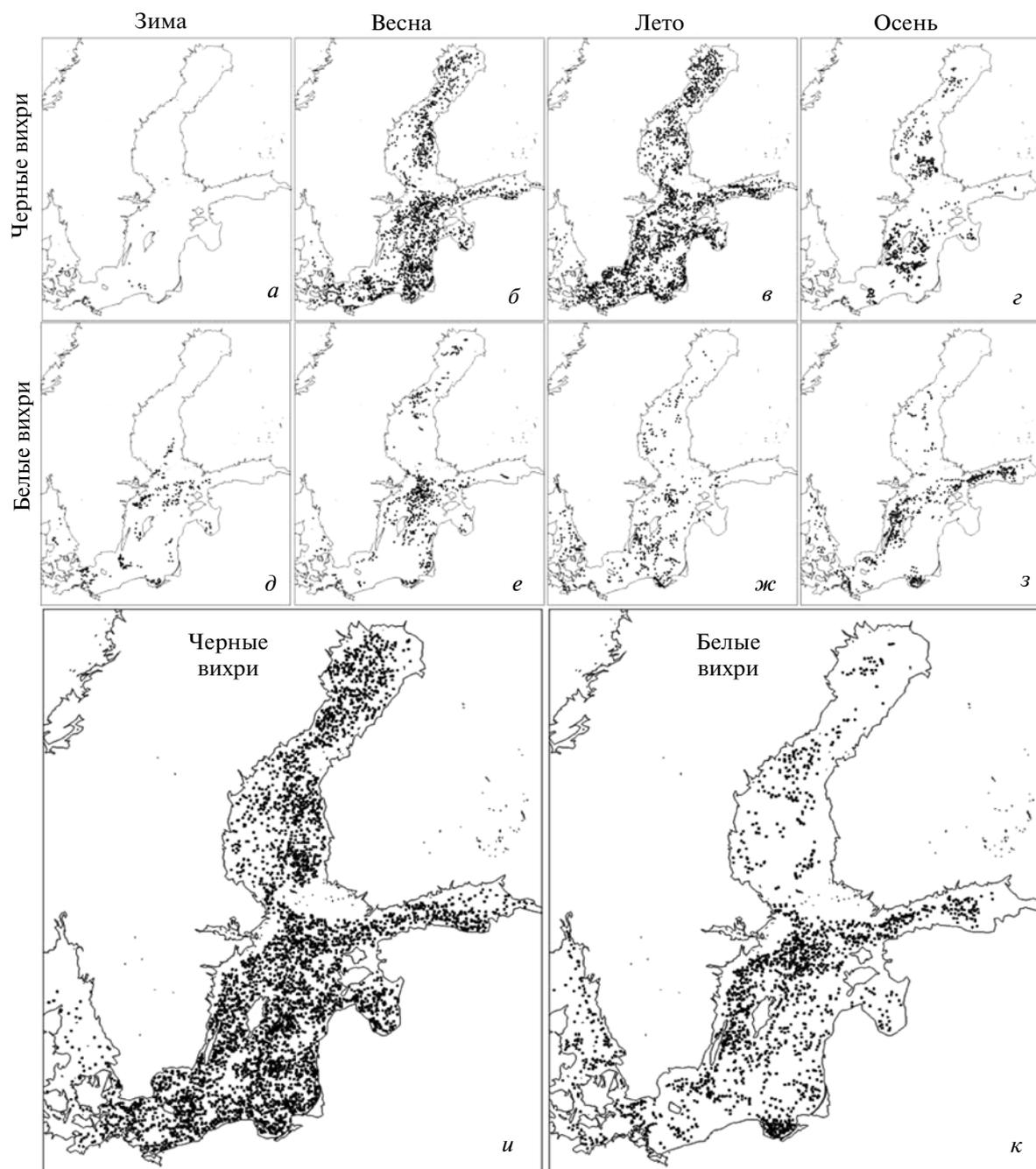


Рис. 6. Пространственное распределение вихрей в Балтийском море: *а–г* – черных; *д–з* – белых, по отдельным сезонам; *и, к* – во всей совокупности.

щие, так и по отдельным сезонам — показаны на рис. 6.

