Мезомасштабная вихревая динамика в районе течения Агульяс по данным спутниковой альтиметрии

Н. В. Сандалюк, Т. В. Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: nikitasandaliuk@gmail.com

В работе рассматриваются мезомасштабные вихри, сформировавшиеся преимущественно в южной части системы течений Агульяс. Используются данные архивов AVISO и Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. На примере выделенных вихрей проанализированы возможные механизмы их генерации. Показано, что в исследуемом регионе выделяются два района повышенного вихреобразования: район Agulhas Retroflection и район, включающий плато Агульяс, которые различаются по траекториям и направлению перемещения сформировавшихся в них вихрей. Установлено, что в системе течений Агульяс наблюдается повсеместное деление циклонических вихрей на более мелкие мезомасштабные структуры — «дочерние» вихри. За период 1993–2015 гг. рассчитаны средние физические характеристики вихрей: амплитуда, орбитальная скорость, продолжительность жизни, радиус, скорости перемещения. Показано, что для всех выделенных вихрей характерна сильная нелинейность, при этом вихри с максимальными значениями нелинейности наблюдаются в районе восточной оконечности плато Агульяс и в районе Agulhas Retroflection.

Ключевые слова: уровень океана, альтиметрические измерения, SLA, мезомасштабные вихри, критерий нелинейности, течение Агульяс, Атлантический океан, Индийский океан, Agulhas Retroflection

Одобрена к печати: 23.08.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190

Введение

Изучение мезомасштабных вихрей даёт представление о целых системах взаимосвязанных океанических характеристик. Несмотря на то что мезомасштабные вихри образуются практически повсеместно (Chelton et al., 2007, 2011), районы вихревой активности так или иначе приурочены к областям крупномасштабных течений ввиду наличия здесь бароклинной и баротропной нестабильности, являющейся одним из основных условий генерации вихрей (Монин, Жихарев, 1990). В Южном полушарии к таким течениям относятся Бразильское, Восточно-Австралийское, Антарктическое Циркумполярное и течение Агульяс. В нашей работе рассматриваются мезомасштабные вихри в южной части системы течений Агульяс. Этот район является одним из самых сложных в динамическом отношении районов Мирового океана и характеризуется наибольшей изменчивостью океанологических полей во всём диапазоне пространственно-временных масштабов (Lutjeharms, 2006; Lutjeharms, van Ballegooyen, 1988). Здесь мезомасштабные вихри могут как зарождаться, так и дрейфовать, взаимодействуя с течением Агульяс (Boebel et al., 2003; Lutjeharms, 2006, 2007). По данным исследования (Olson, Evans, 1986), ринги Агульясова течения составляют в среднем 240±40 км в диаметре, орбитальная скорость вращения варьируется между 30 и 90 см/с, а скорость перемещения — от 5,5 до 9 см/с (от 5 до 8 км/сут). Тем не менее недавние исследования показали, что величины скоростей перемещения рингов Агульясова течения могут варьироваться в гораздо более широком диапазоне (Byrne et al., 1995; Schouten et al., 2000).

В ряде работ, где использовались альтиметрические данные, отслеживались пути рингов в южной части Атлантического океана и изменение их параметров (Byrne et al., 1995; Schouten et al., 2000). Установлено, что донная топография значительно влияет на распространение рингов Агульясова течения таким образом, что они здесь теряют почти 70 % кинетической энергии за 5 мес своего существования, при этом могут разделяться на множество

вихрей меньшего диаметра, большинство из которых никогда не покидает район Капской Котловины (Hall, Lutjeharms, 2011; Schouten et al., 2000). На *рис. 1* показаны два района, где, согласно литературным источникам, наблюдается повышенное образование мезомасштабных структур. Первый район, где Агульясово течение совершает резкий разворот на восток, в англоязычных источниках получил название Agulhas Retroflection (Lutjeharms, Valentine, 1988; Lutjeharms, van Ballegooyen, 1988). В русскоязычной научной литературе не существует аналогов данному термину, поэтому в дальнейшем мы будем употреблять англоязычное название. Район Agulhas Retroflection характеризуется резким разворотом Агульясова течения на восток и образованием петли, от которой отделяются крупные ринги, отвечающие за перенос более тёплых и солёных вод Индийского океана в Атлантику (Lutjeharms, Valentine, 1988; Lutjeharms, van Ballegooyen, 1988). Ринги Агульясова течения отличаются от других вихрей большими пространственными масштабами и большей продолжительностью жизни, а также преимущественно северо-западным направлением перемещения (Boebel et al., 2003; Lutjeharms, 2007). Второй регион — район плато Агульяс, в котором было зарегистрировано наибольшее количество мезомасштабных вихревых структур, — связан с Агульясовым возвратным течением, которое имеет генеральное восточное направление, но при этом отклоняется к северу, делая большую петлю и огибая плато Агульяс (см. *рис. 1*).

Целью данной работы является изучение мезомасштабных вихрей в исследуемом регионе на основе спутниковой альтиметрической информации. Являясь проявлением волн Россби в океане, они на картах аномалий уровня океана видны в виде перемещающихся вихрей с масштабами, превышающими бароклинный радиус деформации Россби (Незлин, 1986; Незлин, Снежкин, 1990).

