

Сезонная и межгодовая изменчивость субмезомасштабной вихревой активности в Балтийском, Черном и Каспийском морях

С.С. Каримова

Институт космических исследований РАН
E-mail: feba@list.ru

Благодаря высокому пространственному разрешению получаемых изображений и независимости результатов съемки от наличия облачного покрова и условий освещенности данные спутниковой радиолокации предоставляют обширные возможности для изучения самой малоисследованной группы гидродинамических вихревых образований – субмезомасштабных вихрей. В данной работе на основе анализа массива радиолокационных данных Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных для различных частей Балтийского, Черного и Каспийского морей в 2009–2010 гг., проводится статистическое исследование субмезомасштабных вихрей указанных акваторий. В результате проведенного анализа было установлено, что во внутригодовом распределении количества обнаруженных вихревых структур прослеживается влияние соответствующей изменчивости скорости приповерхностного ветра, а также – в некоторых случаях – концентрации хлорофилла *a* как косвенного индикатора количества поверхностных пленок, визуализирующих вихревые структуры. Среди океанографических факторов, обусловивших особенно частое детектирование вихрей в отдельных районах рассматриваемых морей, было выделено наличие относительно неглубокого термо- или галоклина.

Ключевые слова: вихревая активность, субмезомасштабные вихри, мелкомасштабные вихри, спиральные вихри, бароклинная неустойчивость, радиолокационные изображения, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Балтийское море, Черное море, Каспийское море.

Введение

Данная работа посвящена исследованию проявлений на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) субмезомасштабных гидродинамических вихревых структур, т.е. вихрей с диаметром менее характерного для данной водной толщи бароклинного радиуса деформации Россби. Для рассматриваемых в данной работе акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей это значение достигает 20 км.

Субмезомасштабные вихри представляют собой наименее исследованный участок спектра океанических вихрей. До сих пор остаются малоисследованными такие аспекты, как параметры трехмерной структуры этих вихрей, особенности их зарождения и эволюции, характерное время жизни, физические механизмы и источники их генерации, причины циклонической асимметрии и др. Неизвестна роль субмезомасштабных вихревых структур в вертикальном и горизонтальном перераспределении растворенных и взвешенных веществ и, следовательно, в воздействии на биопродуктивность и самоочищение морских вод. Предполагается, что вклад этих структур в указанных процессах может быть сопоставим с вкладом мезомасштабных вихрей (*Lapeyre, Klein, 2006; Митягина, Лаврова, 2008, 2009; Серебряный, Лаврова, 2008*).

Наиболее интригующим среди упомянутых вопросов является вопрос о механизмах генерации субмезомасштабных вихрей. Следует отметить, что в некоторых отдельных случаях происхождение этих вихрей можно объяснить известными механизмами вихреобразования. Например, вихревые структуры могут образовываться в результате локального ветрового импульса (*Митягина, Лаврова, 2008, 2009; Костяной и др., 2010*). В прибрежной зоне причинами возникновения гидродинамической неустойчивости течений и генерации вихрей часто являются либо обтекание особенностей береговой линии (*Гинзбург, 1992; Костяной и др., 2010; Зацепин и др., 2011*), либо динамическое воздействие поступления речных вод (*Костяной и др., 2010*). В случае с упорядоченными цепочками вихрей можно предположить, что их формирование обусловлено сдвиговой неустойчивостью (*Федоров, 1983; Альбом течений..., 1986; Должанский и др., 1990; Гинзбург, 1992; Ivanov, Ginzburg, 2002*). Ино-

гда субмезомасштабные циклонические вихри формируются на периферии более крупного антициклонического вихря (Гинзбург, 1991; Дубина и др., 2011). В (Yamaguchi, Kawamura, 2009) показано, что в некоторых случаях (в частности, у берегов Японии в заливе Мутсу) формирование субмезомасштабного вихря происходит при господстве циклонической циркуляции в условиях геострофического баланса. В качестве еще одного возможного механизма генерации субмезомасштабных вихрей указывается разрушение более крупномасштабных вихрей (Митягина, Лаврова, 2008, 2009).

Наиболее трудным для объяснения является происхождение обширных по площади кластеров плотноупакованных субмезомасштабных вихрей. В качестве возможной гидродинамической модели их возникновения в (Munk et al., 2000) была предложена баротропная неустойчивость, в (Eldevik, Dysthe, 2002) – бароклинная, в (Shen, Evans, 2002) – инерционная. В качестве физических причин, вызывающих генерацию спиральных вихрей, указываются специфическое импульсное воздействие атмосферного потока (Karimova, 2012) и конвективные процессы в поверхностном слое вод (Гинзбург, 1992; Голицын, 2010; Федоров, Гинзбург, 1988; Boubnov, Golitsyn, 1995).

В отличие от большинства средств океанографических исследований, спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ) предоставляют прекрасные возможности для изучения именно субмезомасштабных вихрей вследствие высокого пространственного разрешения этих данных, независимости результатов съемки от наличия облачности и условий освещенности, а также детальной визуализации гидродинамических структур на получаемых изображениях. Указанные преимущества радиолокационных данных были использованы в недавних работах (Каримова, 2012; Karimova, 2011), в которых РЛИ Envisat ASAR и ERS-2 SAR были задействованы для получения обобщающих сведений о субмезомасштабных вихрях в Балтийском, Черном и Каспийском морях. Данная работа является логическим продолжением упомянутых выше работ и ставит своей целью исключение влияния пространственно-временной неоднородности покрытия акваторий РЛИ на статистические показатели субмезомасштабной вихревой активности в исследуемых бассейнах.

Характеристика используемых данных

Данная работа основана на анализе РЛИ, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) и SAR (Synthetic Aperture Radar), функционировавших на спутниках Европейского космического агентства (ЕКА) 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 изображений – 150 м.

Распределение изображений по отдельным бассейнам и режимам съемки представлено в таблице 1. Режим WSM (Wide Swath Medium Resolution) характеризуется широкой полосой обзора получаемых изображений – около 400 км, IMM (Image Mode Medium Resolution) – узкой (около 105 км).

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	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

Проявление вихревых структур на РЛИ

Визуализация вихревых структур на РЛИ возможна посредством четырех различных механизмов: сливового, сдвигово-волнового, термического и ледового (*Dokken, Wahl, 1996; Johannessen et al., 2005*).