В целом обнаруженные черные вихри распределены по акватории моря достаточно равномерно (рис. 6*и*). При анализе пространственного распределения вихрей в отдельные сезоны можно выделить следующие особенности: в зимний сезон было детектировано всего лишь несколько вихрей к северо-западу от Гданьского залива и в

проливе Каттегат (рис. 6*а*). Весенние и летние черные вихри распределились по акватории достаточно равномерно (рис. 6*б, в*). Осенью черные вихри были сконцентрированы в некоторых отдельных местах: самый обширный наблюдался вокруг о. Готланд, далее следует южная часть Ботнического залива, затем область к юго-востоку от о. Борнхольм, центральная часть Ботнического залива и Рижский залив (рис. 6*г*).

В распределении белых вихрей по акватории Балтийского моря обращает на себя внимание их концентрация по линии ось Финского залива – западное побережье собственно моря – Датские проливы (рис. 6к). Рассмотрим также распределение по отдельным сезонам.

Зимой белые вихри были детектированы в отдельных районах собственно моря (рис. 6д). Самая обширная область их концентрации расположена к северу от о. Готланд – от устья Финского залива до западного берега моря. Далее следуют три менее обширные области: к югу от о. Эланд, в Арконском бассейне и в Гданьском заливе.

В весеннее время белые вихри были сконцентрированы преимущественно в северной половине собственно моря (рис. 6е). Две другие, менее обширные, области их распространения расположены вдоль восточного побережья собственно моря и в проливе, соединяющем северный и южный суббассейны Ботнического залива.

Летом достаточно редкие проявления белых вихрей были расположены более или менее равномерно по всей акватории моря за исключением Финского и Рижского заливов (рис. 6ж).

Осенью белые вихри были сконцентрированы вдоль линии, уже упомянутой выше относительно всех белых вихрей бассейна: ось Финского залива – западное побережье собственно моря – Датские проливы (рис. 6з). Значительное количество белых вихрей также наблюдалось в Гданьском заливе. Дополнительную информацию о проявлении белых вихрей в Гданьском заливе можно найти в (Lavrova et al., 2010).

Черное море

Аналогичные схемы распределения вихрей в Черном море представлены на рис. 7.

В распределении черных вихрей выделяются области повышенной их концентрации в районе северо-западного шельфа и вдоль Анатолийского побережья (рис. 7и). В зимнее время эти вихри наблюдались отдельными группами в центральных районах моря (рис. 7а). Весной область наиболее частого наблюдения черных вихрей располагалась в северо-западной части моря (рис. 7б). Для летнего времени можно выделить три области распространения вихрей: северо-западная шельфовая, у Анатолийского побережья к востоку от пр. Босфор и у Анатолийского побережья, в восточном суббассейне (рис. 7в). Осенью черные вихри располагались преимущественно в южной половине моря (рис. 7г).

Большинство белых вихрей Черного моря было сконцентрировано в достаточно узкой полосе вдоль западного побережья (рис. 7к). Зимой белые вихри наблюдались в различных районах моря – как в прибрежной зоне, так и в открытом мо-

ре (рис. 7д). Весной и летом белые вихри были сконцентрированы преимущественно вдоль западной шельфовой зоны моря (рис. 7е и ж). Осенние белые вихри наблюдались также преимущественно вдоль западного побережья моря, в центральной части западного суббассейна и у Кавказского побережья (рис. 7з).

Таким образом, на примере Черного моря отчетливо прослеживается следующая особенность в пространственном распределении белых вихрей. В весенне-летнее время скорости ветра и дрейфовых течений, достаточные для проявления белых вихрей, по-видимому, отмечаются только вдоль западного побережья моря (где они и были обнаружены). Осенью и, особенно, зимой такие условия могут складываться также и в других районах моря, поэтому область распространения белых вихрей в эти сезоны расширяется сначала на западный суббассейн, а затем и на все море.

Каспийское море

Распределение вихрей в Каспийском море проиллюстрировано рис. 8.

Прежде всего, следует отметить, что в акватории Каспийского моря все наблюдаемые вихри были сконцентрированы в центральной его части, так как южная сравнительно редко покрывалась РЛ-съемками, а в северной, как правило, преобладали неблагоприятные для проявления вихрей условия – ледяной покров и сильный ветер (рис. 8и, к).

За зимний период было обнаружено несколько черных вихревых структур в зал. Кара-Богаз-Гол и буквально единичное количество вихрей в южной части моря (рис. 8а). Весной черные вихри были сосредоточены, во-первых, вдоль западного побережья Среднего Каспия, а во-вторых, по линии от южного побережья Апшеронского п-ова до зал. Кара-Богаз-Гол (рис. 8б). Летом черные вихри были распределены достаточно равномерно по центральной части моря, с некоторым уменьшением концентрации вдоль центральной оси бассейна (рис. 8в). Осенью черные вихри были сосредоточены в трех обширных районах: к юго-западу от Красноводского п-ова, у Казахского залива и у западного побережья у г. Махачкала (рис. 8г).

