

Мелкомасштабные вихри Черного моря

А.Г. Костяной¹, А.И. Гинзбург¹, Н.А. Шеремет¹, О.Ю. Лаврова², М.И. Митягина²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997 Москва, Нахимовский проспект 36

E-mail: kostianoy@online.ru;

² Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Несмотря на усиленное внимание к исследованию вихревых процессов в океане, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные вихри с размерами 30–100 км. Влияние огромного числа факторов и разнообразие условий в реальном океане определяют неизбежную фрагментарность сведений о процессах формирования, развития и распространения вихрей малых масштабов (меньше радиуса деформации Россби). Систематического исследования, направленного на решение данной проблемы, до сих пор не проводилось, главным образом, по техническим причинам. Вихри малых масштабов достаточно сложны для исследования их традиционными методами в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни. В ходе работ по спутниковому мониторингу состояния морской поверхности, проводимых в течение последних 10 лет в прибрежных зонах Черного, Каспийского и Балтийского морей, на радиолокационных и оптических изображениях морской поверхности, получаемых с высоким пространственным разрешением (2.5–25–75 м), нами обнаружено большое количество вихрей малых размеров с диаметрами от сотен метров до десятка километров. Представлены примеры наблюдений мелкомасштабных вихрей в прибрежной зоне Черного моря и обсуждаются причины их формирования.

Ключевые слова: Черное море, мелкомасштабные вихри, радиолокационные спутниковые изображения, оптические изображения высокого разрешения, морская поверхность.

Введение

Несмотря на усиленное внимание к исследованию вихревых процессов в океане, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные вихри с размерами 30–100 км. Влияние огромного числа факторов и разнообразие условий в реальном океане определяют неизбежную фрагментарность сведений о процессах формирования, развития и распространения вихрей малых масштабов (меньше бароклинного радиуса деформации Россби R_d). Систематического исследования, направленного на решение данной проблемы, до сих пор не проводилось, главным образом, по техническим причинам. Вихри малых масштабов достаточно сложны для исследования их традиционными методами в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни. Обладая размерами, меньшими R_d (для Черного моря $R_d \approx 15–20$ км), они не всегда проявляются на спутниковых оптических и инфракрасных (ИК) изображениях стандартного километрового разрешения вследствие отсутствия тепловых или оптических контрастов, а также недостаточного пространственного разрешения. В ходе работ по спутниковому мониторингу состояния морской поверхности, в течение ряда лет проводимых в прибрежных зонах Черного, Каспийского и Балтийского морей, на радиолокационных и оптических изображениях морской поверхности,

получаемых с высоким пространственным разрешением (2.5–25–75 м), нами обнаружено большое количество вихрей малых размеров с диаметрами от сотен метров до десятка километров. На спутниковых радиолокационных и оптических изображениях данные вихри визуализируются, в основном, благодаря сливковым полосам. Данные слики образуются из-за наличия в прибрежных водах большого числа поверхностно-активных веществ (ПАВ) как естественного, так и искусственного происхождения, которые скапливаются вдоль линий конвергенций течений и таким образом как бы «прорисовывают» вихри на спутниковых изображениях. В статье представлены примеры наблюдений мелкомасштабных вихрей в Черном море и обсуждаются причины их формирования.

Мезомасштабные вихри Черного моря

Ограниченный водообмен с открытыми морями и небольшая толщина (100–150 м) кислородосодержащего (деятельного) слоя, связанная с наличием резкого пикно-халоклина, блокирующего вертикальное перемешивание и поступление кислорода в глубинный слой, делает экосистему Черного моря чрезвычайно чувствительной к климатическим изменениям и антропогенному воздействию. Усиление антропогенного стресса, обусловленного промышленно-хозяйственной активностью на берегу и в прибрежных районах (стоком рек, отходами городов и курортных зон, нефтяными терминалами и т.д.), увеличивает загрязнение и эвтрофикацию вод шельфовой зоны и может приводить к изменениям на экосистемном уровне. Поэтому изучение процессов горизонтального перемешивания и водообмена в Черном море, в том числе водообмена между прибрежной зоной и глубоководным бассейном (как механизма самоочистки вод шельфа), является задачей первостепенной важности.