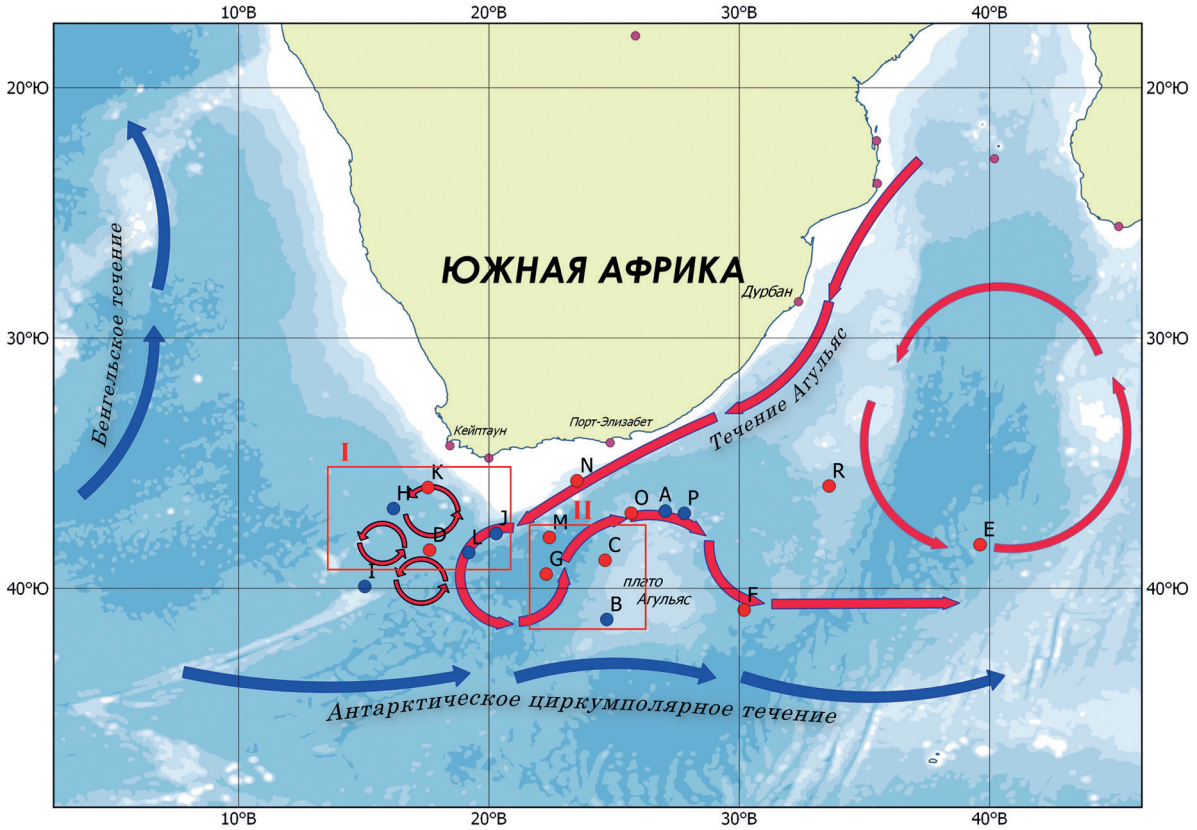

Рис. 1. Карта исследуемого района со схематичным изображением системы течений Агульяс. I — район Agulhas Retroflection; II — район плато Агульяс. Кружками отмечены места формирования вихрей (всего 17), зарегистрированных на дату 15.12.2007: синим цветом — циклонические вихри (**A, B, H, I, J, L, P**), красным — антициклонические (**C, D, E, F, G, K, M, N, O, R**). Круговыми стрелками обозначены ринги Агульясова течения. За район формирования каждого отдельного вихря принималось место их первичной регистрации на картах аномалий уровня методом автоматической идентификации

Указанная цель достигалась решением следующих задач:

1) анализ свойств, возможных механизмов генерации и траекторий нескольких вихрей, которые существовали продолжительное время (некоторые — более четырёх лет). Рассмотренные 17 вихрей различались по своим свойствам и сформировались в разное время в различных частях бассейна, однако наблюдались одновременно в определённую дату, выбор которой не имеет принципиального значения;
2) анализ характеристик вихрей за период 1993–2015 гг., идентифицированных в данном районе.

Данные

- Используются данные SLA (Sea Level Anomalies) за период 1993–2015 гг., доступные на портале Службы мониторинга морской среды Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, http://http://marine.copernicus.eu/). Описание массива дано в работе (Белоненко, Сандалюк, 2018а). Пространственное разрешение данных составляет 0,25° широты и долготы, временная дискретность — 7 сут.
- Используются данные массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH (http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/) (далее — “Mesoscale...”), созданного на основе применения алгоритма автоматического обнаружения вихрей и их трекинга к данным спутниковой альтиметрии (Белоненко, Сандалюк, 2018б; Chelton et al., 2011).

Результаты

Согласно работе (Arhan et al., 1999), характеристики рингов Агульясова течения зависят от того, в какое время они образованы: в летний или в зимний период. Однако в работе (Chelton et al., 2011) в исследовании вихрей, выделенных методом автоматической идентификации по альтиметрическим данным, не выявлено ярко выраженных сезонных особенностей параметров вихрей. Для даты 15.12.2007 по данным архива “Mesoscale...” в исследуемом регионе выделяется 17 мезомасштабных вихрей: 7 циклонических (C) и 10 антициклонических (AC) (см. *рис. 1*). Так как в массиве содержится информация о местоположении вихря на каждые сутки его перемещения, мы рассчитали средние скорости перемещения этих вихрей, используя формулы сфероидической геодезии и так называемый адвективный параметр нелинейности вихрей, который определяется как отношение между орбитальной скоростью и скоростью перемещения. Перемещение вихрем частиц захваченной жидкости подразумевает, что вихри способны переносить не только термохалинные характеристики водных масс, но и различные биогеохимические характеристики, включая фитопланктон (Незлин, 1986; Незлин, Снежкин, 1990; Chelton et al., 2011; Samelson, Wiggins, 2006). Если параметр нелинейности больше единицы, то, как утверждается, вихри могут захватывать в себя воду и переносить её неизменные свойства вдоль своего пути распространения.

На *рис. 2* (см. с. 182), где показано число первичных регистраций вихрей в регионе, рассчитанное по данным массива “Mesoscale...”, видно, что в южной части течения Агульяс вихри формируются повсеместно. Однако прослеживаются районы, где наблюдается повышенная генерация вихрей: западная оконечность плато Агульяс и район Agulhas Retroflection. В северной части около 35° ю. ш., 24° в. д. выделяется район шельфа, непосредственно прилегающий к африканскому континенту, где также наблюдается повышенное вихреобразование. Так как качество альтиметрических данных в шельфовых областях значительно ухудшается, в данной работе этот район не рассматривается.

Видно, что в районе Agulhas Retroflection начали свой жизненный цикл шесть мезомасштабных вихревых структур: четыре циклонические (**H, I, J, L**) и две антициклонические (**D, K**). Но из них только антициклонический вихрь **D** может быть охарактеризован как ринг Агульясова течения. Рассмотрим подробно на альтиметрических картах механизм формирования этого вихря.