Белые вихри в Каспийском море были сосредоточены в трех районах: вдоль западного побережья моря, вдоль центральной оси Среднего Каспия и на юго-западе зал. Кара-Богаз-Гол (рис. 8к). В отличие от двух других бассейнов, в Каспийском море в зимнее время года белые вихри практически не были детектированы (рис. 8д). Весной немногочисленные вихри были обнаружены в трех основных районах, уже упомянутых ранее (западное побережье, южная часть Среднего Кас-

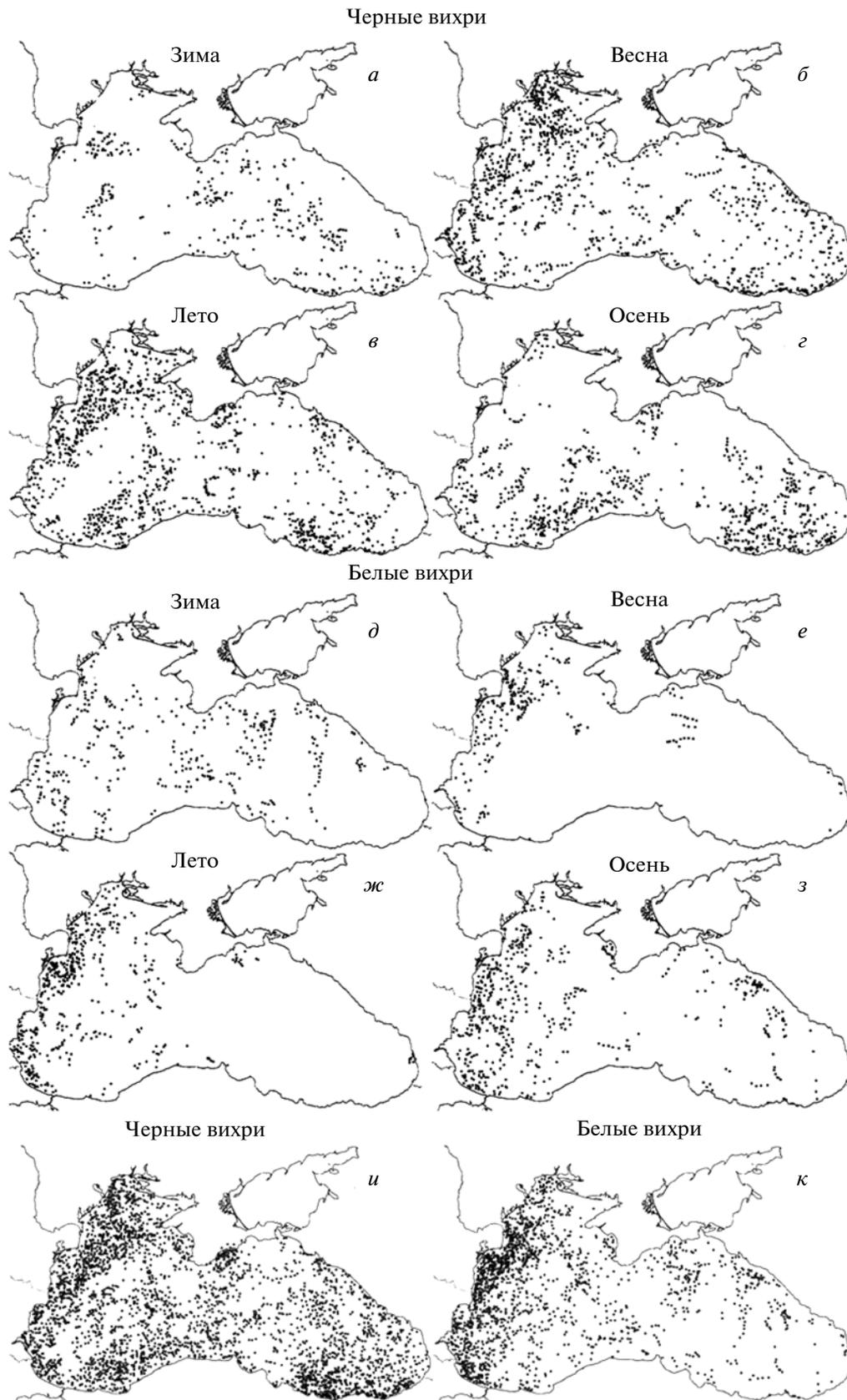


Рис. 7. Пространственное распределение вихрей в Черном море: *a–г* – черных; *д–з* – белых, по отдельным сезонам; *и, к* – во всей совокупности.