Многочисленные спутниковые изображения ИК- и оптического диапазонов спектра сделали очевидным тот факт, что синоптическая картина течений в поверхностном слое Черного моря значительно сложнее, чем это следует из хорошо известных схем общей циркуляции в поверхностном слое Черного моря. Типичными элементами циркуляции Черного моря являются мезомасштабные (~20–100 км) вихри, вихревые диполи, струи, время жизни которых достигает нескольких месяцев. Накопленные за последние примерно 20 лет данные гидрологических съемок с мезомасштабным пространственным разрешением (5–10 км), спутниковые изображения с относительно высоким пространственно-временным разрешением (250 м - 1 км и 1 сутки), альтиметрические измерения со спутников ТОPEX/Poseidon и ERS-1, 2 (7 км и 5-10 суток), а также данные дрифтеров верхнего слоя со спутниковым определением координат дают представление о пространственно-временных и кинематических характеристиках мезомасштабных структур, местах их наи-

более частого образования и эволюции, факторах, способствующих их образованию, об их влиянии на структуру Основного черноморского течения (ОЧТ), а также их роли в горизонтальном и вертикальном водообмене в деятельном слое Черного моря. Основные результаты исследования мезомасштабной динамики Черного моря, ее связи с крупномасштабной циркуляцией вод, зависимости от ветрового воздействия и топографии континентального склона изложены в десятках работ (см. [1-7]).

Радиолокационные наблюдения мелкомасштабных прибрежных вихрей

Разрешающая способность ИК- и оптических изображений (250 м – 1 км), получаемых при помощи сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra и AVHRR ИСЗ NOAA, позволяет обнаруживать и изучать только мезомасштабные вихревые структуры с диаметрами более 20 км при отсутствии облачного покрова. Привлечение же к исследованию данных спутниковой радиолокации и продолжительные радиолокационные наблюдения морской поверхности в северо-восточной части акватории Черного моря [8] дали нам возможность выявить наличие вихревых структур значительно меньших масштабов (1–10 км) (см. [9–16]), чем описанные выше мезомасштабные вихри. Кроме того, на таких масштабах очень часто отсутствуют тепловые или оптические контрасты, достаточные для обнаружения вихревых структур. Вихри малых масштабов сложны для исследования и традиционными судовыми методами в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни (от нескольких часов до нескольких дней).

С 2006 г. Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) совместно с Институтом океанологии РАН (ИО РАН) принимал участие в спутниковом мониторинге состояния вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей, обеспечивая прием, обработку и интерпретацию радиолокационных данных [8–16]. Исследование вихрей малых масштабов базировалось на данных радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) ИСЗ ERS-2 и усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой (ASAR) ИСЗ Envisat, пространственное разрешение которых составляет 25–75 м. Анализ полученных данных показал, что на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности детектируется большое количество вихрей относительно малых размеров, с диаметрами от нескольких километров до десятка километров (причем на их периферии могут развиваться вихри меньших размеров). Вихри этого типа имеют, как правило, спиралеобразный вид и в подавляющем большинстве случаев являются циклоническими по направлению вращения [8–16].

На РЛИ данные вихри визуализируются благодаря сливковым полосам, образованным пленками ПАВ, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теп-

лое время года. Пленки обладают способностью избирательного гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения в силу неравномерного распределения поверхностного натяжения в местах их скопления и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала. Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки ПАВ как бы “прорисовывают” вихри на РЛИ преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра [9, 17]. Один из многочисленных примеров РЛИ, опубликованных в [8–16], с изображением плотной упаковки нескольких спиралеобразных циклонических вихрей размером 2.5–10 км в прибрежной зоне представлен на рис. 1 (размер кадра – 50 x 50 км).