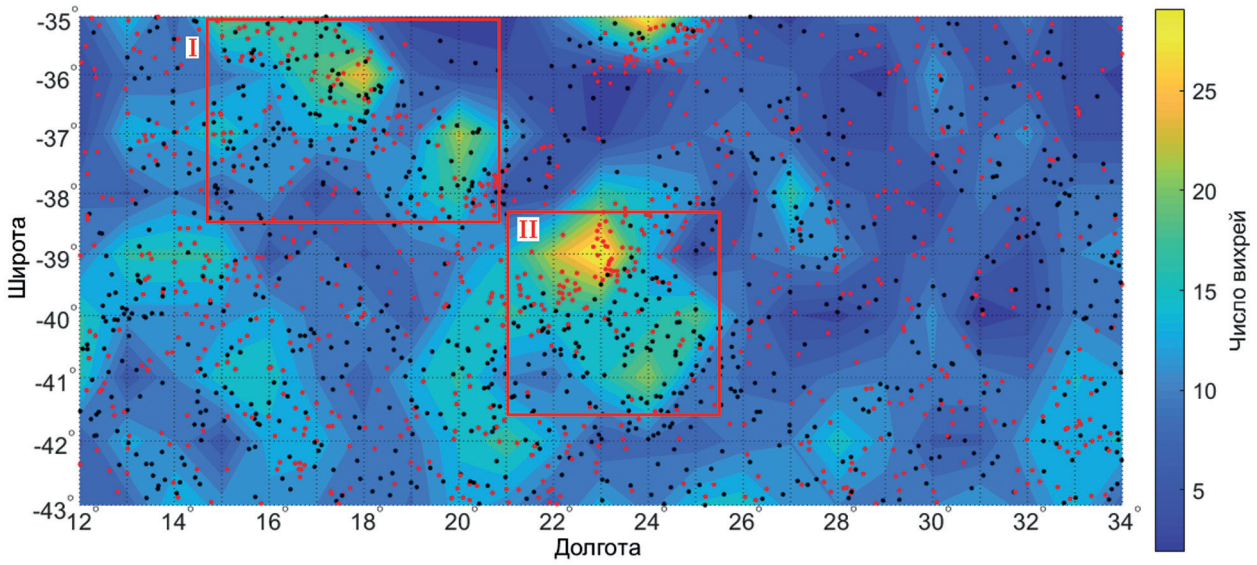

Рис. 2. Количество первичных регистраций вихрей в поле уровня, выделенных на период 1993–2015 гг., рассчитанное для квадратов разрешением 1×1°. Чёрными кружками отмечены места формирования циклонов, красными — антициклонов. Отмечены зоны повышенного вихреобразования: I — Agulhas Retroflection, II — плато Агульяс

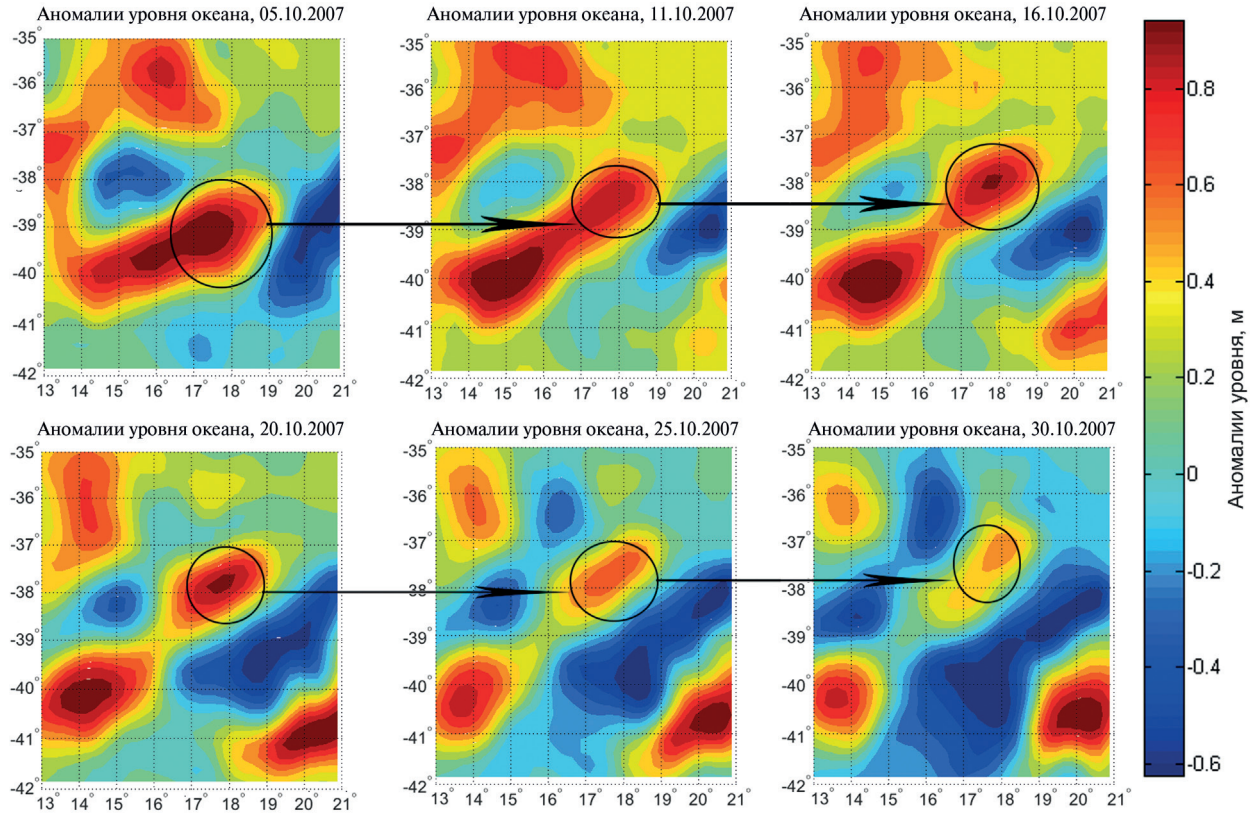

Рис. 3. Поля аномалий уровня в районе Agulhas Retroflection на период формирования антициклонического вихря **D** (с 05.10.2007 по 30.10.2007). На картах прослеживается масштабная вихревая структура (уже отделившаяся от основного потока Агульясова течения) и её разделение на отдельные вихри, одним из которых является вихрь **D** (отмечен чёрным кругом)

На *рис. 3* (см. с. 182) видно, что вихрь **D** сформировался за счёт структуры, получившей в англоязычных источниках название retroflection loop (Lutjeharms, Valentine, 1988; Lutjeharms, van Ballegooyen, 1988). На последовательных картах видно, как оно отделяется от основного потока Агульясова течения и практически сразу начинает распадаться на отдельные вихревые структуры. Одной из этих вихревых антициклонических структур как раз и является вихрь **D**, который в скором времени после своего формирования начинает перемещение на северо-запад. Средний диаметр вихря **D** составляет 100 км, что почти в два раза меньше, чем средний масштаб подобных вихрей, заявленный в работах (Boebel et al., 2003; Lutjeharms, 2007; Lutjeharms, van Ballegooyen, 1988).