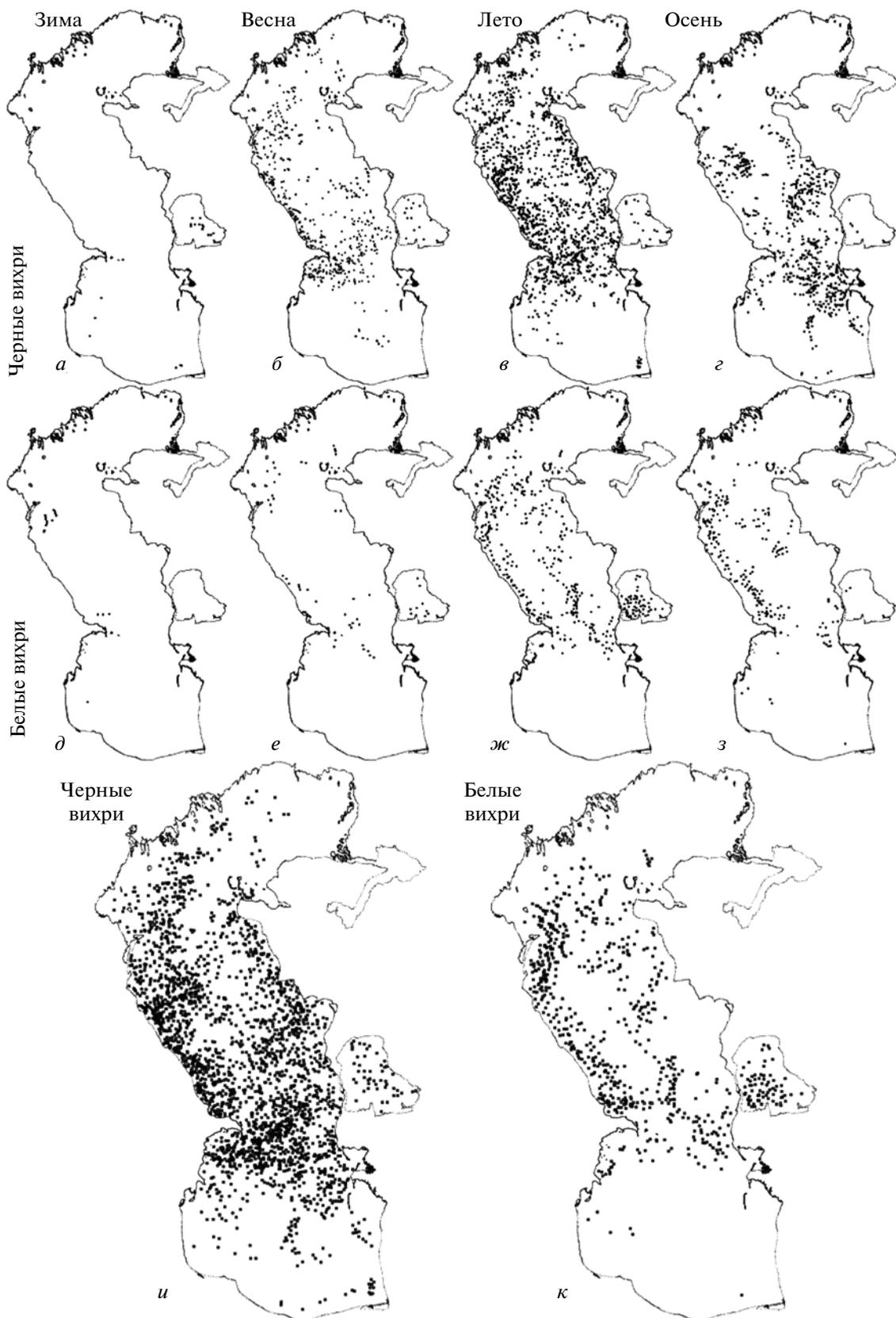


Рис. 8. Пространственное распределение вихрей в Каспийском море: а–г – черных; д–з – белых, по отдельным сезонам; и, к – во всей совокупности.