Рис.1. Фрагмент РЛИ, полученного 16 февраля 2007 г., на котором идентифицируются несколько мелкомасштабных циклонических вихрей

Мелкомасштабные вихри, выявленные по оптическим изображениям высокого пространственного разрешения

Программа «Google Планета Земля» содержит мозаику спутниковых (QuickBird) оптических изображений земной и морской поверхности с очень высоким (0.6–2.44 м) пространственным разрешением, на 1–2 порядка превосходящим разрешение даже радиолокационных изображений, которые анализировались в [8–16]. Стоимость этих данных чрезвычайно высока – один кадр размером 10 x 10 км стоит от 1.6 до 2.2 тыс. долл. США в зависимости от типа данных (архивных или заказных), поэтому они не доступны для массового анализа. В 2009 г. можно было воспользоваться только тем набором изображений акватории Черного моря, который был выставлен в этой программе. Несмотря на то, что невозможно восстановить дату этих изображений, имеющаяся информация представляет большой интерес для исследования внутренней структуры мелкомасштабных вихрей. К сожалению, в начале 2010 г. мозаика этих изображений по акватории Черного моря была убрана из программы.

Анализ этих изображений по периметру всей прибрежной зоны Черного моря позволил выявить целый ряд мелкомасштабных вихрей размером 1–10 км, которые проявляются благодаря наличию вод с повышенным содержанием взвеси или ПАВ. Выявленные структуры представлены на рис. 2–7 в порядке убывания размеров вихрей.

На рис. 2 в районе поселков Хоста и Кудепста в поле взвеси отчетливо проявляется антициклонический вихрь диаметром примерно 7 км. Источником взвеси является вынос вод реками Мзымта и Псоу, расположенными юго-восточнее этой точки. Прибрежный поток трансформированных речных вод с высоким содержанием взвеси шириной до 2.5 км у Адлера при движении на северо-запад (в направлении ОЧТ) вовлекается в вихревое движение в районе пос. Кудепста и выносится на расстояние 7–8 км от берега напротив пос. Хоста, тем самым осуществляя интенсивный водообмен в прибрежных водах. Причиной образования вихря может быть неустойчивость прибрежного течения, связанная с локальными особенностями береговой линии.



Рис. 2. Антициклонический вихрь диаметром 7 км в районе Хосты

На рис. 3 в районе Бакальской косы (северо-западное побережье Крыма) наблюдается циклонический вихрь диаметром 4 км. Вихрь проявляется в поле взвеси, источником которой может быть только локальное взмучивание вод у песчаной косы под действием ветрового волнения. Вихрь мог образоваться в результате обтекания косы прибрежным течением.



Рис. 3. Циклонический вихрь диаметром 4 км в районе Бакальской косы (Крым)

На рис. 4 в районе Сочи наблюдается циклонический вихрь диаметром 2 км на расстоянии 5 км от берега (пос. Мамайка, северный пригород Сочи). В данном случае спиралевидный вихрь прорисовывается благодаря наличию на поверхности моря большого количества ПАВ. Судя по расположению «хвоста» вихря, циклон мог образоваться в результате кратковременного ветрового воздействия на поверхность моря, направленного на юг-юго-восток, т.е. навстречу основному течению. Здесь следует отметить, что внутренняя структура вихря гораздо лучше видна в поле ПАВ благодаря своей дискретной пространственной структуре, чем в поле взвеси, которая более однородна по площади.



Рис. 4. Циклонический вихрь диаметром 2 км на расстоянии 5 км в районе Сочи

На рис. 5 в районе пос. Мысхако в поле ПАВ наблюдается вихревой диполь вихрь с горизонтальным размером около 2 км (ширина «шляпки»). Диполь ориентирован вдоль берега с северо-востока на юго-запад и, вероятно, также вызван соответствующим локальным ветровым импульсом. Источником большого количества ПАВ в этом районе являются сточные воды пос. Мысхако, а также загрязненные поверхностные воды, выносимые из акватории Цемесской бухты и Новороссийского порта.