Наиболее ярким отличием антициклонического вихря **D** от других вихрей, образовавшихся в наблюдаемом районе за выбранную дату, является его продолжительность жизни и пройденная дистанция. Из всех 17 идентифицированных мезомасштабных структур за выбранную дату, показанных точками на *рис. 1*, антициклонический вихрь **D** является единственным, покинувшим район наблюдения. Он перемещался преимущественно в западном направлении и за 1478 дней преодолел дистанцию в 6858 км, что более чем в три раза превышает среднюю дистанцию перемещения для всех наблюдённых 17 вихрей. По всей видимости, именно за счёт таких вихрей осуществляется основной транспорт тепла и соли из Индийского океана в Атлантику.

Как было показано в работе (Nof, 1990), циклонические вихри также могут разделяться на два и даже большее количество «дочерних» вихрей. Наблюдаемые в регионе Agulhas Retroflection циклонические вихри подвержены таким процессам и регулярно разделяются на более мелкие мезомасштабные циклонические структуры. Подобное разделение вихрей является одной из самых распространённых причин образования циклонических вихрей в изучаемом регионе.

Дочерние циклонические вихри, по сравнению с «родительскими» вихрями, как правило, обладают более коротким жизненным циклом и более низкими скоростями распространения (Hall, Lutjeharms, 2011). Примером такого рода вихря может служить циклонический вихрь **I** (*рис. 4*).

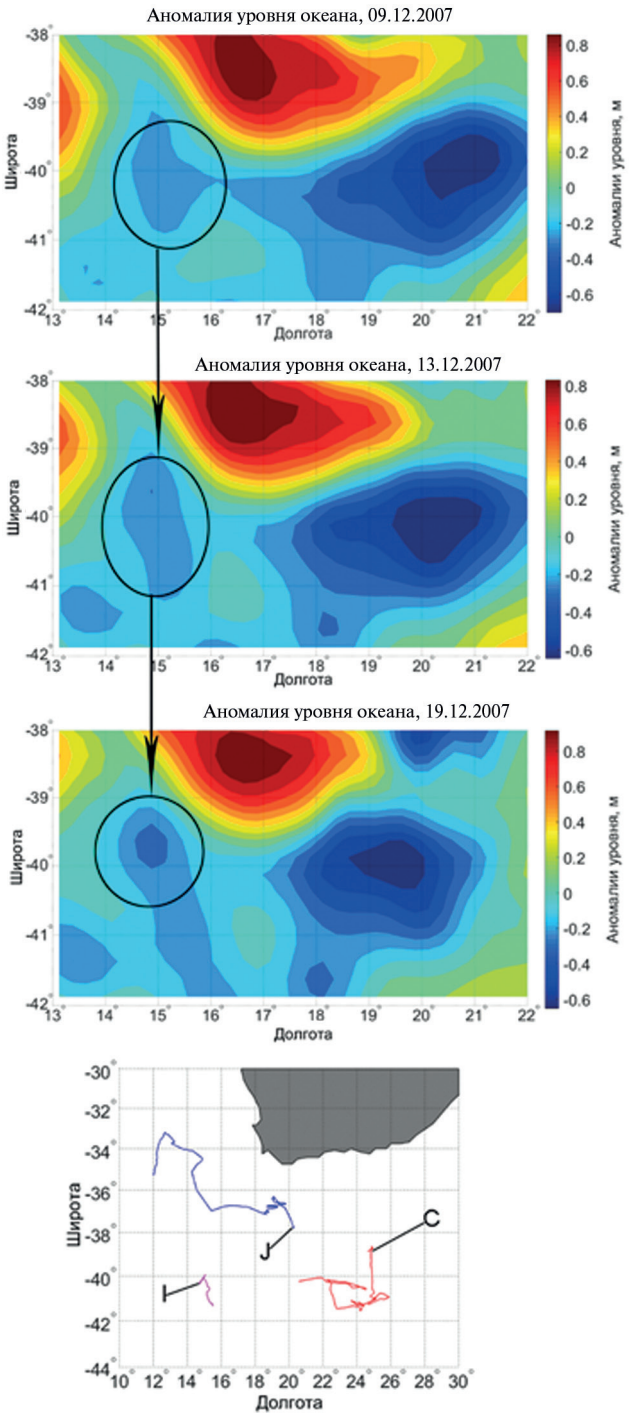

Рис. 4. Поля аномалий уровня на период формирования циклонического «дочернего» вихря **I** (отмечен кругом) с 10.12.2007 по 20.12.2007 (*вверху*) и траектории циклонических вихрей **J**, **I** и антициклонического вихря **C** (*внизу*)

Отследив по картам аномалий уровня момент его образования, можно видеть, что вихрь **I** на протяжении недели отделяется от более крупного циклонического вихря и продолжает своё развитие в качестве отдельной вихревой структуры с гораздо меньшим пространственным масштабом (см. *рис. 4*). Продолжительность жизни данного вихря составляет всего 28 дней, она является наименьшей для всех наблюдённых вихрей. За этот период вихрь **I** преодолевает 275 км, передвигаясь в северо-восточном направлении со средней скоростью около 10 км в сутки. К подобным дочерним вихрям также можно отнести циклонический вихрь **H**.

Второй анализируемый район — область плато Агульяс (см. *рис. 1*) — характеризуется вихрями, образованными преимущественно Агульясовым возвратным течением и топографическими эффектами плато Агульяс. Именно в этом районе наблюдается повышенная активность вихреобразования. Интенсивное меандрирование и, как следствие, усиление процессов генерации вихрей здесь вызвано бароклинной неустойчивостью мощного Агульясова возвратного течения, а также его взаимодействием с донной топографией, обеспечивающей захват энергии этих вихрей (Lutjeharms, 2007). Свой вклад в вихреобразование в данном регионе также вносит и зона Субтропической конвергенции (Субполярная фронтальная зона), расположенная в районе 40° ю. ш. и разделяющая субтропические и субантарктические воды. Направленные к югу меандры субтропической конвергенции создают бассейны более тёплой воды, которые быстро закрываются холодными языками субантарктической воды, движущейся на восток. Образующиеся вихри в этих бассейнах переносят холодную субантарктическую воду в более высокие широты (Lutjeharms, 2006). В данном районе было выделено шесть вихрей: три циклонических (**A, B, P**) и три антициклонических (**C, F, O**).

