

Исследование нестационарных вихревых структур Черного моря по данным инфракрасных и оптических изображений

С.С. Каримова

Институт космических исследований РАН

E-mail: feba@list.ru

В работе рассматриваются мезомасштабные, преимущественно нестационарные, вихревые структуры Черного моря. На основе анализа шестилетнего массива данных NOAA AVHRR и Aqua MODIS осуществлена классификация вихревых структур, наиболее часто детектируемых на изображениях, получаемых указанными сенсорами. Для каждого класса исследованы особенности пространственного распределения вихрей по акватории моря, проведен статистический анализ их пространственного масштаба, а также выявлена сезонная и межгодовая изменчивость исследуемых параметров.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, нестационарные вихревые структуры, прибрежные антициклические вихри, вихревые цепочки, гибридные течения, NOAA AVHRR, Aqua MODIS, Черное море.

1. Введение

Спутниковые методы в настоящее время предлагают обширнейшие возможности для исследования гидродинамических процессов, происходящих в поверхностном слое морских вод. Благодаря регулярному поступлению объективной информации с высоким пространственным разрешением и широкой полосой обзора стало возможно изучение вихревых структур самого широкого пространственного спектра.

Использование спутниковой информации для исследования гидродинамических структур возможно в двух различных направлениях. В рамках первого из них возможно проведение подробного исследования зарождения и эволюции отдельного вихря и извлечение детальной информации о его индивидуальных особенностях при использовании достаточно кратковременных серий спутниковых изображений. Этот подход на протяжении длительного времени успешно применяется по отношению к вихревым структурам Черного моря (*Гинзбург, 1994, 1995; Гинзбург и др., 1996, 1998a, 1998b, 1998c, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b, 2002; Sur, Ilyin, 1997*).

В рамках второго подхода анализу подвергается большое количество вихревых структур на основе достаточно длительных наблюдений. Вследствие большого объема анализируемых данных подробное отслеживание всех свойств вихревых структур (например, времени жизни, скорости перемещения, орбитальной скорости и пр.) уже не представляется возможным. Зато в этом случае набирается материал для обобщающего статистического анализа обнаруженных вихрей.

В силу относительной труднодоступности спутниковых данных за длительные периоды времени и значительной трудоемкости анализа таких данных публикации с применением этого подхода значительно более редки. Автору известна только одна работа, в которой предпринята попытка обобщения данных о поверхностной циркуляции Черного моря на основе спутниковых данных за 2007 г. (*Попов, Матыгин, 2008*). Настоящая работа так же представляет собой одну из немногочисленных попыток применения этого подхода.

В данной работе детектируемые на спутниковых изображениях нестационарные мезомасштабные вихревые структуры Черного моря впервые рассматриваются практически во всей их совокупности и за достаточно длительный период – с 2005 по 2010 гг. Работа основана на данных NOAA AVHRR и Aqua MODIS, доступных на портале Морского гидрофизического института НАНУ, г. Севастополь (<http://dvs.net.ua/>).

2. Характеристика используемых данных

В работе был задействован следующий массив данных:

- карты температуры поверхности моря (ТПМ), полученные радиометрами AVHRR со спутников NOAA и MetOp-2 с сентября 2004 г. по декабрь 2010 г.; общее количество изображений свыше 5000;
- карты ТПМ, нормализованной яркости восходящего излучения (для канала 551 нм) и концентрации хлорофилла-а, полученные спектрорадиометром MODIS со спутника Aqua с апреля 2006 г. по декабрь 2010 г.; общее количество изображений около 550.

Указанные изображения покрывают всю акваторию Черного моря с пространственным разрешением ~1 км и временным разрешением в несколько часов.

Визуализация гидродинамических структур на спутниковых изображениях инфракрасного и видимого диапазонов возможна в случае, если в воде присутствуют какие-либо пассивные трассеры. В случае с картами ТПМ в качестве трассеров выступают термические фронтальные зоны, формируемые полем течений; для нормализованной яркости восходящего излучения это взвешенные в приповерхностной толще частицы как органического, так и неорганического происхождения; для концентрации хлорофилла-а – клетки фитопланктона.

В качестве примера используемых данных на рис. 1 представлены изображения, полученные AVHRR и MODIS квазисинхронно 20.06.2006 г.: а) ТПМ (AVHRR); б) нормализованная яркость восходящего излучения (MODIS); в) ТПМ (MODIS); г) концентрация хлорофилла-а (MODIS). Как можно заметить из приведенного примера, наибольшей информативностью в плане отображения вихревых структур отличается поле нормализованной яркости восходящего излучения (рис. 1б). В данном случае это объясняется тем обстоятельством, что изображения были получены в период очень интенсивного развития кокколитофорид, клетки которых выступили в качестве трассера поверхностной циркуляции вод. При обобщенном рассмотрении, в отсутствии цветения кокколитофорид, самым информативным параметром оказывается поле ТПМ, восстановленное по данным AVHRR. Более подробные результаты рассмотрения проявляемости вихревых структур на указанных изображениях можно найти в (Каримова, 2010).

Основной недостаток обсуждаемой категории спутниковых данных – помехи, создаваемые облачностью, которая в исследуемом районе наблюдается достаточно часто. Поэтому практически все задействованные изображения в той или иной мере покрыты облаками.

Чтобы исследовать возможное влияние межсезонной и межгодовой изменчивости облакного покрова на соответствующую наблюдающуюся динамику вихревых структур, был проделана следующая процедура. В случайном порядке было выбрано по одному изображению AVHRR за каждый день исследуемого периода. Все отобранные изображения были декодированы таким образом, что пространство, занятое облачным покровом, было обозначено белыми пикселями, а свободное от него – черными. После этого каждому изображению была

придана ненулевая прозрачность, и все изображения за интересующий период были наложены. Таким образом, на результирующих изображениях области, которые наиболее часто обозревались благодаря отсутствию облачного покрова, представлены более темными оттенками.

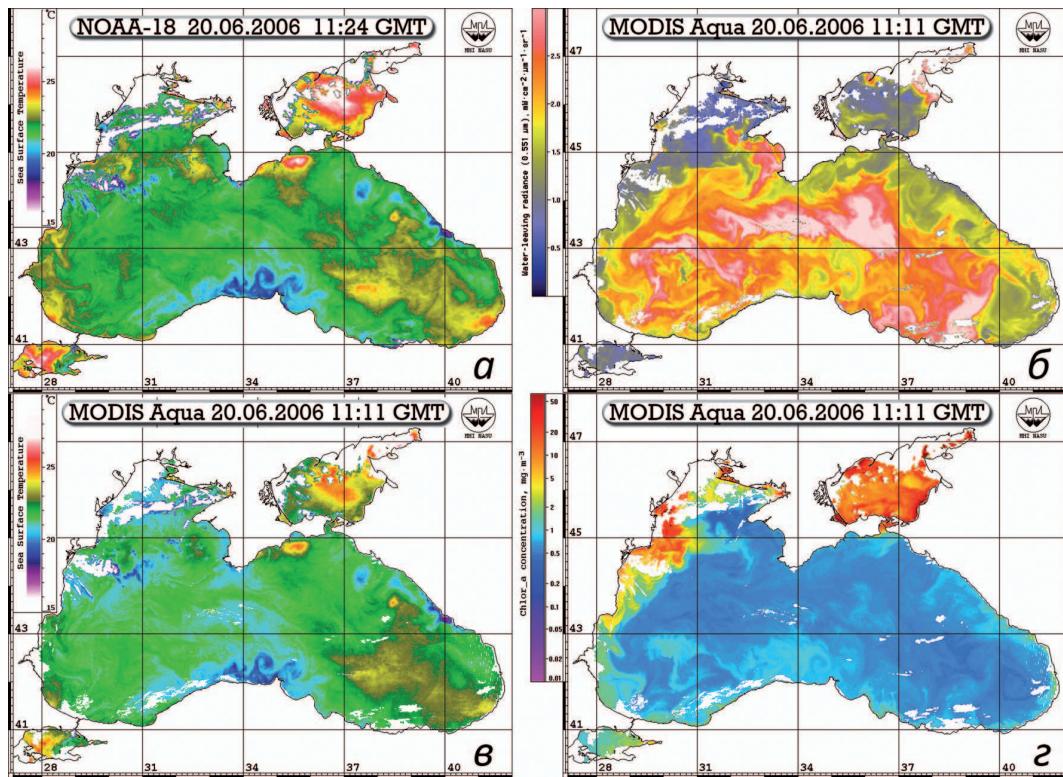


Рис. 1. Примеры используемых изображений: а) ТПМ по данным NOAA-18 AVHRR от 20.06.2006 г. 11:24 GMT; б) нормализованная яркость восходящего излучения по данным Aqua MODIS от 20.06.2006 г. 11:11 GMT; в) ТПМ по данным Aqua MODIS от 20.06.2006 г. 11:11 GMT; г) концентрация хлорофилла-а по данным Aqua MODIS от 20.06.2006 г. 11:11 GMT

Плотность облачного покрова за отдельные сезоны, оцененная по описанной выше методике, показана на рис. 2. Как можно заметить из представленных схем, в целом в весеннелетнее время отмечалась более низкая встречаемость облачного покрова, чем в осенне-зимнее. Что касается пространственного распределения полученного параметра, оно может быть оценено как равномерное и не влияющее на распределение исследуемых групп вихревых структур.