Рис. 5. Вихревой диполь с горизонтальным размером 2 км в районе пос. Мысхако

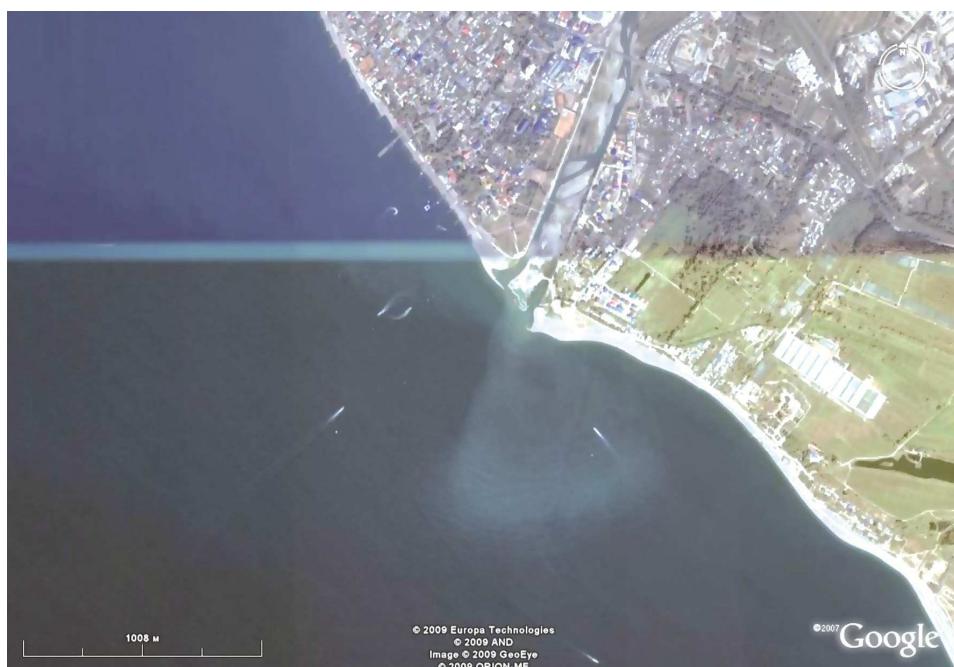


Рис. 6. Циклонический вихрь диаметром 1 км в районе вытока реки Мzymта

На рис. 6 небольшой объем речных вод реки Мзымта с высоким содержанием взвеси распространяется перпендикулярно берегу на расстояние 1 км от устья и сворачивается в циклонический вихрь в юго-восточном направлении, против среднего направления движения прибрежных вод. Следует отметить, что речные плюмы в зависимости от направления ветра и/или прибрежного течения могут распространяться как перпендикулярно в море, так и закручиваться влево или вправо относительно устья. Этот процесс неоднократно наблюдался в этой прибрежной зоне Адлера. Механизмом образования вихря может являться непосредственно сам речной сток, придающий локальный импульс поверхностному слою моря.