Ещё пять вихрей **E, G, M, N, R,** выделенные в данном районе, расположены или в стрежне (**N**), или на периферии основного потока Агульясова течения (**E, G, M, R**). Все они имеют антициклоническую полярность и неупорядоченный хаотический характер распространения, заключающийся в невозможности определить доминирующее направление их перемещения. Большинство выделенных вихрей перемещалось в западном и северо-западном направлениях; единичные вихри перемещались в юго-юго-западном и юго-юго-восточном направлениях; два вихря передвигались в восточном направлении. Проанализировав траектории рассмотренных вихрей, можно сделать вывод, что направление перемещения сильно зависит от региона их зарождения.

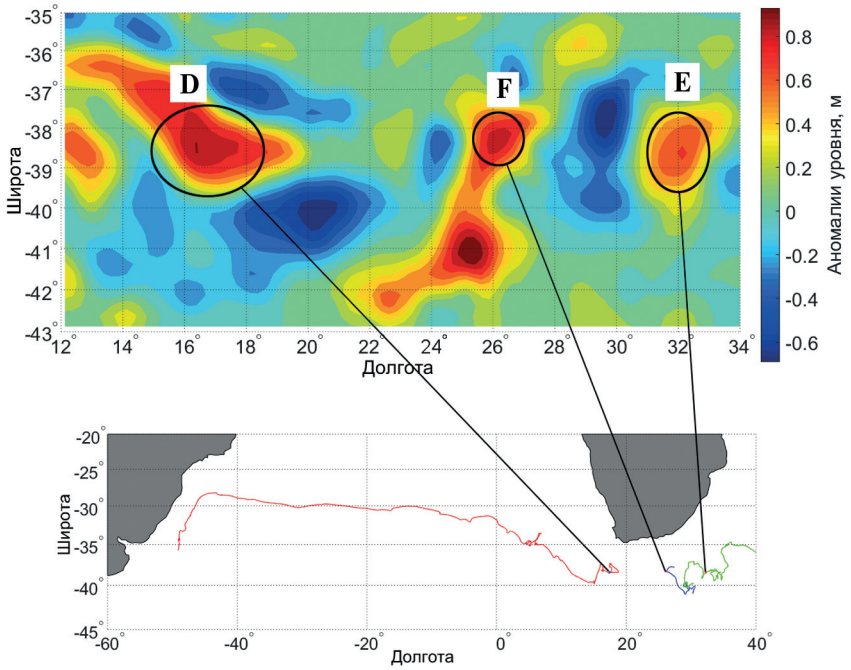

Рис. 5. Аномалии уровня (см) антициклонических вихрей **D**, **E** и **F** (*вверху*) на дату 15.12.2007: местоположение (показано точками) и их траектории (*внизу*). Положение вихря на 15.12.2007 показано линией

Вихри, сформировавшиеся в районе Agulhas Retroflection, имеют преимущественно западное и северо-западное направление, их траектории имеют относительно простой вид, и для них несложно определить направление перемещения. Это относится как к циклоническим, так и к антициклоническим вихрям. Примером подобного вихря служит циклонический вихрь **J** (см. *рис. 4*). Траектории вихрей, сформировавшихся в районе плато Агульяс, имеют в целом весьма хаотичный вид: в течение своего жизненного цикла подобные вихри часто резко меняют направление своего перемещения, создавая множество петель. Очевидно, это связано с топографическим захватом энергии вихрей на плато Агульяс, где под влиянием внешних факторов (ветер, течения) вихри перемещаются в различных направлениях, не покидая плато. В качестве примера подобного вихря можно привести антициклонический вихрь **C** (см. *рис. 4*).

Как уже было упомянуто ранее, антициклонический вихрь **D** является самым долгоживущим и потому представляет собой наибольший интерес среди всех остальных вихрей. Он перемещался преимущественно в северо-западном направлении, преодолел при этом почти 7000 км со средней скоростью 4,6 км/сут, пересекая практически весь Атлантический океан (*рис. 5*, см. с. 184). На *рис. 5* представлены траектории трёх антициклонических вихрей **D, E** и **F**, образовавшихся в различных районах системы Агульяс, а также их местоположение на карте аномалий уровня на выбранную дату 15.12.2007. Вихрь **D** сформировался в районе Agulhas Retroflection, вихрь **F** — в районе плато Агульяс, а вихрь **E** — в районе Мозамбикского бассейна. Все три вихря имеют западную составляющую при своём перемещении, но для вихрей **E** и **F** также наблюдается перемещение как в зональном, так и в меридиональном направлениях. В то же время вихри, сформировавшиеся в зоне влияния Агульясова возвратного течения, вообще не покидают этого района на протяжении всего времени своего существования, что подтверждает выводы предыдущих исследований (Arhan et al., 1999; Lutjeharms, 2006).

Таким образом, из 17 выделенных вихрей только три продемонстрировали наиболее устойчивое распространение в западном направлении, преодолев значительные расстояния, в то время как для большинства вихрей, сформировавшихся в районе Agulhas Retroflection, характерно их последующее движение в район Капской котловины, где они прекращают своё существование. Наличие западной составляющей при их перемещении может свидетельствовать об определённом влиянии β-эффекта сравнительно с топографическим захватом энергии. По всей видимости, долгоживущие вихри, подобные антициклоническому вихрю **D**, зародившись как ринги Агульясова течения (см. *рис. 3* и *4*), в процессе устойчивого перемещения на запад постепенно приобретают свойства вихрей открытого океана.

Кинематические характеристики вихрей

За период 1993–2015 гг. в исследуемом районе зарегистрировано 2225 вихрей: 1143 циклонических и 1082 антициклонических. Средние значения характеристик этих вихрей представлены в таблице.

Средние кинематические характеристики
мезомасштабных вихрей на *рис. 2* (за период 1993–2015 гг.)