Соответствующий анализ межгодовой изменчивости облачного покрытия (схема здесь не представлена) позволил заметить, что наименьшие помехи, создаваемые облачностью, отмечались в 2006 г. Учитывая, что для большинства групп вихрей максимум встречаемости был отмечен в 2010 г., можно заключить, что изменчивость облачного покрова не была решающим фактором при выявлении межгодовой изменчивости встречаемости вихревых структур.

3. Классификация вихревых структур, детектируемых на спутниковых изображениях

В результате предварительного анализа указанных изображений и на основе классификации, приведенной в (Гинзбург, 1992) и проиллюстрированной в (Ivanov, Ginzburg, 2002), было замечено, что, как правило, на этих изображениях детектируются следующие типы вихревых структур:

- изолированные антициклонические вихри;
- прибрежные антициклонические вихри (ПАВ);
- гибовидные течения (вихревые диполи);
- вихревые цепочки;
- вихри Анатолийского побережья, которые, по-видимому, представляют собой региональную форму проявления неустойчивости Основного черноморского течения (ОЧТ).

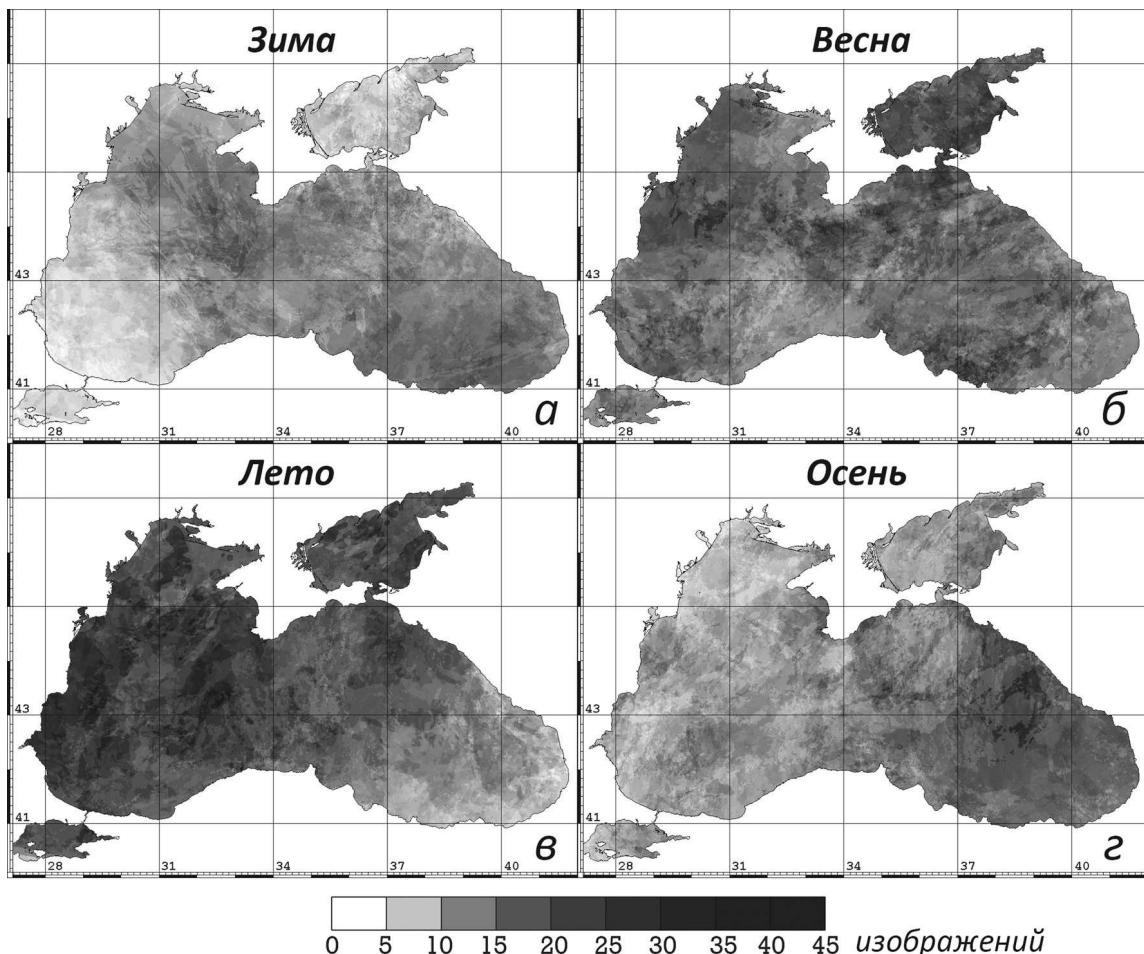


Рис. 2. Частота экспозиции акватории, обусловленная отсутствием облачного покрова, в различные сезоны: а) зима; б) весна; в) лето; г) осень. Чем темнее тон изображения, тем чаще эта акватория была видима на спутниковых изображениях

Вихри самой первой из перечисленных категорий представляют собой достаточно долгоживущие образования, обладающие определенной индивидуальностью местоположения, зарождения, развития и пр. Как правило, это так называемые квазистационарные вихри Черного моря. Вследствие их малочисленности и относительно редкой повторяемости к ним малоприменим статистический подход, который задействован в данной работе.

Таким образом, в дальнейшем будут обсуждаться только четыре категории вихрей. Эти вихри являются типичными нестационарными образованиями, что позволило вынести термин «нестационарный» в заглавие данной статьи.

Используемое в настоящем исследовании подразделение вихревых структур, возможно, является несовершенным. В частности, в более идеальном случае хотелось бы разделить классические гибовидные течения и случаи изолированных антициклонических вихрей с присоединенными к ним циклоническими (Гинзбург, 1991). К сожалению, помехи, созда-

ваемые облачным покровом, зачастую не позволяют проследить зарождение и развитие всех вихревых структур столь подробно, чтобы однозначно различать эти два случая. Поэтому на данном этапе эти группы рассматриваются совместно.

В категории вихревые цепочки так же следовало бы разделить случаи цепочек предположительно сдвиговых вихрей (Гинзбург, 1992; Ivanov, Ginzburg, 2002) и вихрей, образовавшихся на термическом фронте (Блатов и др., 1983; Гинзбург и др., 1998в, 2006; Федоров, 1983).

Тем не менее, несмотря на некоторую условность, представленная классификация представляет собой один из действенных подходов к решению достаточно сложной и трудоемкой задачи – статистическому исследованию нестационарных вихревых структур.

4. Анализ пространственного распределения вихревых структур

4.1. Прибрежные антициклонические вихри

Прибрежные антициклонические вихри (ПАВ) формируются между стрежнем ОЧТ и берегом, где вследствие бокового сдвига скорости существует зона антициклонической завихренности поля течений (Титов, 2002; Титов, Прокопов, 2002). Вследствие их генетических особенностей они обладают вытянутой вдоль берега эллиптической формой (Титов, 2002).

Пример визуализации ПАВ на изображении NOAA-15 AVHRR приведен на рис. 3а.