Сливовый механизм обусловлен подавлением гравитационно-капиллярных волн поверхностью 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 проявляется при скоростях ветра от 2-3 до 5-7 м/с (*Johannessen et al., 2005*). Для краткости вихри, визуализированные с помощью этого механизма, будут в дальнейшем называться вихри I типа визуализации.

Пример визуализации вихревой структуры с помощью этого механизма представлен на рис. 1а. РЛИ Envisat ASAR WSM, фрагмент которого показан на этом рисунке, было получено в Черном море, к северу от Синопского полуострова, 10.05.2007 г. в 07:37 UTC.

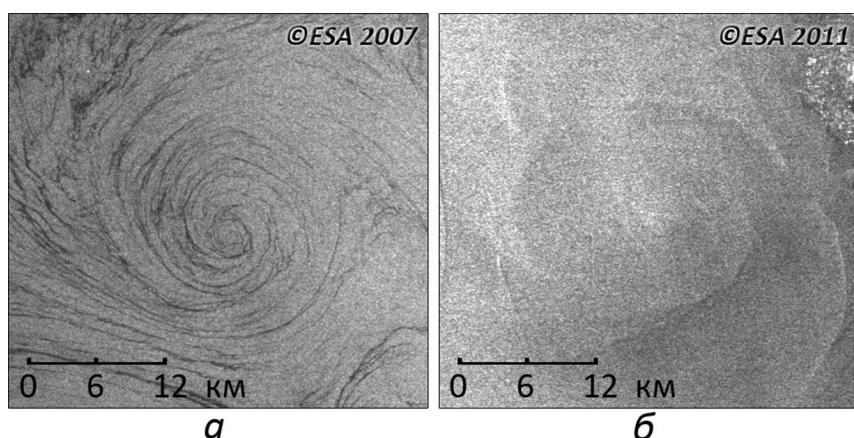


Рис. 1. Проявление на РЛИ Envisat ASAR WSM вихревых структур с помощью различных механизмов:
а) сливового; б) сдвигово-волнового

Второй механизм – сдвигово-волной – обусловлен взаимодействием гравитационно-капиллярных волн и сдвиговых течений и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала (*Fu, Holt, 1982; 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*). Для срабатывания этого механизма требуются скорости ветра от примерно 6 до 12 м/с (*Dokken, Wahl, 1996*). Эта категория проявлений вихревых структур обозначается в данной работе как вихри II типа визуализации.

Пример визуализации вихревой структуры с помощью сдвигово-волнового механизма показан на рис. 1б. Этот вихрь был детектирован в проливе Каттегат на РЛИ Envisat ASAR WSM, полученном 11.09.2011 г. в 20:41 UTC.

Ледовый механизм проявляется при наличии на поверхности воды кусочков плавучего льда, а термический связан с изменением характеристик атмосферного пограничного слоя, а следовательно, и скорости ветра в области гидрологического термического фронта.

Исследования, проведенные в (*Каримова, 2012; Karimova, 2011*), показали, что для рассматриваемых бассейнов наибольшее значение при визуализации вихревых структур имеют два первых механизма. Около 70 % обнаруженных вихревых структур были проявлены на РЛИ с помощью поверхностных пленок и около 29 % – с помощью сдвигово-волнового взаимодействия. В окраинных морях вследствие пониженного количества поверхностных пленок и преобладания больших скоростей приповерхностного ветра и поверхностных тече-

ний вклад сдвигово-волнового механизма в визуализацию вихревых структур увеличивается (*Dokken, Wahl, 1996; Sandven et al., 2000*).

Анализ временной неоднородности распределения вихревых структур

Для выявления временной изменчивости субмезомасштабной вихревой активности, не зависящей от соответствующей изменчивости покрытия акваторий РЛИ, был выбран следующий параметр. Для каждого месяца было, во-первых, определено количество вихрей, детектированных в этом месяце, а затем вычислена площадь участков РЛИ, полученных над морской поверхностью. Затем первый параметр был поделен на второй. Графики изменчивости рассчитанного таким образом показателя за весь период наблюдений представлены на рис. 2.

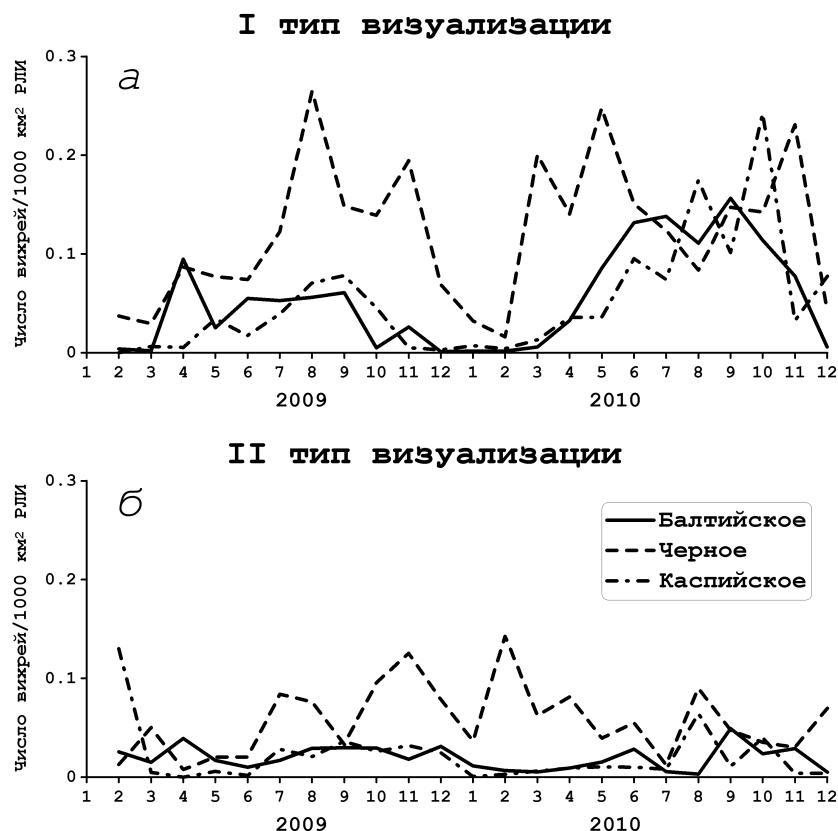


Рис. 2. Временной ход среднего числа вихрей I (а) и II (б) типов визуализации на единицу площади РЛИ морской поверхности в 2009–2010 гг.