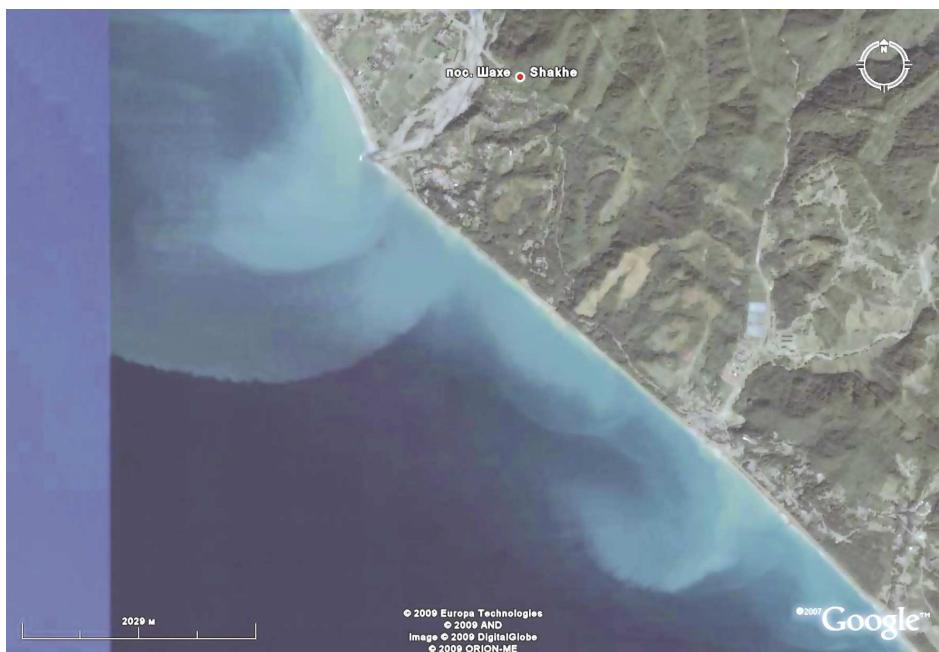


Рис. 7. Антициклические вихри диаметром 2 и 1 км в районе пос. Шахе

На рис. 7 у побережья в районе пос. Шахе в поле взвеси наблюдаются два антициклических вихря диаметром 2 и 1 км. Более крупный вихрь расположен напротив устья реки Шахе и может быть вызван стоком самой реки. Более мелкий вихрь может быть следствием сдвиговой неустойчивости прибрежного течения, как и соседние размытые неоднородности поля взвеси того же масштаба.

Таким образом, механизмами образования мелкомасштабных вихрей в прибрежной зоне Черного моря предположительно являются:

- 1) ветровой импульс;
- 2) сдвиговая неустойчивость течений;
- 3) речной сток;
- 4) взаимодействие вихрей и их диссипация;
- 5) взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт).

Заключение

Несмотря на многообразие проявлений мезомасштабной динамики вод Черного моря, она существует не сама по себе, а в тесной взаимосвязи с общебассейновой динамикой и прежде всего – с ОЧТ, а степень развития самого ОЧТ определяется главным образом крупномасштабным ветровым воздействием – экмановской накачкой циркуляции. В среднем положительная (циклоническая) завихренность поля ветра над глубоководной частью Черного моря формирует общебассейновую циклоническую циркуляцию вод. Поскольку крупномасштабное ветровое воздействие нестационарно (в нем присутствуют энергонесущие флюктуации разного временного масштаба, от синоптического до межгодового), то и динамика вод Черного моря является весьма изменчивой. Одна из наиболее ярко выраженных форм этой изменчивости – мезомасштабная вихревая динамика. Основной механизм ее порождения – бароклинная неустойчивость ОЧТ, бурно развивающаяся в периоды отсутствия интенсивной экмановской накачки циркуляции. В результате этой неустойчивости в области ОЧТ формируются крупные меандры и вихри, диаметр которых составляет $(2\text{--}6)R_d$ и в верхнем своем пределе превышает 100 км. Такие большие и долгоживущие (до 8 месяцев) вихри и вихревые пары осуществляют интенсивный поперечный к берегу водообмен и, в свою очередь, влияют на локальную структуру и положение ОЧТ.

Данные спутниковой радиолокации и оптические изображения высокого разрешения (2.5–25–75 м) позволили установить, что в прибрежной зоне Черного моря наблюдается множество мелких спиралевидных, преимущественно циклонических, вихрей с размерами 1–10 км и временем жизни от нескольких часов до нескольких суток. Суммарный вклад этих вихрей в перенос загрязняющих веществ и очищение вод прибрежной зоны может быть соизмерим с вкладом, вносимым ОЧТ и более крупными прибрежными антициклоническими вихрями [4, 12, 14].

История исследования мелкомасштабных вихрей в океане насчитывает уже более 40 лет, однако, за все эти годы было опубликовано не так много статей на эту тему (см. [18–25]). Очевидно, это объясняется сложностью их исследования. Еще в 1986 г. Скалли-Пауэра [18] отметил: «Почти повсеместное распространение (спиральных вихрей) всякий раз, когда субмезомасштабная динамика вод проявлялась в солнечном блике, указывает, что они являются, вероятно, наиболее фундаментальной сущностью динамики вод на этом масштабе. Трудность заключается в объяснении их структуры».

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта «Мелкомасштабные и мезомасштабные динамические процессы в океане по спутниковым данным и измерениям *in situ*» Программы Президиума РАН № 20 и при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00428-а «Мелкомасштабные вихри и тонкая пространственная структура течений на морском шельфе».