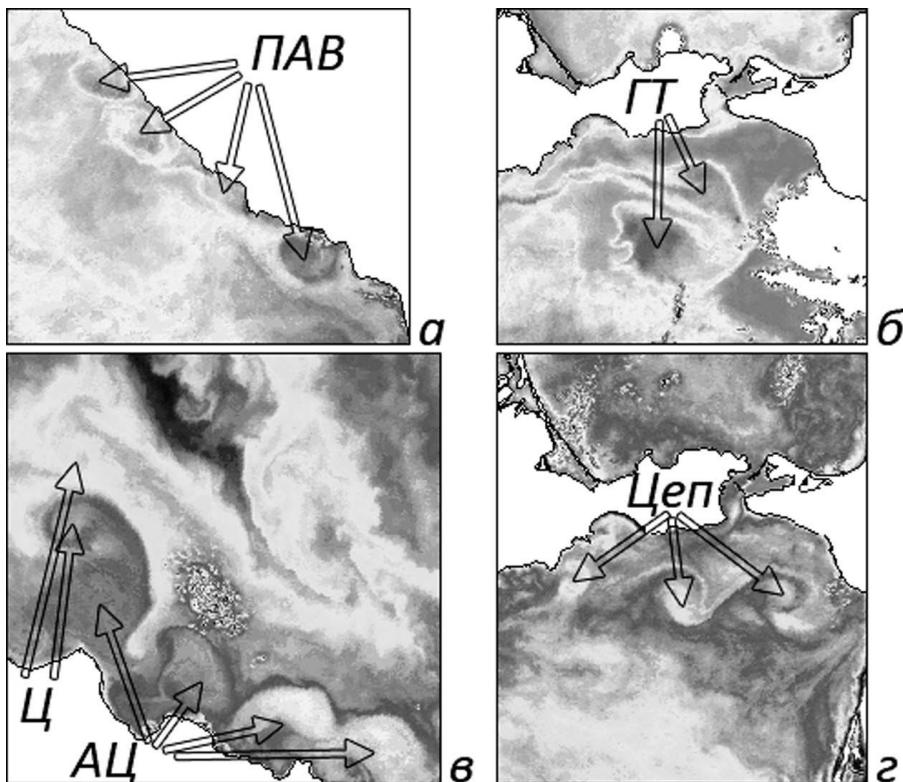


Рис. 3. Примеры визуализации исследуемых структур на изображениях ТПМ AVHRR: а) ПАВ – 27.07.2005 г. 14:30 GMT, NOAA-15; б) гибовидное течение – 14.08.2008 г. 18:54 GMT, MetOp-2; в) вихри Анатолийского побережья (АЦ – антициклонические, Ц – циклонические) – 28.11.2005 г. 04:07 GMT, NOAA-15; г) цепочка антициклонических вихрей – 14.05.2005 г. 00:34 GMT, NOAA-16. Стрелками показаны центры рассматриваемых вихревых структур

В работах (*Гинзбург и др., 2000б; Гинзбург и др., 2001а; Гинзбург и др., 2002*) показано, что ПАВ могут длительно и стремительно эволюционировать, а также превращаться в вихри открытого моря. Однако, здесь рассматриваются только ПАВ в начальной фазе их развития, т.е. указанной выше эллиптической формы и вида, продемонстрированного на рис. 3а. Такое ограничение было сделано потому, что для таких вихрей можно однозначно указать их принадлежность к ПАВ, в то время как происхождение более крупных вихрей, находящихся в большей удаленности от берега, не столь очевидно.

Все обнаруженные ПАВ были нанесены на обобщенную схему, где каждый ПАВ обозначен эллипсом с ненулевой прозрачностью. В результате наложения многочисленных эллипсов происходит затемнение фона изображения. Полученная таким образом схема показана на рис. 4.

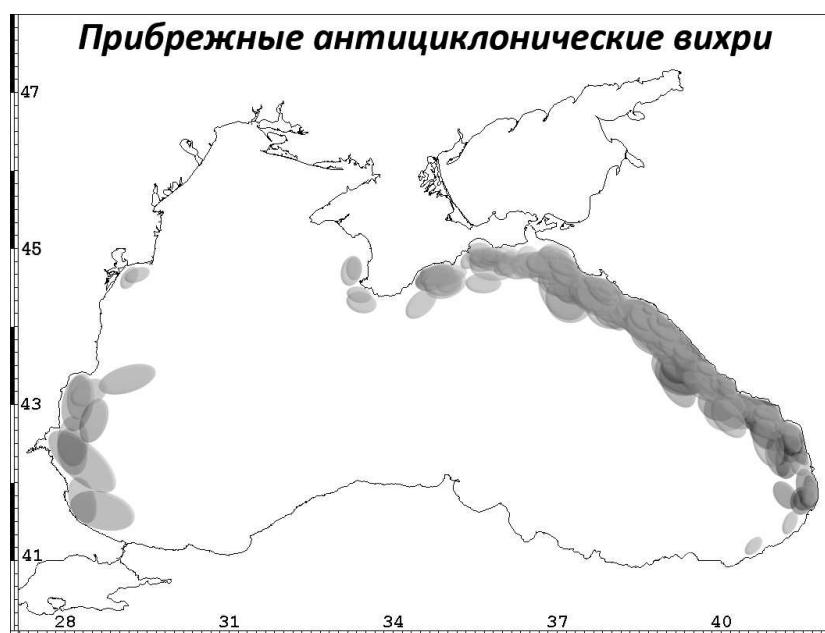


Рис. 4. Схема пространственного распределения обнаруженных ПАВ

Как можно заметить из схемы, наиболее часто формирование ПАВ происходит вдоль Кавказского побережья и южного побережья Крымского полуострова. Единичные ПАВ были детектированы у болгарского и румынского побережий. Таким образом, можно прийти к выводу, что ПАВ образуются у побережий с минимальной шириной шельфа, где ОЧТ может подходить максимально близко к берегу (кроме Анатолийского побережья, где обнаруживаются специфические вихревые структуры, обсуждаемые ниже в разделе «Вихри Анатолийского побережья»).

Распределение обнаруженных ПАВ в отдельные сезоны представлено на рис. 5. Количественно ПАВ распределились по сезонам в следующем порядке: лето (80), осень (76), весна (55) и зима (41 ПАВ). Совмещая графические данные рис. 5 и приведенные количественные значения, можно заметить, что, несмотря на численное преобладание в летне-осенне время, более крупные ПАВ наблюдались в зимне-весенний период.

Детектирование максимального количества ПАВ летом является достаточно неожиданным наблюдением. Как известно, наибольшая интенсивность ОЧТ отмечается в зимнее время (*Sur, Ilyin, 1997; Zatsepин et al., 2003*), поэтому тогда и следовало ожидать максимального числа ПАВ, обнаруживаемых на изображениях. Возможно, проявлению большего

количества вихрей зимой помешал либо облачный покров, либо отсутствие достаточного количества трассеров в прибрежных водах.

В межгодовом плане максимальное количество ПАВ было обнаружено в 2010 г. (105) и 2008 г. (51 ПАВ).