Параметры	Все вихри	АС	С
Продолжительность жизни, дни	132	140	110
Дистанция, км	657,0	682	632
Скорость перемещения, см/с	5,6	5,9	5,3
Орбитальная скорость, см/с	38,4	42,4	35,7
Параметр нелинейности	6,6	7,0	6,4
Амплитуда, см	18,5	19,7	17,7
Радиус, км	82,7	78,6	86,0
Число Россби	0,025	0,029	0,023

Продолжительность жизни и дистанция

Анализ продолжительности жизни вихрей для циклонических и антициклонических структур свидетельствует, что их количество быстро уменьшается с увеличением продолжительности жизни: число вихрей, продолжительность жизни которых превысила 100, 200, 400, 500 и 700 дней, составило 824, 334, 105, 65 и 36 соответственно. Средняя продолжительность жизни для циклонических вихрей составила 110 дней, для антициклонических — 140 дней. Максимальная продолжительность жизни для циклонических вихрей составила 911 дней, для антициклонических — 1827 дней. В целом число циклонических вихрей незначительно превышает число антициклонических (на 1,5 %). Вместе с тем для вихрей, продолжительность жизни которых превышала 500 дней, количество антициклонических вихрей превысило число циклонических более чем в два раза (46 антициклонических и 19 циклонических), что подтверждает выводы о том, что антициклонические вихри являются более устойчивыми образованиями (Незлин, 1986; Незлин, Снежкин, 1990).

Количество вихрей резко уменьшается с увеличением пройденной дистанции. Число вихрей, которые преодолели дистанцию в 500, 1000, 2000, 3000 и 4000 км, составило 1390, 698, 232, 107, 52 вихря соответственно. Среди вихрей, преодолевших дистанцию в 500 км, выделяется 712 циклонических и 678 антициклонических. Для вихрей с дистанцией перемещения более 4000 км число антициклонических вихрей превысило число циклонических почти в три раза (14 циклонических и 38 антициклонических). Средняя пройденная дистанция для антициклонических вихрей составила 682 км, для циклонических — 632 км. Максимальная дистанция для антициклонических вихрей составила 10 528 км, для циклонических вихрей — 6259 км.

Амплитуда и радиус

Средняя амплитуда вихрей составила 18,5 см. Для антициклонических вихрей это значение было равно 19,7 см, для антициклонических — 17,7 см. На *рис. 6* представлено поле средней амплитуды вихрей. Отчётливо выделяются районы с наибольшей амплитудой: Agulhas Retroflection и плато Агульяс. Эти районы, как уже было упомянуто выше, являются основными для формирования мезомасштабных структур в данном регионе. Среднее значение амплитуды в этих районах превышает 25 см, в то время как на периферии средняя амплитуда вихрей колеблется в диапазоне 5–15 см.

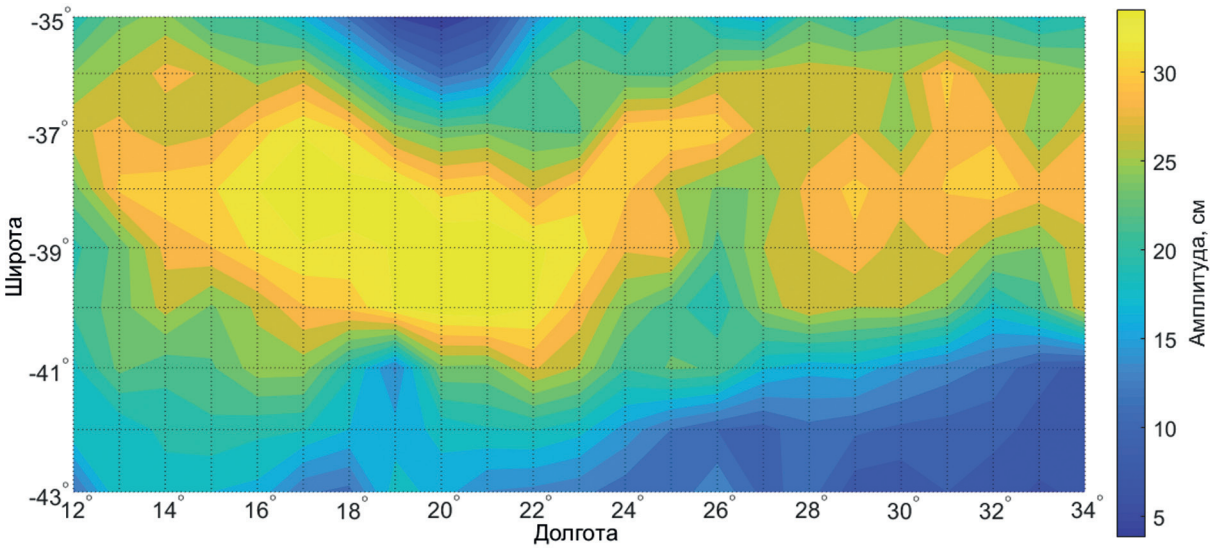

Рис. 6. Поле средних значений амплитуды вихрей, зарегистрированных в исследуемом районе на период 1993–2015 гг. Средняя амплитуда рассчитана для квадратов разрешением 1×1°

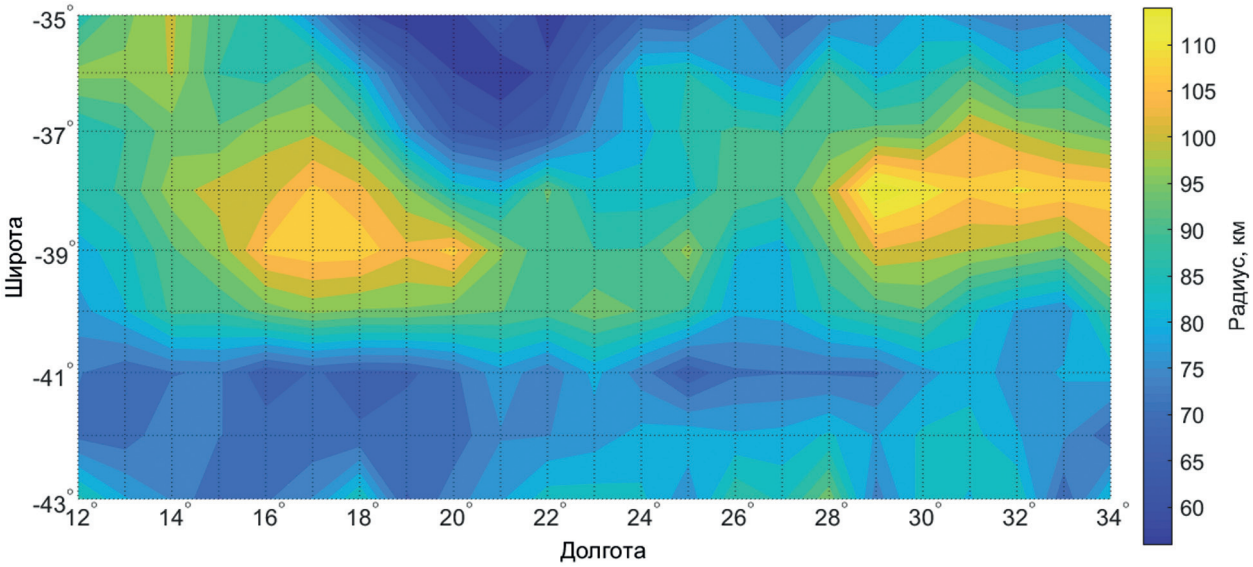

Рис. 7. Поле средних значений радиуса (масштаба) вихрей, зарегистрированных в исследуемом районе на период 1993–2015 гг. Средняя амплитуда рассчитана для квадратов разрешением 1×1°