пия и зал. Кара-Богаз-Гол) (рис. 8е). Летом было обнаружено значительное количество белых вихрей, сосредоточенных в тех же трех основных районах распространения белых вихрей (рис. 8ж). Осенью белые вихри были сосредоточены преимущественно у западного побережья Среднего Каспия (рис. 8з).

Таким образом, можно заключить, что черные вихри могут образовываться повсеместно в рассматриваемых морях и их проявление на РЛИ определяется благоприятными для того условиями: наличием трассоров — поверхностных пленок — и умеренных скоростей ветра. В то же время белые вихри наблюдаются, как правило, в районах с наибольшими скоростями ветра и, следовательно, сильными дрейфовыми течениями, т.е. преимущественно у западных побережий рассматриваемых бассейнов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа более 2000 РЛИ, полученных в 2009–2010 гг., были исследованы характеристики СВС Балтийского, Черного и Каспийского морей. Выявленные в результате проведенного анализа закономерности перечислены ниже.

В целом вихревые структуры были обнаружены на 39% проанализированных изображений. В теплое время года эта доля была увеличена, в холодное — уменьшена. Эта же закономерность касается и среднего количества вихрей на одном изображении.

Наиболее часто вихревые структуры проявляются на РЛИ благодаря сликовому механизму (71% всех случаев), оставшиеся 29% приходятся на сдвигово-волновое взаимодействие. В Балтийском море некоторый (незначительный) вклад вносят также ледовые трассеры.

В соотношении указанных механизмов между собой наблюдается сезонный ход. Так, черные вихри наблюдаются преимущественно в теплую часть года, а белые в значительном количестве были детектированы также в осенне-зимнее время.

Показано, что 98% из примерно 14000 обнаруженных вихревых структур обладали циклоническим вращением.

Для среднего числа вихрей на одном проанализированном изображении для трех исследуемых морей были получены сходные значения, что свидетельствует о сравнимой субмезомасштабной вихревой активности в этих бассейнах.

Для примерно 8500 вихрей был определен их пространственный масштаб. Диаметр обнаруженных вихрей варьировал в пределах от 1 до 75 км, в то время как 99% вихрей имели диаметр в пределах 1–20 км.

Выявленный характеристический размер для черных вихрей во всех морях меньше, чем соот-

ветствующий размер для белых вихрей. Характеристический размер вихрей для каждого из бассейнов пропорционален значению бароклинного радиуса деформации Россби, характерному для этого бассейна.

Подбор аналитической модели распределения диаметров вихрей показал, что наилучшим образом полученные частотные гистограммы аппроксимируются распределением Пуассона. Это позволяет заключить, что образование СВС обладает свойствами, известными из теории пуассоновских потоков: диаметр конкретного вихря не зависит ни от количества существующих структурных элементов, ни от их предыстории, ни от состояния порождающих их системы.

Анализ пространственного распределения вихревых структур выявил, что встречаемость черных вихрей практически не зависит от крупно- и мезомасштабной циркуляций бассейнов. Белые вихри наблюдаются преимущественно в районах с наибольшими скоростями дрейфовых течений, т.е. у западных берегов и в узких и вытянутых участках акваторий (последнее — только для Балтийского моря).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №10-05-00428-а и №11-07-12025-офи-м) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. Спутниковые РЛИ предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта С1Р.6342. Автор благодарен В.А. Арефьеву за оказанную помощь при проведении исследований и анонимным рецензентам за ценные замечания при подготовке публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипкин В.С., Бондаренко А.Л., Ведев Д.Л., Косарев А.Н. Особенности циркуляции вод у восточного берега Среднего Каспия // Водные ресурсы. 1992. № 6. С. 36–43.
- Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной, А.Г., Кривошея В.Г., Соловьев, Д.М., Станичный С.В., Лаптев С.Ю. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) // Океанология. 1998а. Т. 38. № 1. С. 56–63.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичная Р.Р., Станичный С.В. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // Исслед. Земли из космоса. 2000а. № 3. С. 71–81.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 67–76.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Изменчивость вихревой картины в юго-во-

- сточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1998б. № 6. С. 3–15.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исслед. Земли из космоса. 1998в. № 3. С. 83–88.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2000б. № 1. С. 3–14.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
- Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
- Каримова С.С.* Вихревые течения в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 5. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2008. С. 95–101.
- Каримова С.С.* О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Т. 7. № 3. М.: Азбука-2000, 2010. С. 152–160.
- Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Т. 7. № 1. М.: Азбука-2000, 2010. С. 248–259.
- Покровская И.В., Шарков Е.А.* Пуассоновские свойства глобального тропического циклогенеза по спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 24–33.
- Alpers W., Huhnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № C5. P. 6251–6265.
- Andrejev O., Myrberg K., Alenius P., Lundberg P.A.* Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland – a study based on three-dimensional modeling // Boreal Env. Res. 2004. № 9. P. 1–16.
- Dokken S.T., Wahl T.* Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Rapport 96/01463, 1996.
- Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., Knulst J.C.* COASTWATCH'95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24969–24982.
- Fu L.-L., Holt B.* Seasat views oceans and sea ice with Synthetic Aperture Radar. JPL publication 81-120, February 15, 1982.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V.* Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // Satellites, Oceanography and Society / Ed. D. Halpern. Elsevier, 2000. P. 273–287.
- Ivanov A. Yu., Ginzburg A.I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proc. Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sci. 2002. V. 111. № 3. P. 281–295.
- Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon, P.* SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 1994. 106 p.
- Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B.* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № C07017. doi: 10.1029/2004JC002802.
- Karimova S.S.* Eddy statistics for the Black Sea by visible and infrared remote sensing // Remote Sensing of the Changing Oceans / Ed. Tang D. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 61–76.
- Lavrova O., Karimova S., Mityagina M.* Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // Proc. Third Int. Workshop SeaSAR 2010. 25–29 January 2010. ESRIN, Frascati, Italy.
- Lehmann A., Hinrichsen H.-H.* On the thermohaline variability of the Baltic Sea // J. Mar. Sys. 2000. V. 25. P. 333–357.
- Leppäranta M., Myrberg K.* Physical oceanography of the Baltic Sea. Germany, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- Osiński R., Rak D., Walczowski W., Piechura J.* Baroclinic Rossby radius of deformation in the southern Baltic Sea // Oceanologia. 2010. V. 52. № 3. P. 417–429.
- Poulain, P.-M., Barbanti, R., Motyzev, S., Zatsepin, A.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003 // Deep-Sea Research, Part I: Oceanographic Research Paper. V. 52. № 12. December 2005. P. 2250–2274.
- Shipilova L.M.* Eddy formation in the Caspian Sea // Dynamic Earth Environments: Remote Sensing Observations from Shuttle-Mir Missions / Eds. Lulla K.P., Dessinov L.V. N.Y.: John Wiley & Sons, 2000. V. 267, 283. P. 211–219.
- Sur H., Ilyin Y.* Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // Progr. Oceanogr. 1997. V. 39. P. 109–151.
- Tuzhilkin, V.S., Kosarev, A.N.* Thermohaline structure and general circulation of the Caspian Sea waters // The Caspian Sea environment / Eds. Kostianoy A.G., Kosarev A.N. Germany: Springer, 2005. P. 33–58.
- Zatsepin A., Ginzburg A., Kostianoy A., Kremenetskiy V., Krivosheya V., Stanichny S., Poulain P.-M.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C8. P. 3246. doi:10.1029/2002JC001390.

Statistical Analysis of Submesoscale Eddies in the Baltic, Black and Caspian Seas Using Satellite SAR Images

S. S. Karimova

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Submesoscale eddies in the three inner seas – the Baltic, Black and Caspian – are considered using satellite synthetic aperture radar (SAR) images. Over 2000 medium resolution Envisat ASAR and ERS-2 SAR images were obtained in 2009–2010 in different parts of the seas mentioned. As a result of the analysis performed approx. 14000 vortical structures were detected. 71% of them were visualized due to surfactant films (“black” eddies), while 29% – due to wave/current interactions (“white” eddies). Practically all of eddies detected (98%) were cyclonically rotating. Their diameter was within 1–20 km. Characteristic size of “black” eddies in all the basins was discovered to be less than that of “white” eddies. Characteristic eddy size for the Baltic, Black and Caspian seas proved to be proportional to the baroclinic radius Rossby of deformation typical for these basins. “Black” eddies did not demonstrate significant connection with basin- and mesoscale surface circulation of the seas. Most of “white” eddies detected were attributed to the zones with the most intense drift currents, i.e. those along the western boundaries and – in the Baltic Sea only – in the narrow and elongated parts of the basin.

Keywords: spiral eddies, submesoscale eddies, wave/current interactions, radar images, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Baltic Sea, Black Sea, Caspian Sea