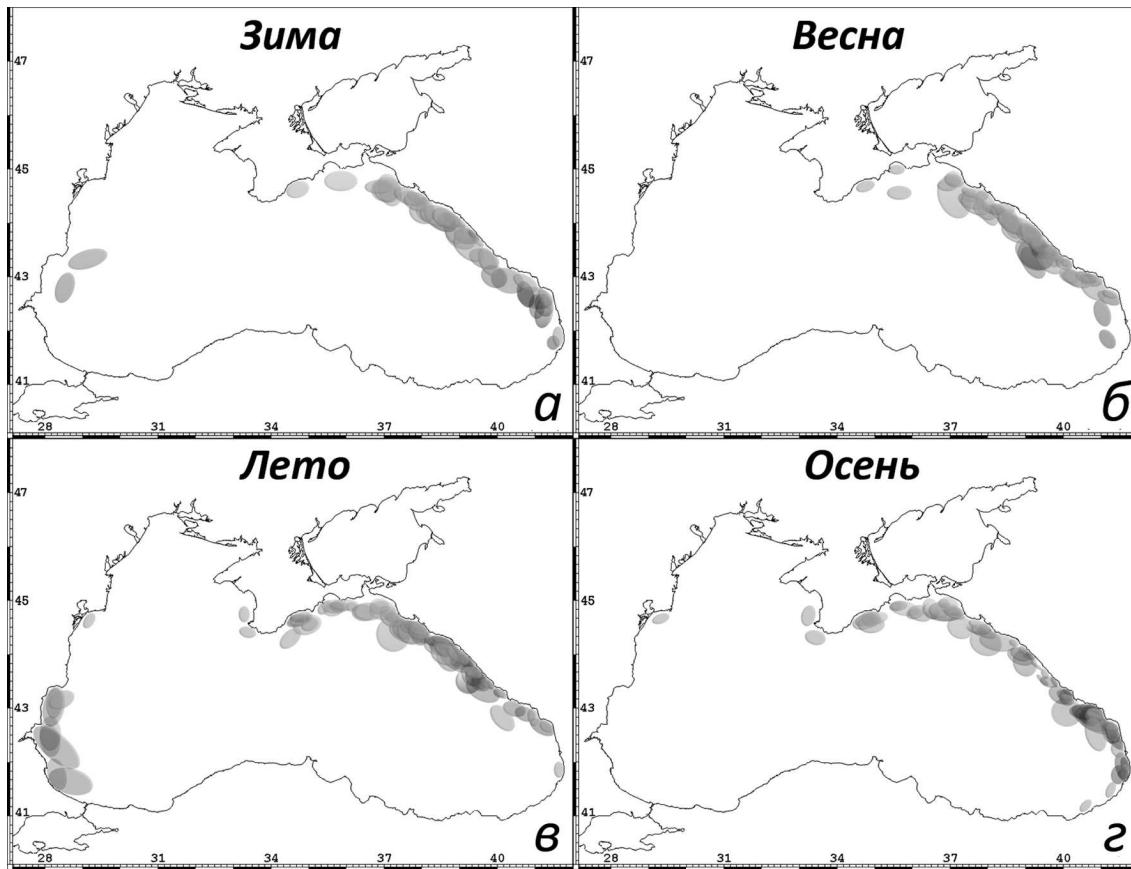


Рис. 5. Схема пространственного распределения ПАВ, обнаруженных в различные сезоны

4.2. Грибовидные течения

Как уже указывалось ранее, в данной категории рассматриваются все обнаруженные вихревые диполи – как «классические» грибовидные течения, так и случаи формирования присоединенного циклонического вихря на периферии относительно стационарного антициклонического вихря (Гинзбург, 1991).

Пример визуализации грибовидной структуры на изображении MetOp-2 AVHRR приведен на рис. 3б.

Схема пространственного распределения всех обнаруженных диполей показана на рис. 6. Как следует из схемы, наиболее часто грибовидные структуры наблюдались в зоне ОЧТ вдоль западного побережья моря с областью особенно повышенной их обнаруживаемости в районе, относимом к Севастопольскому квазистационарному вихрю. По-видимому, частое наблюдение здесь грибовидных структур объясняется частым формированием присоединенных вихрей на периферии Севастопольского антициклона.

Вторая область частого наблюдения грибовидных структур расположена вдоль Кавказского побережья. В данном случае усиление плотности отмечается в районе Батумского квазистационарного вихря.

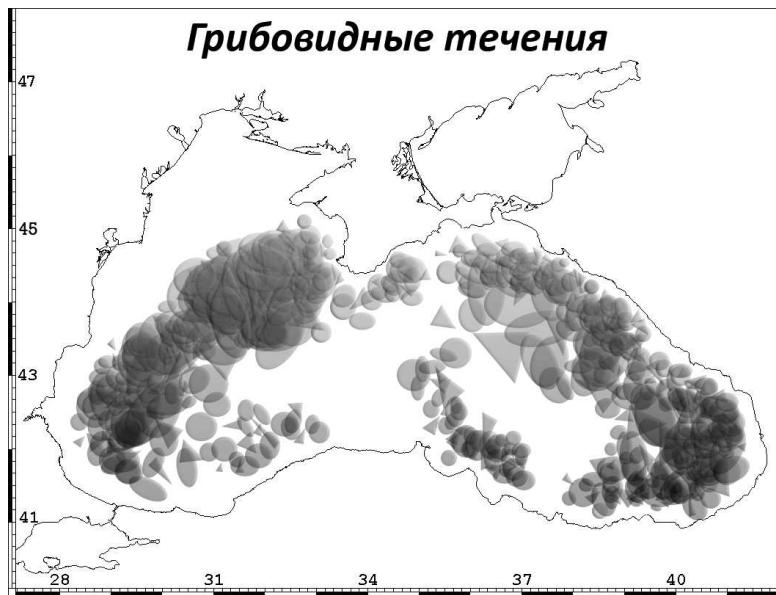


Рис. 6. Схема пространственного распределения обнаруженных грибовидных структур

По нашему предположению, детектирование максимального количества грибовидных структур в указанных районах вдоль западного и восточного побережий связано с тем, что в данных районах моря на неустойчивость ОЧТ (наблюдающуюся на всем его протяжении) накладывается также интенсивное ветровое воздействие.

Схемы расположения грибовидных структур, обнаруженных в отдельные сезоны, приведены на рис. 7. Максимальное количество структур (154 из 279) было зафиксировано в весенний период. В межгодовом разрезе наибольшее количество наблюдалось в 2007, 2008 и 2009 гг. – 61, 58 и 53 грибовидных структуры, соответственно.

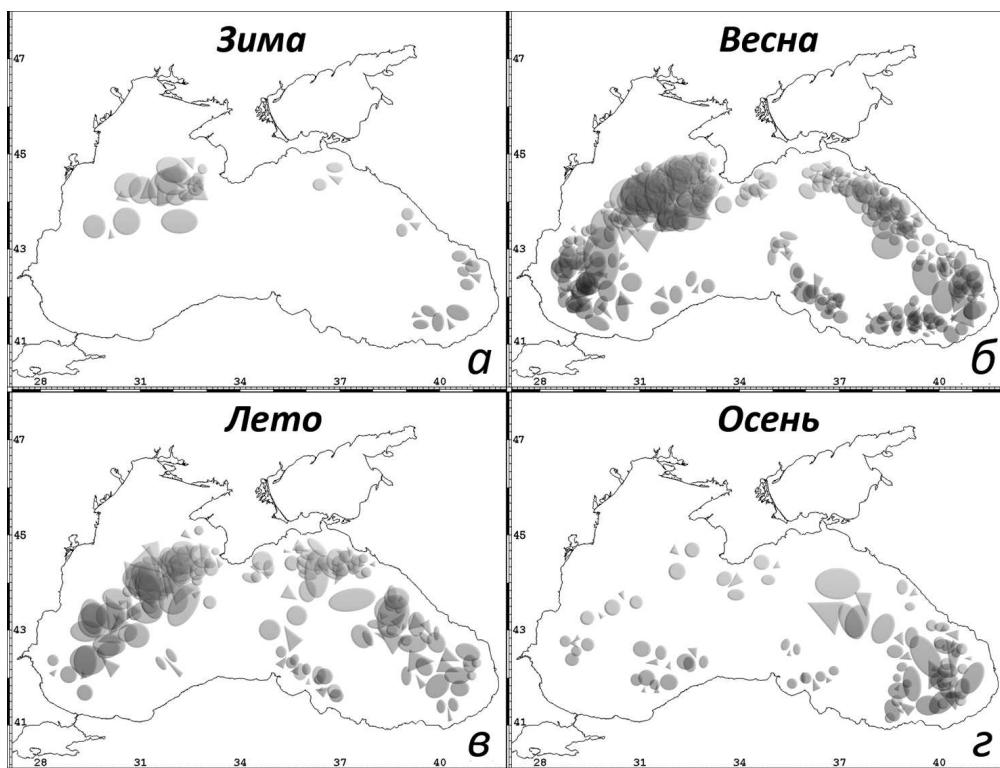


Рис. 7. Схема пространственного распределения грибовидных структур, обнаруженных в различные сезоны