Представленные графики демонстрируют, что в целом при благоприятных ветровых условиях вихри I типа визуализации обнаруживались значительно чаще, чем вихри II типа (рис. 2). В среднем было обнаружено 0,04 вихрей I типа визуализации в расчете на 1000 км² РЛИ и 0,02 вихрей/1000 км² РЛИ II типа. Вихри I типа визуализации также демонстрировали большую изменчивость, чем вихри II типа. Так, среднее квадратическое отклонение для вихрей I типа визуализации составило 0,05 вихрей/1000 км² РЛИ, а для II типа – 0,01 вихрей/1000 км² РЛИ.

При анализе межсезонных различий рассматриваемого параметра можно заметить, что для вихрей I типа визуализации отчетливо проявился годовой ход. Так, наибольшее количество таких проявлений вихрей наблюдалось в летне-осеннее время в 2009 г. и особенно в 2010 г. Некоторые пики отмечаются на графиках хода количества этих проявлений также в весеннее время.

Попробуем выявить причины наблюдаемого временного хода среднего числа вихрей на 1000 км^2 РЛИ. Так как возможность визуализации вихревых структур на РЛИ существенно зависит от скорости приповерхностного ветра в момент съемки, в качестве фактора, определяющего наблюдаемую межсезонную изменчивость среднего количества обнаруженных вихрей, может выступать соответствующая изменчивость скорости ветра над рассматриваемыми бассейнами. Сравним годовой ход количества обнаруженных вихрей с соответствующим ходом средней скорости ветра над рассматриваемыми акваториями, полученной по данным скаттерометра QuikScat для 2009 г. и скаттерометра Oceansat-2 для 2010 г. (рис. 3).

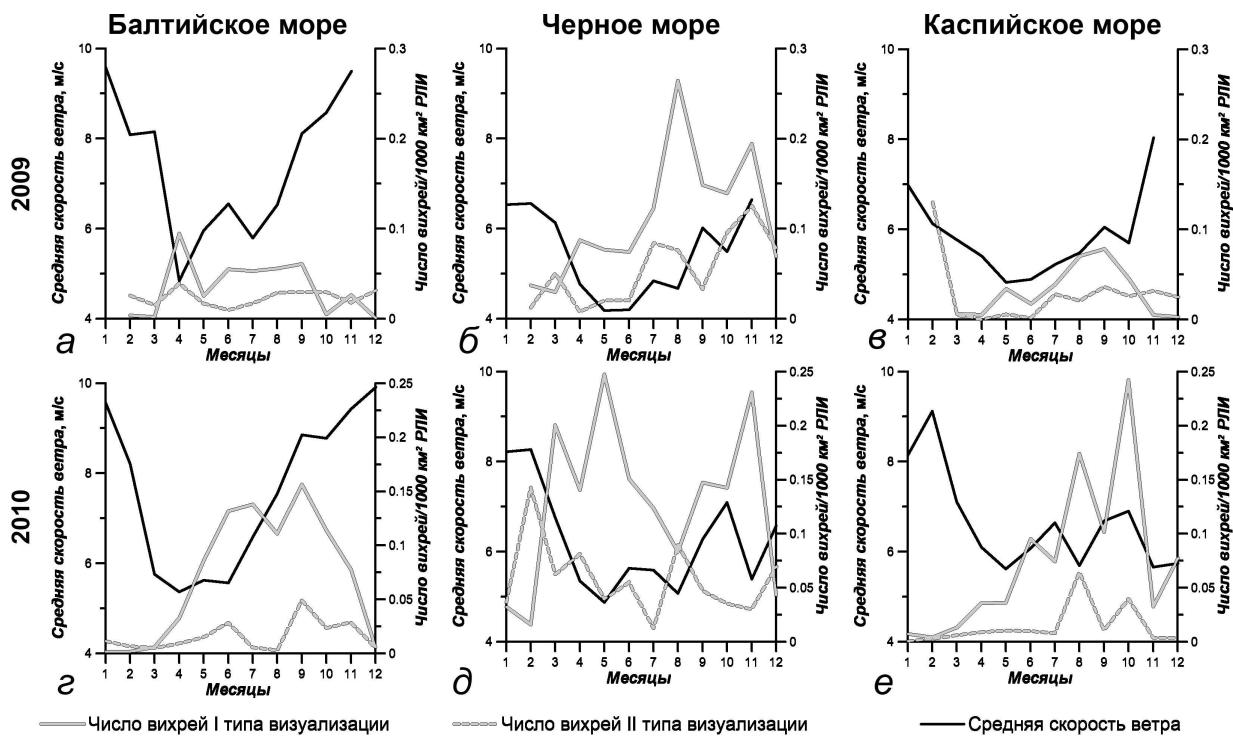


Рис. 3. Годовой ход среднего числа вихрей на единицу площади РЛИ и средней скорости ветра, рассчитанной по данным скаттерометров QuikScat (2009 г.) и Oceansat-2 (2010 г.), для Балтийского (а, г), Черного (б, д) и Каспийского (в, е) морей

Как следует из представленных графиков, в целом количество обнаруженных вихрей I типа визуализации обратно пропорционально средней скорости ветра за рассматриваемый период (рис. 3). Вихри II типа визуализации могут проявляться при более высоких скоростях ветра, чем вихри I типа, поэтому для их количества связь со скоростью ветра не столь очевидна, хотя в некоторых случаях можно отметить прямо пропорциональную зависимость от средней скорости ветра (рис. 3).

Для графиков годового хода количества вихрей I типа визуализации также характерен сдвиг по отношению к соответствующим графикам хода средней скорости ветра (рис. 3). В результате этого сдвига максимум количества вихрей сдвигается от весенне-летнего времени, когда наблюдается минимум средней скорости ветра, к осеннему, во время которого значения средней скорости ветра уже начинают возрастать.