Средний радиус вихрей составил 82,7 км. Для антициклонических вихрей эта характеристика равняется 78,6 км, для циклонических — 86 км. На *рис. 7* представлено поле средних значений радиуса (масштаба) вихрей, рассчитанное для района исследования. Здесь, как и в случае с амплитудой, синоптические структуры с максимальным пространственным масштабом наблюдаются в наиболее динамически активных районах течения Агульяс: Agulhas Retroflection и плато Агульяс. В данных районах средний радиус составил 105 км, в то время как в прилегающих районах это значение было равно около 70 км.

Параметр нелинейности и скорость перемещения

Среднее значение нелинейности для всех вихрей, образовавшихся в данном районе за 23-летний период, составило 6,6. Для циклонических — 6,4, для антициклонических — 7,0.

Вихри с наибольшим средним значением параметра нелинейности наблюдаются в районе восточной оконечности плато Агульяс, здесь оно составляет порядка 13. Также повышенные значения параметра нелинейности наблюдаются в районе Agulhas Retroflection, здесь среднее значение нелинейности варьируется в районе 9–11.

Среднее значение скорости перемещения вихрей — 5,6 см/с. Для циклонических вихрей это значение равнялось 5,3 см/с, для антициклонических — 5,9 см/с. Средняя орбитальная скорость для всех выделенных вихрей составила 38,4 см/с (35,7 см/с для циклонических и 42,4 см/с для антициклонических).

Выводы

- Анализ спутниковых альтиметрических данных выявил наличие двух районов повышенного вихреобразования в южной части течения Агульяс: Agulhas Retroflection и район, включающий плато Агульяс. Анализ альтиметрических карт показал, что траектории вихрей зависят от региона их генерации. Для вихрей, образовавшихся в районе Agulhas Retroflection, характерно северо-западное направление передвижения, в то время как вихри, сформировавшиеся в регионе плато Агульяс, имеют крайне хаотичные траектории дрейфа и в большинстве своём не выходят за пределы данного района,

что, очевидно, связано с топографическим захватом их энергии. Вихри, сформировавшиеся в районе Agulhas Retroflection, имеют преимущественно западное и северо-западное направление, их траектории имеют относительно простой вид, и для них несложно определить направление перемещения. Для большинства вихрей, сформировавшихся в районе Agulhas Retroflection, характерно их последующее движение в район Капской котловины, где они прекращают своё существование.

- Анализ карт аномалий уровня подтверждает вывод работы (Nof, 1990) о повсеместном образовании циклонических вихрей в системе течений Агульяс путём деления крупных структур на так называемые «дочерние» вихри, которые, по сравнению с «родительскими» вихрями, обладают более коротким жизненным циклом и более низкими скоростями перемещения.
- Средняя продолжительность жизни наблюдённых мезомасштабных вихрей в данном регионе составила 275 дней, среднее пройденное расстояние — 657 км. Средняя продолжительность жизни антициклонических вихрей составила 140 дней, что существенно выше, чем у циклонических (110 дней). В среднем антициклонические вихри преодолели большую дистанцию, чем циклонические (682 км у антициклонических и 632 км у циклонических). Наибольшая продолжительность жизни, 1827 дней, наблюдалось у антициклонического вихря. Средний радиус вихрей (масштаб) составил 82,7 км.
- На основе анализа данных массива “Mesoscale...” показано, что в рассматриваемом регионе антициклонические вихри являются более устойчивыми вихревыми образованиями по сравнению с циклоническими. Для долгоживущих вихрей, продолжительность жизни которых превышала 500 дней, количество антициклонических вихрей более чем в два раза превышает число циклонических. Для вихрей с дистанцией перемещения более 4000 км число антициклонических вихрей превышает число циклонических почти в три раза (14 циклонических и 38 антициклонических). Средняя пройденная дистанция для антициклонических вихрей составила 682 км, для циклонических — 632 км. Максимальная дистанция для антициклонических вихрей составила 10 528 км, для циклонических вихрей — 6259 км.
- Для всех мезомасштабных структур в данном регионе параметр нелинейности значительно превышает 1. Среднее значение параметра нелинейности для всех вихрей, образовавшихся в данном районе за 23-летний период, составляет 6,6. Для циклонических — 6,4, для антициклонических — 7,0. Вихри с наибольшим средним значением параметра нелинейности наблюдаются в районе восточной оконечности плато Агульяс, где параметр нелинейности достигает 13. Повышенные значения параметра нелинейности также отмечаются в районе Agulhas Retroflection, где среднее значение параметра нелинейности варьируется от 9 до 11.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00452 и 17-05-00034).

Литература

1. *Белоненко Т. В.*, *Сандалюк Н. В.* (2018а) Сравнение вклада линейных и нелинейных эффектов в изменчивость уровня океана по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 29–41.
2. *Белоненко Т. В.*, *Сандалюк Н. В.* (2018б) Временная изменчивость характеристик мезомасштабных вихрей в Австрало-Антарктическом бассейне (по спутниковым данным) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 189–199.
3. *Незлин М. В.* Солитоны Россби // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. Вып. 1. С. 1–58.
4. *Незлин М. В.*, *Снежкин Е. Н.* Вихри Россби и спиральные структуры. М.: Наука, 1990. 237 с.
5. *Монин А. С.*, *Жихарев Г. М.* Океанские вихри // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. Вып. 5. С. 1–47.