4.3. Вихри Анатолийского побережья

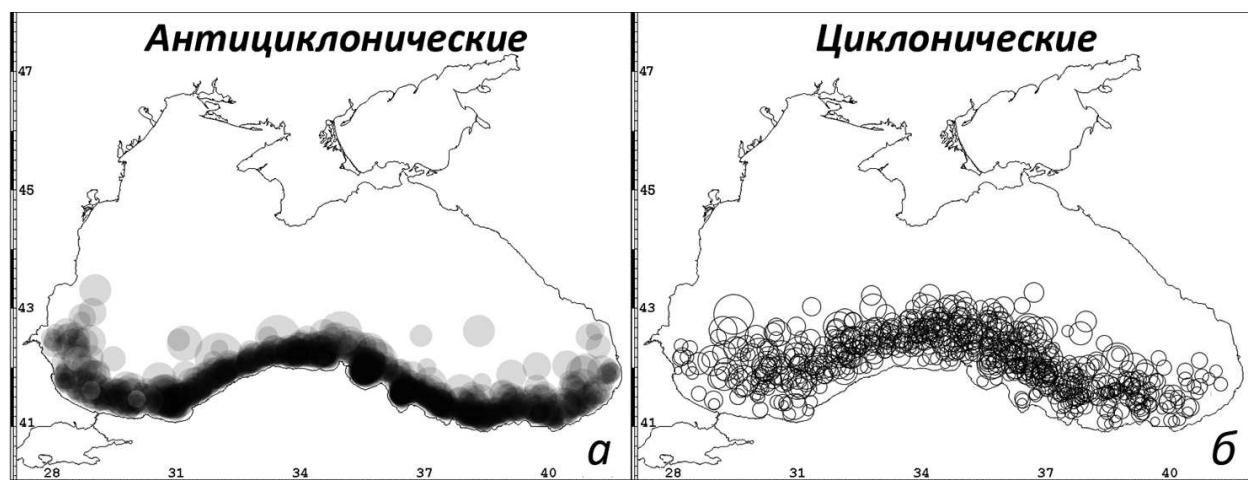
По результатам анализа спутниковых изображений было сделано наблюдение о том, что у Анатолийского побережья моря формируются вихревые структуры, отличные и от гибридных течений, и от ПАВ, и от цепочек вихрей. Эти структуры представляют собой ряд антициклонических вихрей, непосредственно примыкающих к берегу, во многих случаях сопровождающийся рядом циклонических вихрей, расположенных далее к северу (рис. 3в).

По-видимому, вихри Анатолийского побережья являются региональной формой проявления неустойчивости ОЧТ в этом районе моря, обусловленной его спецификой.

На рис. 8 представлены обобщенные схемы обнаруженных вихрей. На этих и последующих схемах антициклонические вихри обозначены серыми кругами, а циклонические – черными окружностями.

Представленные схемы отчетливо демонстрируют, что антициклонические вихри (рис. 8а) встречаются практически на каждом участке южного побережья, хотя особенно часто их можно было наблюдать в полукруглых заливах, которыми особенно изобилует восточная половина южного берега моря.

Циклонические вихри (рис. 8б), как и антициклонические, обнаруживаются вдоль всего побережья, но максимум их плотности находится на некотором удалении от берега, за полосой антициклонических вихрей. Примечательно, что северная граница распространения циклонических вихрей доходит до центральных частей моря. Таким образом, можно заключить, что система вихрей Анатолийского побережья принимает особенно активное участие в процессах горизонтального переноса и перемешивания вод.



Особенности сезонного распределения вихрей показаны на рис. 9. Как и в случае с гибридными течениями, максимальное количество вихрей Анатолийского побережья – как антициклонических, так и циклонических – было обнаружено в весенний период. В это время было детектировано 252 из 771 антициклонического вихря и 258 из 678 циклонических.

При сравнении значений за отдельные годы максимальное количество вихрей было обнаружено в 2010 г. – 234 антициклонических и 194 циклонических.

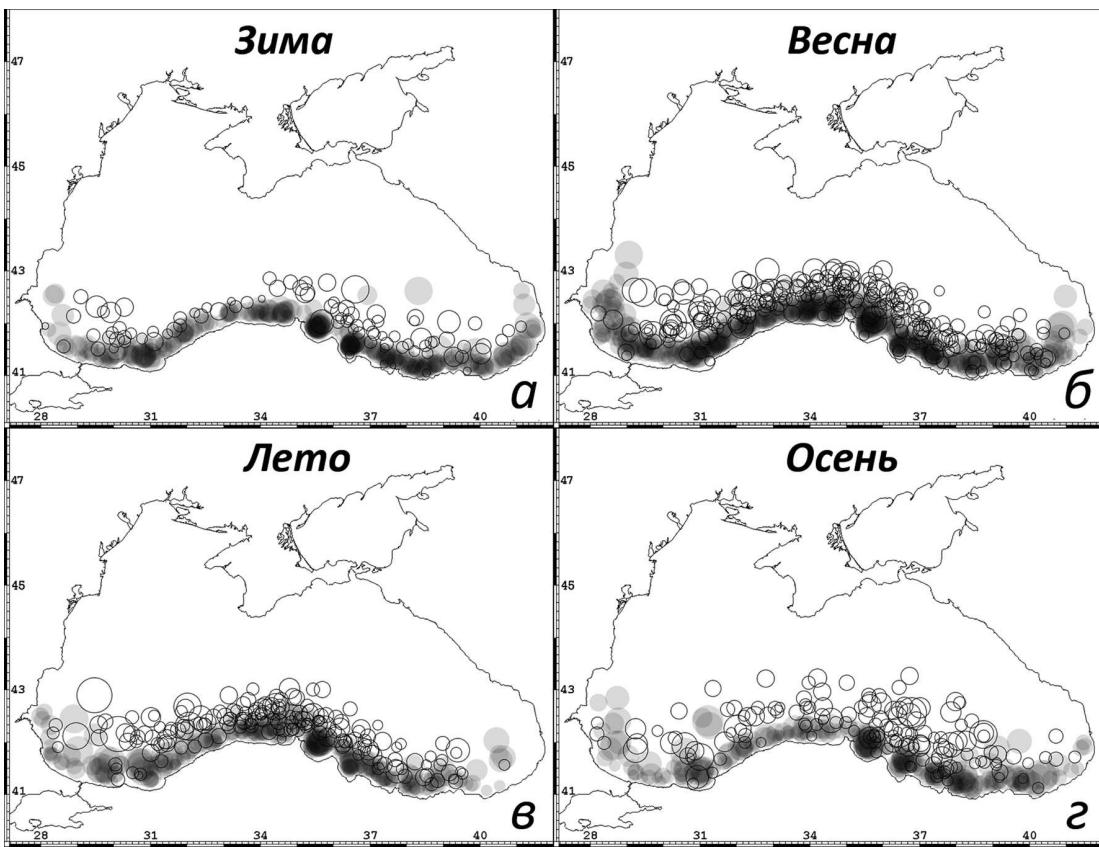


Рис. 9. Схема пространственного распределения вихрей Анатолийского побережья, обнаруженных в различные сезоны

4.4. Вихревые цепочки

В данном разделе рассматриваются все обнаруженные линейно ориентированные группы вихрей одного знака, объединенные отчетливо прослеживаемой струей.

При описанном подходе сюда попадают две категории цепочек. Первая – это цепочки сдвиговых вихрей, которые могут быть как циклонические, так и антициклонические по знаку вращения составляющих их вихрей (Гинзбург, 1992; Ivanov, Ginzburg, 2002).

Другой распространенный фактор проявления вихревых цепочек на изображениях ИК диапазона – образование вихрей вследствие неустойчивости на термических фронтах (Блатов и др., 1983; Гинзбург и др., 1998в, 2006; Федоров, 1983). Такие вихри всегда циклонические и, как правило, меньшего диаметра, чем сдвиговые вихри.

Пространственное распределение обнаруженных цепочек показано на рис. 10. Как и в случае с вихрями Анатолийского побережья, антициклонические вихри обозначены серыми кругами, а циклонические – черными окружностями.

Как легко заметить, антициклонические вихри были обнаружены преимущественно вдоль северного участка зоны ОЧТ (рис. 10а), в то время как циклонические – вдоль северо-восточного участка (рис. 10б).

Распространение вихрей в отдельные сезоны показано на рис. 11. Максимальная интенсивность антициклонических вихрей отмечалась в весеннее время (91 из 179 вихрей), а циклонических – в осенне (41 из 113).

При межгодовом рассмотрении больше всего цепочек было зафиксировано в 2010 г. – 44 и 45 вихрей для антициклонических и циклонических цепочек, соответственно.