В качестве фактора, который мог обусловить этот сдвиг максимума количества вихрей I типа визуализации по отношению к минимуму средней скорости ветра, могла выступить изменчивость количества биогенных поверхностных пленок, присутствующих на морской поверхности. Чтобы проверить эту гипотезу, сравним графики годового хода среднего числа вихрей I типа визуализации с соответствующими графиками средней концентрации хлорофилла *a*, которая, предположительно, может послужить индикатором биопро-

дуктивности фитопланктона в рассматриваемых акваториях, а следовательно, и количества присутствующих на морской поверхности пленок (рис. 4). Данные о концентрации хлорофилла *a* были получены сканером цвета моря MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и заимствованы на портале Giovanni <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/overview/index.html>.

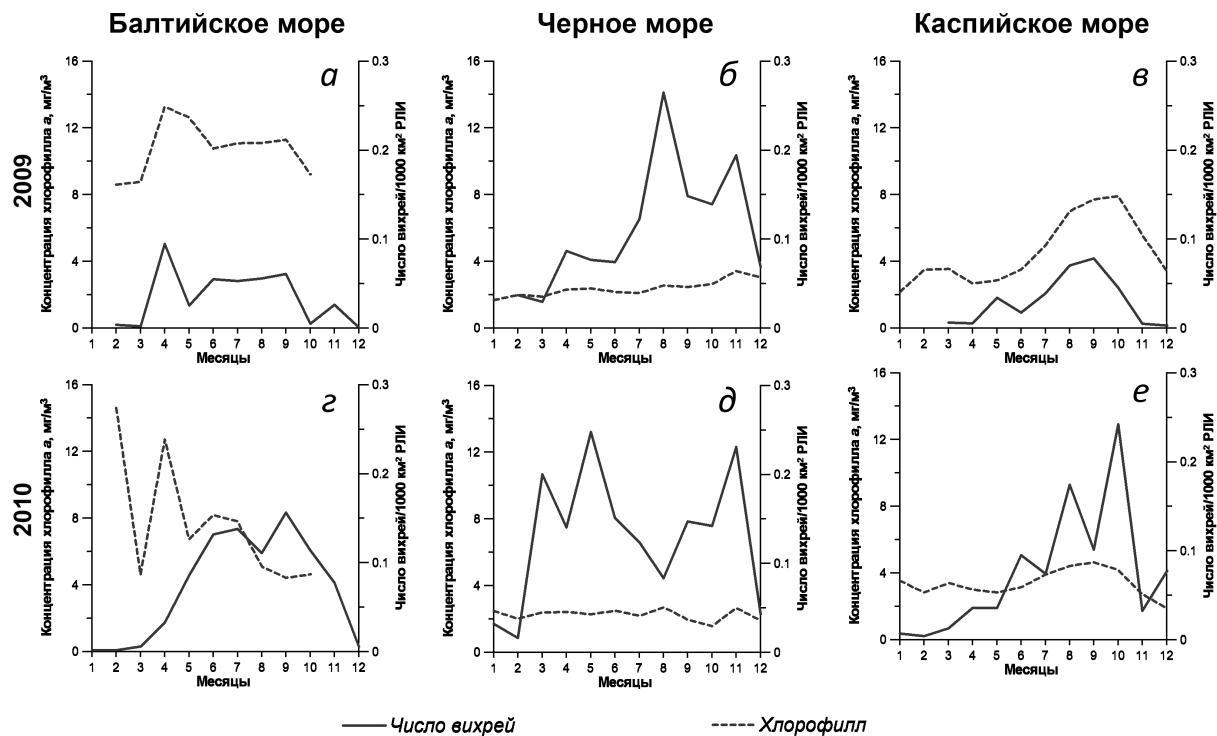


Рис. 4. Годовой ход среднего числа вихрей I типа визуализации и средней концентрации хлорофилла *a*, рассчитанной по данным MODIS, в Балтийском (а, г), Черном (б, д) и Каспийском (в, е) морях в 2009-2010 гг.

Из представленных на рис. 4 графиков можно заметить, что в половине случаев (для Балтийского моря в 2009 г. и для Каспийского в 2009 и 2010 гг.) наблюдается хорошее соответствие между количеством вихрей и концентрацией хлорофилла *a*, т.е. наблюдающаяся изменчивость количества обнаруженных вихревых структур, возможно, объясняется не соответствующей изменчивостью вихревой активности, а различным количеством доступных для визуализации вихрей трассеров – поверхностных пленок.

Анализ графиков, представленных на рис. 2, также позволяет выделить межгодовые различия количества обнаруженных вихревых структур в рассматриваемых акваториях. В частности, можно заметить, что в 2010 г. во всех трех морях было обнаружено большее количество вихрей, чем в 2009 г. При этом средняя скорость ветра между этими годами различалась незначительно, а концентрация хлорофилла *a* была в целом выше в 2009 г. По-видимому, это связано уже не с условиями визуализации вихрей на РЛИ, а с изменчивостью самой вихревой активности. Попробуем выявить причины, которые могли обусловить усиление субмезомасштабного вихреобразования в 2010 г. по сравнению с 2009 г.

Как известно, примечательной чертой гидрометеорологических условий 2010 г. была повышенная температура воздуха летом этого года над Европейской частью Евразии благодаря господству здесь серии блокирующих антициклонов. Как следствие, температура поверхности моря (ТПМ) Европейских морей в 2010 г. так же была выше, чем в 2009 г. Это можно проследить по данным радиометров NOAA AVHRR. Соответствующие графики годового хода средней ТПМ для рассматриваемых морей даны на рис. 5.