Литература

1. Гинзбург А.И. Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря // Исслед. Земли из космоса, 1994. №2. С.75–83.
2. Sur H.I., Ilyin Yu.P. Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black sea // Prog. Oceanogr., 1997. V. 39. P.109–151.
3. 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 (Halpern D. ed.). Elsevier: Amsterdam. 2000. P.273–287.
4. Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А и др. Вихревые структуры и горизонтальный обмен в Черном море. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С.55–81.
5. Титов В.Б. Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология, 2002. Т. 42. №5. С.668–676.
6. Poulaire P.-M., Barbanti R., Motyzhev S., Zatsepin A. Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1993-2003 // Deep-Sea Research, 2005. V. 52. P.2250-2274.
7. Ginzburg A.I., Zatsepin A.G., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Mesoscale water dynamics // Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol.5: Water Pollution, Part 5Q. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2008. P.195-216.
8. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В. и др. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999–2002) // М.: Книжный дом “Университет”, 2004. 135 с.
9. Лаврова О.Ю. Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. М.: GRANPolygraph, 2005. Т. II. С.118-123.

10. *Lavrova O., Bocharova T.* Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // Advance in Space Research, 2006. V. 38. №10. P.2162-2168.
11. *Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Островский А.Г.* Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 1. С.295-303.
12. *Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А. и др.* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология, 2007. №11. С.5–13.
13. *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.
14. *Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M.* Multichannel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // In: “Remote sensing of the European Seas”. V. Barale&M. Gade (Eds.). Springer Verlag. 2008. P.463-474.
15. *Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. et al.* Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // Int. J. Rem. Sens., 2008. V. 29. №21. P.6331–6345.
16. *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.
17. *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.
18. *Scully-Power P.* Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G, Mission Report. Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611, 1986. 71 pp.
19. *Stevenson R.E.* Oceanography from the Space Shuttle // Office of Naval Research. The University Corporation for Atmospheric Research. 1989. 200 p.
20. *Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vauchon P.* SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands:1994. 106 p.
21. *Stevenson R.E.* Spiral eddies: the discovery that changed the face of the oceans // 21st Century Sci. Technol. 1998. V. 11. P.58-71.
22. *Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F.* Spirals on the sea // Proc. Royal Society. Lond. A. 2000. V. 456. P.1217-1280.

23. *DiGiacomo P.M., Holt B.* Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // *J. Geophys. Res.*, 2001. V. 106. №C10. P.22521-22543.
24. *Eldevik T., Dysthe K.B.* Spiral eddies // *J. Phys. Oceanogr.*, 2002. V. 32. №3. P.851-869.
25. *Ivanov A.Yu., Ginzburg A.I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // *Proceedings of the Indian Academy of Sciences . Earth and Planetary Sciences*, 2002. Vol. 111. №3. P.281–295.

Small-scale eddies in the Black Sea

A.G. Kostianoy¹, A.I. Ginzburg¹, N.A. Sheremet¹, O.Yu. Lavrova², M.I. Mityagina²

¹ *P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia*

E-mail: kostianoy@online.ru;

² *Russian Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
84/32, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117997, Russia*
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Despite increased attention to the study of vortical processes and dynamics in the ocean, the most known, studied and described are meso-scale eddies with the size of 30–100 km. A huge number of factors and a variety of conditions in the real ocean determine an inevitable fragmentation of information about the processes of formation, development and dynamics of small-scale eddies (smaller than Rossby radius of deformation). Systematic research addressing this problem, so far has not been conducted, mainly for technical reasons. Small-scale eddies are very hard to investigate by traditional methods and techniques because of their small size, unsteadiness, spontaneity of their appearance and a short lifetime. During the satellite monitoring of the sea surface, conducted in the coastal zones of the Black, Caspian and Baltic Seas during the last 10 years, on radar and optical images of the sea surface obtained with high spatial resolution (2.5–25–75 m), we observed a large number of vortices of small size with diameters ranging from hundreds of meters to tens of kilometers. Examples of small-scale eddies observations in the Black Sea coastal zone are shown and reasons for their generation are discussed.

Keywords: the Black Sea, small-scale eddies, satellite radar imagery, satellite high resolution optical imagery, sea surface.