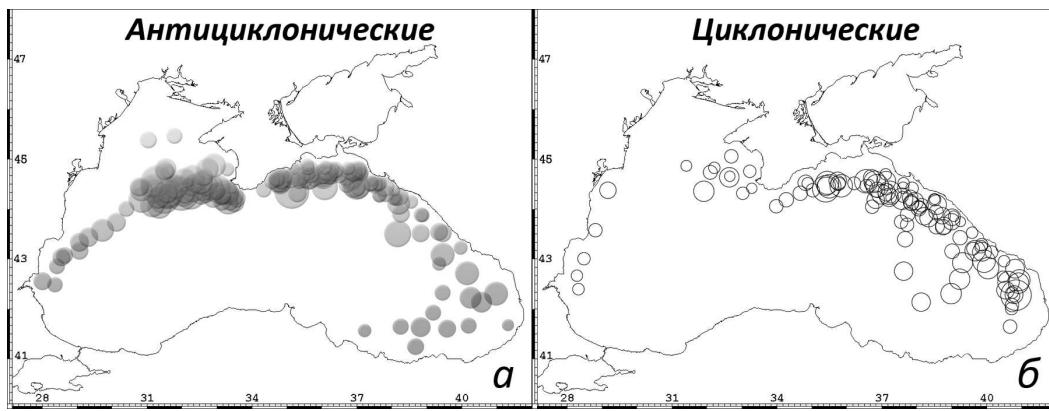


Рис. 10. Схема пространственного распределения обнаруженных вихревых цепочек

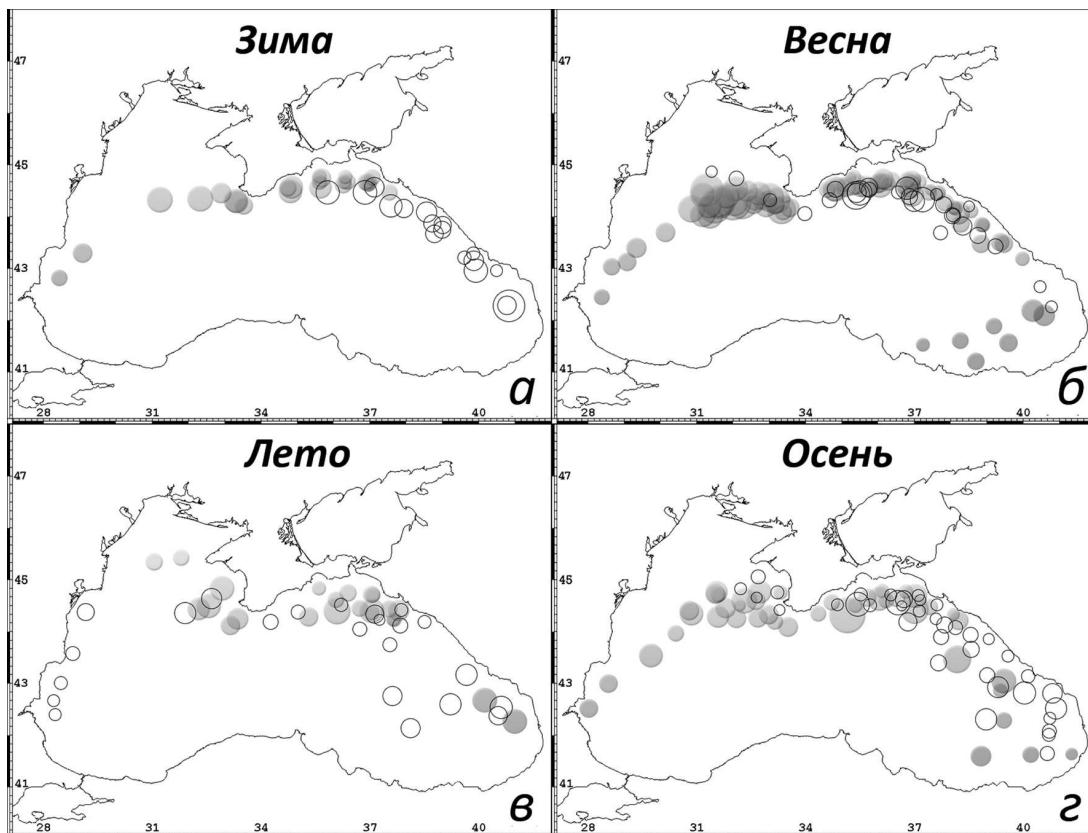


Рис. 11. Схема пространственного распределения вихревых цепочек, обнаруженных в различные сезоны

5. Анализ пространственного масштаба вихревых структур

Для обнаруженных вихревых структур был определен их пространственный масштаб. В качестве такового выступал либо диаметр, либо – в случае с эллиптичными вихрями – длина большой оси эллипса. Для грибовидных структур измерялась ширина «шляпки» «гриба», т.е. сумма диаметров антициклонического и циклонического вихрей грибовидной структуры; при последующем анализе эта ширина была поделена на два.

В таблице 1 представлены оцененные выборочные статистики для всех рассматриваемых групп вихрей: число обнаруженных вихрей (N), диапазон полученных значений диаметра вихрей, мода, медиана, среднее, среднее квадратическое отклонение (СКО) и 95% доверительный интервал (ДИ) для среднего.

Таблица 1. Статистические характеристики диаметра обнаруженных вихрей
(все параметры, кроме N and χ^2 , даны в километрах)

Тип вихрей	N	Диапазон	Мода	Медиана	Среднее	СКО	95% ДИ	μ	σ	χ^2
ПАВ	252	24-92	48	48.5	50.6	13.8	0.9	47.3	15.9	0.016
Грибовидные структуры	279	16-147	36	48	52.2	20.5	1.3	43.6	19.6	0.013
ВАП АЦ	771	24-93	47	50	50.5	11.4	0.4	49.5	10.0	0.025
ВАП Ц	678	13-101	28	33	35.0	11.6	0.5	31.9	10.8	0.032
Цепочки АЦ	179	19-113	49	52	55.9	16.8	1.3	52.3	15.6	0.024
Цепочки Ц	113	17-79	30	32	35.9	12.2	1.2	30.4	9.5	0.015

СКО – среднее квадратическое отклонение; ДИ – доверительный интервал; ВАП – вихри Анатолийского побережья; АЦ – антициклические; Ц – циклонические

Гистограммы частотного распределения диаметров для отдельных групп вихрей показаны на рис. 12. Рассмотрим особенности каждого из полученных распределений.

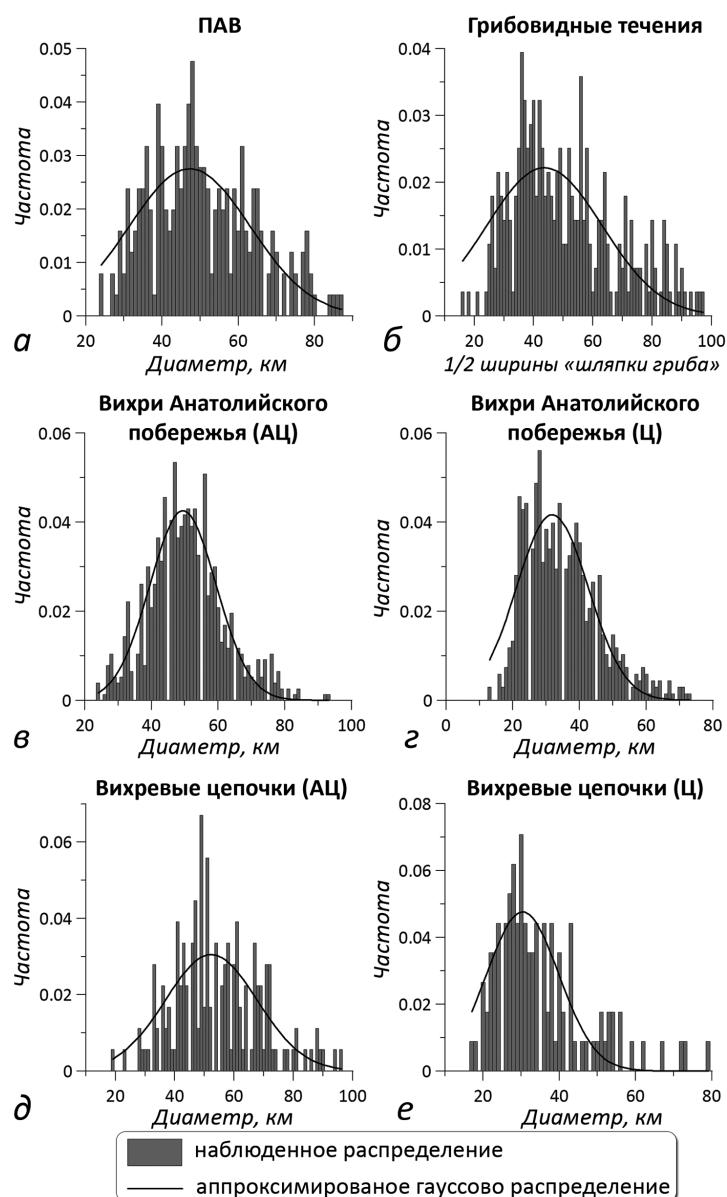


Рис. 12. Частотные гистограммы диаметров вихрей различных групп: а) ПАВ; б) грибовидные структуры; в) антициклические вихри Анатолийского побережья; г) циклонические вихри Анатолийского побережья; д) антициклические вихри в цепочках; е) циклонические вихри в цепочках

Для ПАВ (общее количество вихрей 252) была получена достаточно симметричная гистограмма (рис. 12а) с выборочными оценками среднего около 48-50 км (таблица 1).