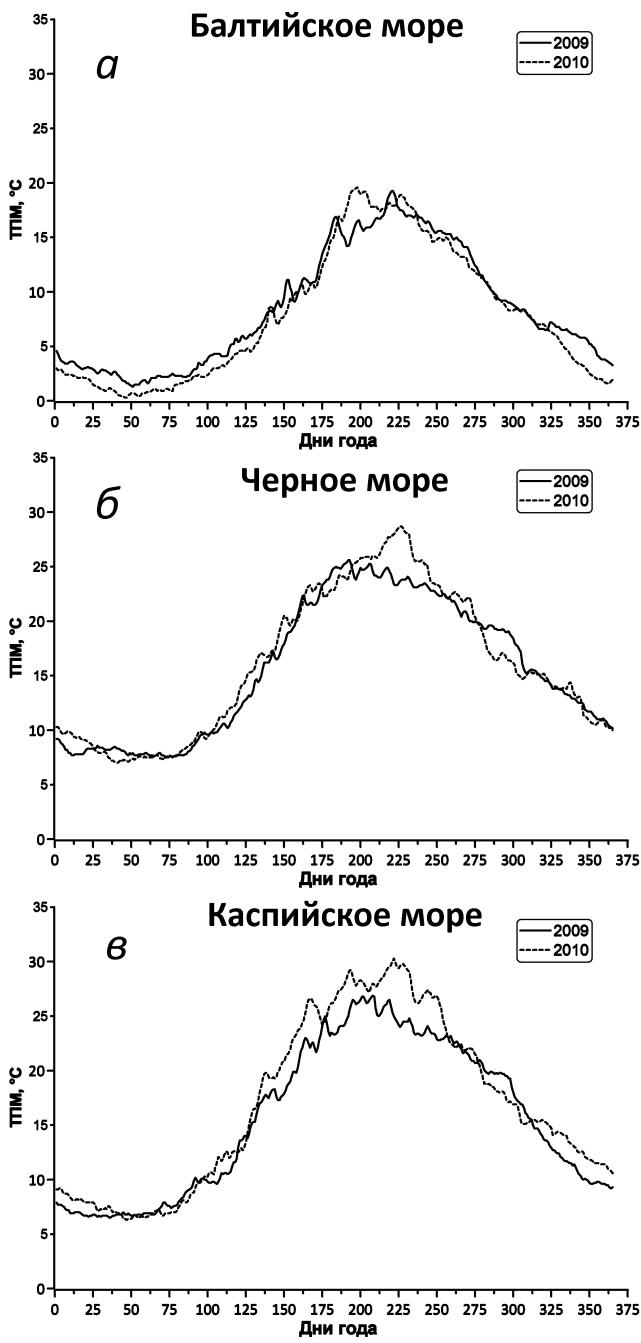


Рис. 5. Годовой ход средней ТПМ Балтийского (а), Черного (б) и Каспийского (в) морей в 2009 и 2010 гг. по данным NOAA AVHRR

В результате интенсивного прогрева поверхностных вод в теплое время 2010 г. должен был сформироваться более резкий и менее глубокий термоклин, который, видимо, способствовал более активному образованию субмезомасштабных вихрей. Таким образом, в ходе этих рассуждений мы получаем свидетельство влияния интенсивности стратификации поверхностных вод морей на субмезомасштабную вихревую активность и, возможно, поддержку бароклиновой гипотезы их формирования. К сожалению, на данный момент мы не располагаем какими-либо данными *in situ* о характеристиках залегания термоклина в рассматриваемых морях в интересующий нас период времени, поэтому не можем окончательно подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.

Чтобы получить дополнительные сведения об условиях образования субмезомасштабных вихревых структур, в следующем разделе будут рассмотрены схемы пространственного распределения обнаруженных вихрей.

Анализ пространственного распределения вихревых структур

Для получения схем пространственного распределения вихрей, нормализованных с учетом неоднородности покрытия акваторий РЛИ, была проделана следующая процедура. Районы интереса были аппроксимированы прямоугольными матрицами, и для каждого пикселя этих матриц были определены, во-первых, число детектированных вихревых структур, а во-вторых, плотность покрытия РЛИ. Затем для каждого пикселя первый показатель был поделен на второй.

Полученные схемы нормализованной плотности вихревых структур для Балтийского, Черного и Каспийского морей для 2009 и 2010 гг. представлены на рис. 6-8 соответственно. На этих рисунках верхний ряд изображений относится к вихрям I типа визуализации, а нижний – II; левый столбец – к 2009 г., правый – к 2010 г.

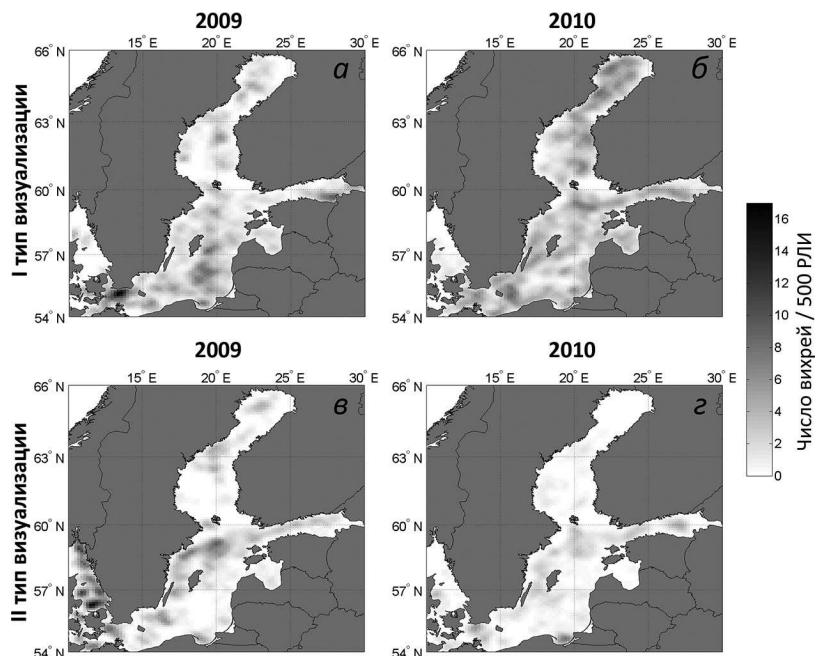


Рис. 6. Нормализованная плотность вихревых структур Балтийского моря
I (а, б) и II (в, г) типов визуализации в 2009 и 2010 гг.