6. *Arhan M.*, *Mercier H.*, *Lutjeharms J. R. E.* The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. Iss. C9. P. 20987–21005.
7. *Boebel O.*, *Lutjeharms J. R. E.*, *Schmid C.*, *Zenk W.*, *Rossby T.*, *Barron C.* The Cape Cauldron: a regime of turbulent inter-ocean exchange // Deep-Sea Research II. 2003. V. 50 Iss 1. P. 57–86.
8. *Byrne D. A.*, *Gordon A. L.*, *Haxby W. F.* Agulhas Eddies: a synoptic view using Geosat ERM data // J. Physical Oceanography. 1995. V. 25. Iss. 5. P. 902–917.
9. *Chelton D. B.*, *Schlax M. G.*, *Samelson R. M.*, *de Szoeke R. A.* Global observations of large oceanic eddies // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. No. 15.
10. *Chelton D. B.*, *Schlax M. G.*, *Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. V. 91. Iss. 2. P. 167–216.
11. *Hall C.*, *Lutjeharms J. R. E.* Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // J. Marine Systems. 2011. V. 85. P. 1–10.
12. *Lutjeharms J. R. E.* The Agulhas Current. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 330 p.
13. *Lutjeharms J. R. E.* Three decades of research on the greater Agulhas Current // Ocean Science. 2007. V. 3. Iss. 1. P. 129–147.
14. *Lutjeharms J. R. E.*, *Valentine H. R.* Evidence for persistent Agulhas rings southwest of Cape Town // South African J. Science. 1988. V. 84. P. 781–783.
15. *Lutjeharms J. R. E.*, *van Ballegooyen R. C.* The retroflection of the Agulhas Current // J. Physical Oceanography. 1988. V. 18. P. 1570–1583.
16. *Nof D.* The role of angular momentum in the splitting of isolated eddies // Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 1990. V. 42. Iss. 4. P. 469–481.
17. *Olson D. B.*, *Evans R. H.* Rings of the Agulhas Current // Deep-Sea Research. 1986. V. 33. Iss. 1. P. 27–42.
18. *Samelson R. M.*, *Wiggins S.* Lagrangian Transport in Geophysical Jets and Waves: The Dynamical Systems Approach. N. Y.: Springer, 2006. 147 p.
19. *Schouten M. W.*, *de Ruijter W. P. M.*, *van Leeuwen P. J.*, *Lutjeharms J. R. E.* Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. Iss. C9. P. 21913–21925.

Mesoscale vortex dynamics in the Agulhas Current from satellite altimetry data

N. V. Sandalyuk, T. V. Belonenko

Saint Petersburg State University, *Saint Petersburg 199034*, *Russia*
E-mail: nikitasandaliuk@gmail.com

We present an analysis of mesoscale eddies formed predominantly in the southern part of the Agulhas Current using the two datasets: AVISO — the satellite altimetry measurements and Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH. In order to analyze the vortex generation mechanism, we examine separate eddies at the moment of their formation. We demonstrate that there are two areas with enhanced probability of vortex formation: Agulhas Retroflection region and Agulhas plateau. Eddies from these areas differ in trajectory and general propagation vector. The cyclonic eddies in the Agulhas current tend to split creating smaller mesoscale structures — so-called child cyclonic eddies. The average physical characteristics of eddies (amplitude, rotation, speed, translocation speed, lifetime and radius) are calculated for the period of 1993–2015. It is shown that all eddies are highly nonlinear, vortices with maximum nonlinearity are observed in the eastern margin of the Agulhas plateau and in the Agulhas Retroflection region.

Keywords: altimetry, SLA, sea level anomaly, mesoscale eddies, nonlinearity parameter, Atlantic Ocean, Indian Ocean, Agulhas Current, Agulhas Retroflection

Accepted: 23.08.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190

References

1. Belonenko T. V., Sandalyuk N. V., Sravnenie vklada lineinykh i nelineinykh effektov v izmenchivost' urovnya okeana po sputnikovym dannym (Assessing the contribution of linear and non-linear effects in sea level variability using satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 29–41.
2. Belonenko T. V., Sandalyuk N. V., Vremennaya izmenchivost' kharakteristik mezomasshtabnykh vikhrei v Avstralo-Antarkticheskom basseyine (po sputnikovym dannym) (Temporal variability of mesoscale eddies characteristics from satellite data in the Australian-Antarctic basin), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 4, pp. 189–199.
3. Nezlin M. V., Solitony Rossbi (Rossby Solitons), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, Vol. 150, No. 5, 1986, pp. 1–58.
4. Nezlin M. V., Snezhkin E. N., Vikhri Rossbi i spiral'nye struktury (Rossby Vortices and Spiral Structures), Moscow, 1990, 237 p.
5. Monin A. S., Zhiharev G. M., Okeanskie vikhri (Ocean Eddies), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1990, Vol. 160, No. 5, pp. 1–47.
6. Arhan M., Mercier H., Lutjeharms J. R. E., The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, Issue C9, pp. 20987–21005.
7. Boebel O., Lutjeharms J. R. E. Schmid C., Zenk W., Rossby T., Barron C., The Cape Cauldron: a regime of turbulent inter-ocean exchange, *Deep-Sea Research II*, 2003, Vol. 50, Issue 1, pp. 57–86.
8. Byrne D. A., Gordon A. L., Haxby W. F., Agulhas Eddies: a synoptic view using Geosat ERM data, *J. Physical Oceanography*, 1995, Vol. 25, Issue 5, pp. 902–917.
9. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., de Szoeke R. A., Global observations of large oceanic eddies, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, No. 15.
10. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, Issue 2, pp. 167–216.
11. Hall C., Lutjeharms J. R. E., Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean, *J. Marine Systems*, 2011, Vol. 85, pp. 1–10.
12. Lutjeharms J. R. E., *The Agulhas Current*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 330 p.
13. Lutjeharms J. R. E., Three decades of research on the greater Agulhas Current, *Ocean Science*, 2007, Vol. 3, Issue 1, pp. 129–147.
14. Lutjeharms J. R. E., Valentine H. R., Evidence for persistent Agulhas rings southwest of Cape Town, *South African J. Science*, 1988, Vol. 84, pp. 781–783.
15. Lutjeharms J. R. E., van Ballegooyen R. C., The retroflection of the Agulhas Current, *J. Physical Oceanography*, 1988, Vol. 18, pp. 1570–1583.
16. Nof D., The role of angular momentum in the splitting of isolated eddies, *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1990, Vol. 42, Issue 4, pp. 469–481.
17. Olson D. B., Evans R. H., Rings of the Agulhas Current, *Deep-Sea Research*, 1986, Vol. 33, Issue 1, pp. 27–42.
18. Samelson R. M., Wiggins S., *Lagrangian Transport in Geophysical Jets and Waves: The Dynamical Systems Approach*, New York: Springer, 2006, 147 p.
19. Schouten M. W., de Ruijter W. P. M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E., Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic Ocean, *J. Geophysical Research*, 2000, Vol. 105, Issue C9, pp. 21913–21925.