Размер грибовидных структур (всего 279 экземпляров) отличался наибольшим разнообразием. Для них была получена наименее симметричная гистограмма (рис. 12б), наибольший диапазон значений (от 16 до 147 км), а также максимальное значение СКО (таблица 1). В результате асимметричности распределения для этой группы вихрей также отмечается наибольшая разница значений между модой (36 км) и средним (52,2 км).

Вихри Анатолийского побережья – самая многочисленная из анализируемых групп. Всего было зафиксировано 771 антициклонических и 678 циклонических вихрей. Основная особенность распределения значений диаметра этих вихрей заключается в том, что все выборочные оценки среднего для антициклонических вихрей превышают соответствующие оценки для циклонических (таблица 1). В частности, выборочное среднее составило 50,5 и 35,0 км соответственно для первых и для вторых.

Гистограмма распределения диаметров антициклонических вихрей отличается наиболее совершенной и симметричной формой из всех рассмотренных групп вихрей (рис. 12в). Гистограмма для циклонических вихрей, напротив, существенно асимметрична с крутым левым склоном и пологим правым (рис. 12г). Однако, в отличие от асимметричности гистограммы для грибовидных структур, возможно, что это «устранимая» асимметрия. При анализе спутниковых данных, которые были задействованы в данной работе, структуры с диаметром менее 20 км практически не детектируются, что, возможно, и обусловило крутизну левого склона гистограммы на рис. 12г. Таким образом, если дополнить имеющиеся измерения наблюдениями по данным с более тонким пространственным разрешением, то, возможно, мы получим симметричную гистограмму.

Вихревые цепочки представляют собой самые малочисленные из рассматриваемых групп вихревых структур. В них было обнаружено 179 антициклонических вихрей и 113 циклонических. В целом, для вихревых цепочек наблюдаются те же закономерности, что и для вихрей Анатолийского побережья. Во-первых, выборочные оценки среднего для антициклонических вихрей больше, чем для циклонических (таблица 1). Так, выборочное среднее составило 55,9 км для первых и 35,9 км для вторых. Во-вторых, гистограмма для антициклонических вихрей (рис. 12д) значительно более симметрична, чем для циклонических (рис. 12е).

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

При оценке соответствия аппроксимированных распределений наблюденным с помощью кумулятивной тестовой статистики Пирсона было выявлено, что наилучшим аппроксиматором для всех групп вихрей является гауссово распределение. Параметры этого распределения показаны в таблице 1. Они включают среднее (μ), стандартное отклонение (σ) и кумулятивную тестовую статистику (χ^2). Графики полученных аналитических распределений показаны на гистограммах рис. 12 сплошными линиями.

Также была рассмотрена межсезонная и межгодовая изменчивость среднего диаметра вихрей. Графики изменения среднего диаметра по сезонам представлены на рис. 13. Отрезками показаны величины 95% доверительных интервалов.

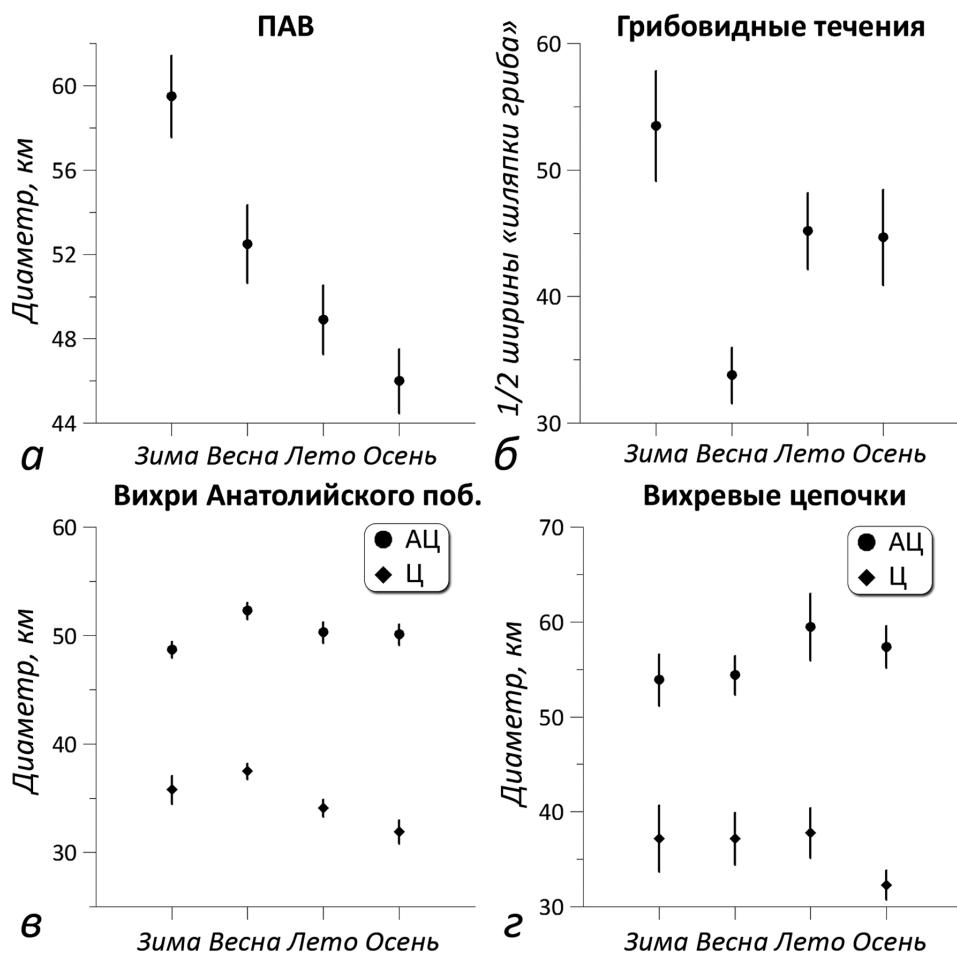


Рис. 13. Межсезонный ход среднего диаметра различных групп вихрей: а) ПАВ; б) грибовидные структуры; в) вихри Анатолийского побережья; г) вихревые цепочки. Отрезки соответствуют величинам 95% доверительных интервалов среднего

Анализ полученных графиков позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, средние значения диаметров по отдельным сезонам демонстрируют значительную изменчивость. Однако сравнение хода значений среднего диаметра с соответствующим количеством обнаруженных в данный сезон вихревых структур показало, что в целом величина среднего диаметра обратно пропорциональна количеству вихрей, участвовавших в осреднении. Таким образом, видимо, в те сезоны, когда были получены большие значения средних диаметров, вихри меньших размеров не смогли проявиться на изображениях и не были детектированы.

Во-вторых, графики межсезонного хода среднего диаметра для различных групп вихрей демонстрируют рассогласованность, т.е. минимумы и максимумы для различных групп отмечались в различные сезоны. Тем не менее, при сравнении хода антициклонических и циклонических вихрей – как для вихрей Анатолийского побережья, так и для вихревых цепочек – легко заметить, что соответствующие графики практически повторяют друг друга.

Графики для межгодовой изменчивости среднего диаметра вихрей показаны на рис. 14. В отличие от межсезонной изменчивости, в данном случае полученные графики более коррелированы между собой. Например, минимум для большинства графиков был зафиксирован в 2007 г. В то же время графики для антициклонических и циклонических вихрей одной группы, наоборот, рассогласованы.