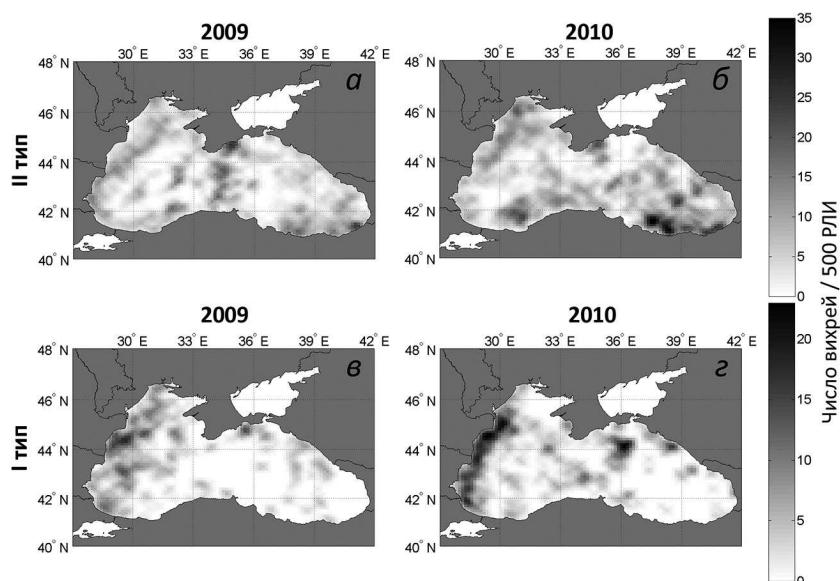


Рис. 7. Нормализованная плотность вихревых структур Черного моря
I (а, б) и II (в, г) типов визуализации в 2009 и 2010 гг.

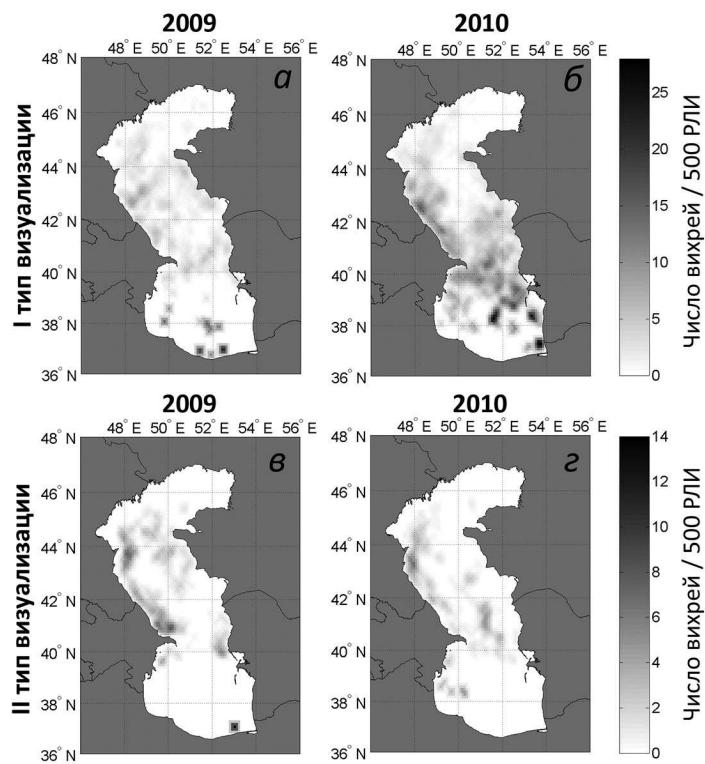


Рис. 8. Нормализованная плотность вихревых структур Каспийского моря I (а, б) и II (в, г) типов визуализации в 2009 и 2010 гг.

Приведенные схемы демонстрируют, что в Балтийском море вихри I типа визуализации были детектированы практически повсеместно (рис. 6а, б), в то время как в Черном и Каспийском морях могут быть выделены районы их особенно частого наблюдения (рис. 7а, б и 8а, б).

Анализ схем распределения вихрей II типа визуализации свидетельствует о том, что во всех трех бассейнах вихри этого типа визуализации демонстрируют специфику в их распределении (рис. 6в, г, 7в, г и 8в, г). В Балтийском море вихри этого типа визуализации были отмечены в наибольшем количестве в узких районах бассейна, в которых при интенсивном ветровом воздействии могут формироваться сильные дрейфовые течения, а также вдоль западного побережья собственно моря (рис. 6в, г). В Черном море наибольшее количество вихрей этого типа визуализации наблюдалось вдоль западного побережья моря, т.е. в районе с наибольшими скоростями ветра (рис. 7в, г). В Каспийском море вихри этого типа визуализации так же отмечались преимущественно вдоль западного побережья и тем самым обозначили положение наиболее мощного дрейфового течения этого бассейна (рис. 8в, г). Таким образом, предположительно, II тип визуализации активно проявляется только в районах с интенсивными дрейфовыми течениями.

В отношении наблюдающихся межгодовых различий в распределении вихревых структур можно отметить, что, несмотря на вариации интенсивности значений плотности вихревых структур в отдельных районах бассейнов, в целом представленные схемы для 2009 и 2010 гг. имеют схожие черты в плане расположений максимумов вихревой плотности. Одно из немногих исключений – это схемы плотности вихрей I типа визуализации для Балтийского моря, в котором в 2009 г. максимум плотности располагался в Восточном Готландском бассейне (рис. 6а), а в 2010 г. вихри I типа визуализации были расположены сравнительно равномерно по всей акватории, кроме упомянутого Восточного Готландского бассейна, где отмечалась пониженная плотность вихревых структур (рис. 6б).

Сезонная изменчивость пространственного распределения вихревых структур может быть оценена по схемам, представленным на рис. 9-11.