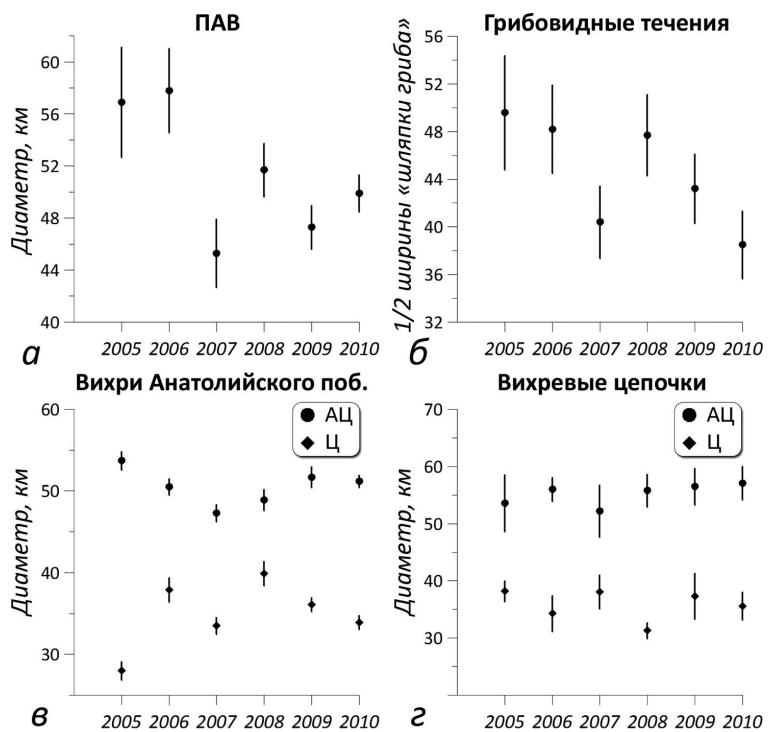


Рис. 14. Межгодовой ход среднего диаметра различных групп вихрей: а) ПАВ; б) грибовидные структуры; в) вихри Анатолийского побережья; г) вихревые цепочки. Отрезки соответствуют величинам 95% доверительных интервалов среднего

6. Заключение

На основе анализа ~5550 изображений NOAA AVHRR и Aqua MODIS, полученных в 2005-2010 гг., были исследованы пространственно-временные характеристики нестационарных вихревых структур Черного моря.

Было обнаружено, что наиболее часто на указанных изображениях наблюдаются четыре основные группы вихрей: ПАВ, грибовидные течения, вихри Анатолийского побережья и вихревые цепочки.

Анализ пространственного распределения исследуемых структур показал, что практически все они располагаются в зоне ОЧТ. При этом каждая из рассматриваемых групп обладает своим «ареалом» распространения. Так, грибовидные структуры чаще всего наблюдаются в зоне ОЧТ вдоль западного и восточного побережий бассейна с особым усиливанием частоты в районах квазистационарных вихрей (соответственно, Севастопольского и Батумского). Вихревые цепочки антициклонического и циклонического знака детектируются вдоль северного и северо-восточного побережий моря, соответственно. Вдоль Анатолийского побережья возникает особенная, гибридная, форма проявления неустойчивости ОЧТ, представляющая смесь грибовидных структур и вихревых цепочек. ПАВ, как правило, обнаруживаются в областях с минимальной шириной шельфа (кроме Анатолийского побережья, где формируются уже упомянутые специфические структуры).

Практически все рассматриваемые группы вихрей продемонстрировали значительную межсезонную изменчивость частоты их проявления. Так, наибольшее количество вихрей всех групп кроме ПАВ и циклонических вихревых цепочек было отмечено в весенне-летнее время. ПАВ в максимальном количестве наблюдались в летне-осенне время, а циклонические вихревые цепочки – осенью.

В межгодовом аспекте наибольшее количество вихрей было обнаружено в 2010 г., что, возможно, связано с наибольшим количеством данных, которые были получены в этом году.

Пространственный масштаб (диаметр) анализируемых структур варьировал от 13 до 147 км. Характерный размер циклонических вихрей оказался значительно меньшим, чем для антициклонических. Так, значения моды для диаметра циклонических вихрей составили 28-30 км, а для антициклонических – 47-49 км. Частотные гистограммы распределения измеренных диаметров для антициклонических вихрей продемонстрировали симметричную форму, которая достаточно хорошо аппроксимируется гауссовым распределением. Гистограммы для циклонических вихрей и грибовидных структур обладают значительной асимметрией с крутым левым склоном и растянутым правым. Причины выявленных особенностей требуют дальнейших исследований.

Анализ межсезонной и межгодовой изменчивости среднего диаметра исследуемых групп вихрей не выявил каких-либо однозначных тенденций.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №10-05-00428-а и №11-07-12025-офи-м.

Данные AVHRR и MODIS получены на Морском портале Морского гидрофизического института НАНУ, г. Севастополь. Автор благодарен рецензенту за ценные замечания по улучшению рукописи статьи.

Литература

1. *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.
2. *Sur H., Ilyin Y.* Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea, Progress in Oceanography, 39, pp. 109-151, 1997.
3. *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. Journal of Geophysical Research, 108(C8), 3246, doi:10.1029/2002JC001390, 2003.
4. *Блатов А.С., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С.* Среднемасштабные вихри в Мировом океане и их географическое распространение // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1983. №4. С. 28-36.
5. *Гинзбург А.И.* Нестационарные диполи и мультиполи как закономерность эволюции изолированного вихря (спутниковая информация) // Исследование Земли из космоса, 1991. №2. С. 75-84.
6. *Гинзбург А.И.* Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология, 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997-1004.
7. *Гинзбург А.И.* О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря // Исследование Земли из космоса, 1995. №4. С. 10-16.
8. *Гинзбург А.И.* Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря // Исследование Земли из космоса, 1994. №2. С. 75-83.
9. *Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др.* Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001а. №5. С. 3-11.
10. *Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др.* Отделение прибрежных антициклонических вихрей от Кавказского берега и их трансформации в вихри открытого моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. Зацепина А.Г., Флинта М.В. М.: Наука, 2002. С. 83-90.
11. *Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др.* 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.

12. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П. и др. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // Исследование Земли из космоса, 2000а. №3. С. 71-81.
13. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонического вихря в северо-восточной части Черного моря летом-осенью 1993 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001б. №2. С. 69-75.
14. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Изменчивость вихревой картины в юго-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса, 1998б. №6. С. 3-15.
15. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исследование Земли из космоса, 1998в. № 3. С. 83–88.
16. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Исследование Земли из космоса, 1996. №4. С. 67-76.
17. 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) // Исследование Земли из космоса, 2000б. №1. С. 3-14.
18. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Шеремет Н.А. Фронтальная зона апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря (спутниковые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2006. №4. С. 3-12.
19. Каримова С.С. Исследование субмезомасштабных вихрей Черного и Балтийского морей по радиолокационным и радиометрическим спутниковым данным // Электронный сборник докладов Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой». М.: Издательство JRE, 2010. С. 148-159.
20. Попов Ю.И., Матыгин А.С. Особенности циркуляции вод поверхностного слоя Черного моря по термическим спутниковым данным // Вісник Одеського державного екологічного університету, 2008. Вип.6. С. 217-224.
21. Титов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология, 2002. №4. С. 67-73.
22. Титов В.Б., Прокопов О.И. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря // Метеорология и гидрология, 2002. №5. С. 59-67.
23. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 296 с.

Investigation of non-stationary eddies in the Black Sea using satellite infrared and visible imagery

S.S. Karimova

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

Examination of non-stationary eddies in the Black Sea is presented based on satellite visible and infrared imagery. The images were obtained by the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) since September, 2004 to December, 2010. As a result of the analysis performed it was discovered that there were four main non-stationary eddy types which could be frequently observed in such imagery: near-shore anticyclonic eddies, mushroom-like currents, eddies of the Anatolian coast, and eddy chains. For each type of eddies, spatio-temporal parameters were retrieved such as areas of the most frequent generation and typical length scale as well as their seasonality and interannual variability.

Keywords: mesoscale eddies, non-stationary vortices, near-shore anticyclonic eddies, eddy chains, mushroom-like currents, eddy dipoles, AVHRR, MODIS, the Black Sea.