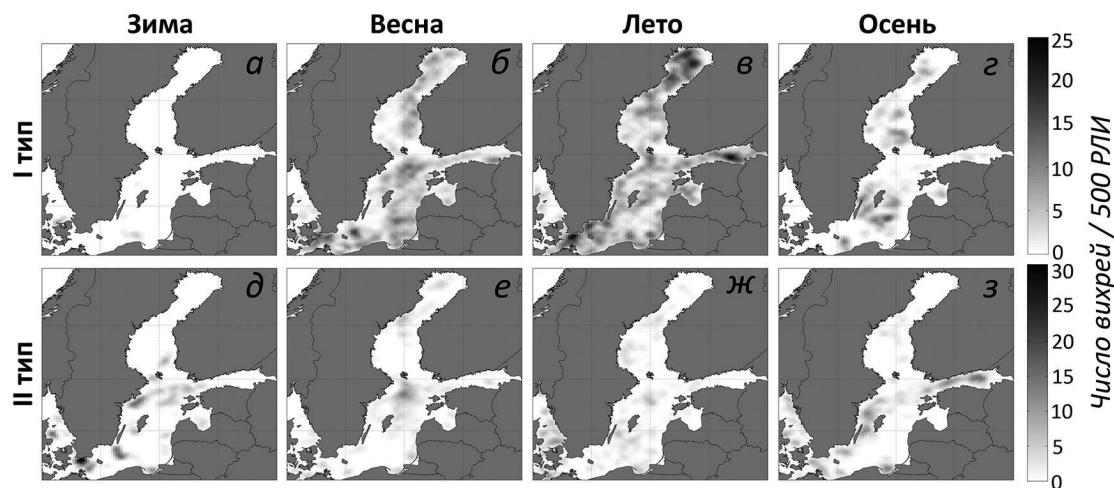


Рис. 9. Сезонная изменчивость нормализованной плотности вихревых структур Балтийского моря I (а-г) и II (д-з) типов визуализации

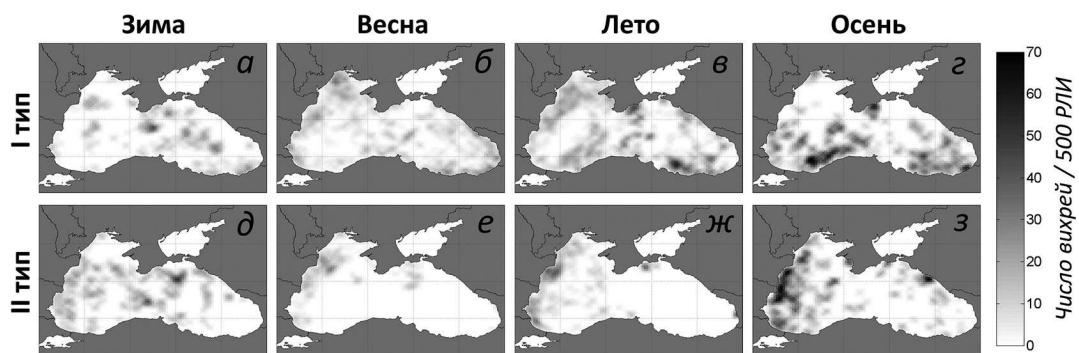


Рис. 10. Сезонная изменчивость нормализованной плотности вихревых структур Черного моря I (а-г) и II (д-з) типов визуализации

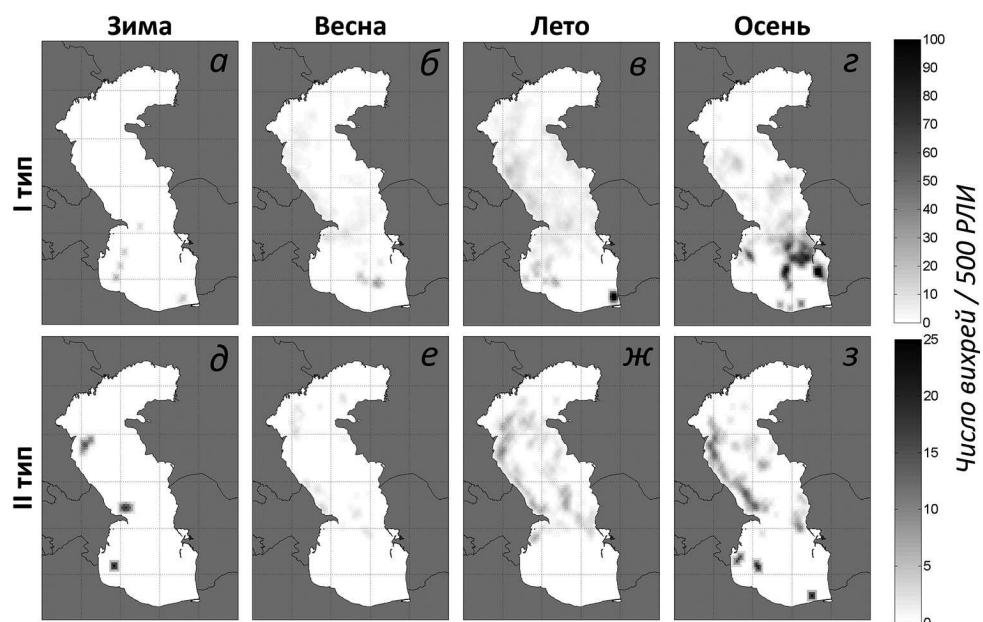


Рис. 11. Сезонная изменчивость нормализованной плотности вихревых структур Каспийского моря I (а-г) и II (д-з) типов визуализации

Анализ приведенных схем показывает, что в весенне-летнее время вихри I типа визуализации Черного и Каспийского морей соответствуют районам повышенной концентрации хлорофилла *a* в этих морях. Прежде всего к таким районам относятся северо-западная часть

Черного моря (рис. 10б, в) и западная прибрежная часть Среднего Каспия (рис. 11б, в). Таким образом, при анализе рассматриваемых схем достаточно трудно определить, чем вызвано частое детектирование вихревых структур в отдельных районах морей: то ли их частым формированием по сравнению с другими районами, то ли частым наличием здесь трассеров для их визуализации.

Если предположить, что мы наблюдаем действительно неоднородность распределения вихрей, а не их отображение на РЛИ, то частое образование вихрей вдоль западных побережий Черного и Каспийского морей может быть объяснено располагающимися здесь зонами распреснения и скачка солености, препятствующего заглублению термоклина в этих областях. В пользу возможного влияния интенсивности стратификации на субмезомасштабную вихревую активность свидетельствуют также такие наблюденные особенности пространственно-временного распределения вихрей, как преобладание количества обнаруженных вихрей в весенне-летнее время, отсутствие проявлений вихрей в Азовском море и восточной части Северного Каспия и практически равная встречаемость вихрей I типа визуализации по всей акватории Балтийского моря.

Следует отметить, что возможны два различных пути влияния устойчивой стратификации поверхностных вод на субмезомасштабную вихревую активность. В рамках первого из них малая толщина квазиоднородного слоя лишь облегчает процесс вихреобразования, так как вихревым движением в этом случае охвачен меньший объем вод. Образование же вихрей происходит по каким-либо другим причинам – например, вследствие квазипериодического ветрового воздействия. Во втором случае расслоенность вод по вертикали вследствие формирующейся бароклинной неустойчивости течений выступает как непосредственный источник вихреобразования. Требуются дальнейшие тщательные исследования, чтобы прояснить имеющиеся неопределенности о процессах формирования субмезомасштабных вихрей.

Заключение

Исключение влияния пространственно-временной неоднородности покрытия акваторий рассматриваемых морей РЛИ на статистические показатели субмезомасштабной вихревой активности в исследуемых бассейнах позволило выявить следующие закономерности в распределении вихревых структур. Вихри, проявленные на РЛИ с помощью поверхностных пленок, демонстрировали большую внутригодовую изменчивость, чем вихри, визуализированные сдвигово-волновым взаимодействием. Эта особенность может быть объяснена влиянием изменчивости, во-первых, скорости приповерхностного ветра, а во-вторых, активности фитопланктона, что прослеживается – в данном случае через концентрацию хлорофилла *a* – в графиках временного хода рассматриваемых параметров. Причиной большего количества обнаруженных вихрей в 2010 г. по сравнению с 2009 г. выступает, предположительно, больший прогрев вод и формирование менее глубокого термоклина в 2010 г.

Анализ пространственного распределения вихревых структур в отдельные сезоны показал, что наиболее часто вихри, проявленные с помощью поверхностных пленок, наблюдаются в районах с повышенной концентрацией хлорофилла *a* (например, вдоль западных побережий Черного и Каспийского морей). С другой стороны, повышенная вихревая активность в таких районах может быть обусловлена наличием здесь областей распреснения и, как следствие, неглубокого залегания термоклина.

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 годы. Спутниковые радиолокационные изображения предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта С1Р.6342.

Литература

1. Альбом течений жидкости и газа / Сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986. 181 с.
2. Гинзбург А.И. Нестационарные диполи и мультиполи как закономерность эволюции изолированного вихря (спутниковая информация) // Исследование Земли из космоса. 1991. № 2. С. 75-84.
3. Гинзбург А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология. 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997-1004.
4. Голицын Г.С. Спирали на поверхности океана – микрокопии ураганов в атмосфере // VIII Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. ИКИ РАН. Москва, 15-19 ноября 2010 г. С. 226.
5. Должанский Ф.В., Крымов В.А., Манин Д.Ю. Устойчивость и вихревые структуры квазидвумерных сдвиговых течений // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 7. С. 1–47.
6. Дубина В.А., Фищенко В.К., Константинов О.Г., Митник Л.М. Интеграция спутниковых данных и наземных видеонаблюдений в системах мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №3. С. 188-196.
7. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592-605.
8. 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.
9. 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. 2010. Т. 7. № 1. С. 248-259.
10. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 155-164.
11. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72-79.
12. Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. II. С. 206-215.
13. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 296 с.
14. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
15. Alpers W., Huhnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. 94. C5. 6251–6265.
16. Boubnov B.M., Golitsyn G.S. Convection in Rotating Fluids. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
17. Dokken S.T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Rapport 96/01463, 1996.
18. Eldevik T., Dysthe K.B. Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. №3. P. 851-869.
19. Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., and Knulst J.C. COASTWATCH '95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // J. Geophys. Res. 1998. 103. P. 24969-24982.
20. Fu L.-L., Holt B. Seasat views oceans and sea ice with Synthetic Aperture Radar. JPL publication 81-120, February 15, 1982.
21. Ivanov A.Yu., Ginzburg A.I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images. Proceedings of the Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sciences, 111(3), 281–295, 2002.
22. 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, The Netherlands:1994. 106 p.

23. Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., and Chapron B. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // *J. Geophys. Res.* 2005. 110. C07017, doi:10.1029/2004JC002802.
24. Karimova S.S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>.
25. Karimova S. SAR observations of spiral eddies in the inner seas // Proc. 4th International Workshop SeaSAR 2012. 18-22 June 2012. Tromsø, Norway.
26. Lapeyre G., Klein P. Impact of the small-scale elongated filaments on the oceanic vertical pump // *Journal of Marine Research*, 2006, 64(6), 835-85.
27. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the sea // *Proc. R. Soc. Lond.*, 456, 1217-1280, 2000.
28. Sandven S., Johannessen J.A., Kloster K., Hamre T., Sætre H.J. Satellite Studies of Ocean Fronts and Eddies for Deepwater Development in the Norwegian Sea // Proc. Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle, USA, May 28. June 2, 2000.
29. Shen C.Y. and Evans T.E. Inertial instability and sea spirals // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(23), 2124, doi:10.1029/2002GL015701.
30. Yamaguchi S., Kawamura H. SAR-imaged spiral eddies in Mutsu Bay and their dynamic and kinematic models // *Journal of Oceanography*, 2009, 65(4), 525-539.

Seasonal and interannual variability of submesoscale eddy activity in the Baltic, Black and Caspian seas

S.S. Karimova

Space Research Institute of RAS
E-mail: feba@list.ru

Due to their high spatial resolution, wide swath of observation, independence on cloud cover and light conditions satellite synthetic aperture radar (SAR) images present an effective tool for getting more information on submesoscale eddies in the sea. Recently the advantages of SAR images were taken for retrieving statistics on submesoscale vortical structures in the Baltic, Black and Caspian seas [Karimova S.S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>]. The dataset used in that analysis included over 2000 medium resolution Envisat ASAR and ERS-2 SAR images obtained in 2009-2010 in the different parts of the seas mentioned. The work presented hereafter is aimed to exclude the influence of SAR density inhomogeneity on spatio-temporal parameters of submesoscale eddy activity in the basins being under consideration. As a result of the analysis undertaken it was discovered that in some cases visible eddy activity seems to depend on chlorophyll *a* concentration. A probable oceanographic factor which caused especially frequent detection of eddies in certain regions was discovered to be shallow location of thermo- or halocline. The latter provided an evidence for baroclinic instability to be a main reason for generation of submesoscale eddy clusters.

Keywords: submesoscale eddies, small-scale eddies, spiral eddies, baroclinic instability, satellite radar, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, the Baltic Sea, the Black Sea, the Caspian Sea.