

Санкт-Петербургский государственный университет

МАЛЫШЕВА Алина Анатольевна

Выпускная квалификационная работа

**ИССЛЕДОВАНИЕ АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ
АЛЬТИМЕТРИИ И БУЕВ АРГО**

Основная образовательная программа бакалавриата

«Гидрометеорология»

Профиль «Океанология»

Научный руководитель:

Д.г.н., профессор

БЕЛОНЕНКО Татьяна Васильевна

Рецензент:

К.г.н., доцент

ГОРДЕЕВА Светлана Михайловна

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географическое описание.....	7
Глава 2. Используемые данные	11
2.1 Альтиметрические данные.....	11
2.2. Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH».....	11
2.3. Данные ARGO.....	14
2.4. Данные WOA13.....	14
Глава 3. Методы и результаты	15
3.1 Исследование Агульясова переноса.....	15
3.2 Анализ вихрей Агульясова переноса.....	22
Заключение.....	33
Публикации автора по теме исследования.....	34
Список литературы	35

Введение

Изучение мезомасштабных вихрей даёт представление о целых системах взаимосвязанных океанических характеристик. Мезомасштабные вихри обладают собственной динамикой, в которой доминируют нелинейные эффекты. В отличие от волн они способны переносить тепло, массу, кинетическую энергию и биохимические характеристики из региона их формирования на огромные расстояния, влияя на колебания климата. Мезомасштабные вихри образуются практически повсеместно на всей акватории океана (Chelton et al, 2007), однако районы вихревой активности так или иначе приурочены к областям крупномасштабных течений, ввиду наличия здесь бароклинной и баротропной неустойчивости, являющейся одним из основных условий генерации мезомасштабных вихрей. В Южном полушарии одним из таких течений является течение Агульяс, являющееся частью направленного на запад Южно-Экваториального течения.

Течение Агульяс – главный источник теплой и соленой воды, переносимой из Индийского океана в Атлантику. К югу от африканского побережья в районе 30° - 45° ю.ш., 10° - 35° в.д. оно совершает резкий разворот на восток, образуя петлю (разворот Агульяса) диаметром 340 км. В англоязычных источниках это явление получило название «Agulhas Retroflexion» (Lutjeharms et al, 1988; Lutjeharms et al, 1988). «Agulhas Retroflexion» периодически формирует отдельные антициклонические ринги (кольца), которые сформированы из относительно теплых и соленых вод Индийского океана. Температура в них выше на 5°C и соленость выше на 0.3 psu, чем температура и соленость окружающих вод равной плотности (Gordon, 1985). Перемещаясь со средней скоростью 12 см/с, ринги быстро распадаются, образуя вихри меньших масштабов (мезомасштабные вихри), которые сохраняют характерные свойства, как минимум, до 5° в.д. в западном направлении и до 46° ю.ш. в южном направлении (Lutjeharms et al, 1988). Распад рингов Агульяса с последующим образованием вихрей меньших масштабов был хорошо изучен в моделях (Kamenkovich et al, 1996; Drijfhout et al, 2003; De Steur et al, 2004; Doglioli et al, 2007; De Steur et al, 2009) и с использованием наблюдений (Olson et al, 1986; Byrne et al, 1995; Goni et al, 1997; Schouten et al, 2000; Richardson et al, 2003). Эти вихри способны преодолевать сотни (и даже тысячи) километров, что говорит о их высоком водообменном потенциале, и почему они могут рассматриваться как особые природные трассеры водообмена между Индийским и Атлантическим океанами, оказывающие существенное влияние на структуру глобального климата (Gordon et al, 1993; Donners et al, 2004; de Ruijter et al, 1999), а рассматриваемое явление получило название Агульясов перенос (Agulhas leakage).

Название «Агульсов перенос» относится к водам, экспортируемым в Атлантический океан системой течений Агульяс. Эти воды состоят главным образом из верхних и промежуточных вод индо-океанского происхождения (de Ruijter et al, 2002). Другие названия: Индо-Атлантический перенос/обмен/поток часто используются как синонимы Агульсова переноса (Durgadoo et al, 2013).

Влияние Агульсова переноса на общую циркуляцию в Атлантическом океане происходит двояко: через излучение планетарных волн и через адвекцию. Поступающие в бассейн мыса Игольного воды, являясь более теплыми и солеными, по сравнению с окружающими, подавляют изотермы и изогалины в термоклине (Giulivi et al, 2006), а создаваемые в изопикнах неоднородности излучают возмущения, которые в виде волн Россби медленно распространяются по Южной Атлантике (Biaostoch et al, 2008, van Sebille et al, 2007). Эти волны, несущие динамический след Агульсова переноса, достигают южноамериканского побережья в течение 4-6 лет и впоследствии быстро в виде волн Кельвина передают динамический сигнал через экватор (Biaostoch et al, 2008, Weijer et al, 2014). Таким образом, Агульсов перенос влияет на Атлантическую меридиональную термохалинную циркуляцию.

Мезомасштабные вихри, образованные течением Агульяс, являются доминирующими структурами, переносящими воды Индийского океана в Атлантику, поэтому изучение их динамики в исследуемом районе позволяет понять влияние Индийского океана на процессы в Атлантике. Эти вихри исследовались по спутниковым снимкам температуры поверхности моря и по данным альтиметров (Burne et al, 1995, Weismann et al, 1999, Schouten et al, 2000, Doglioli et al, 2007).

В литературных источниках количественные оценки Агульсова переноса имеют большой диапазон: от 4 Sv (Schmitz et al, 1995, Garzoli et al, 1996) до 22 Sv (Donners et al, 2004). Однако в большинстве исследований сообщается о величинах 11-17 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$). Эти оценки основаны на разных методах, таких как анализ водной массы (Gordon et al, 1992) или альтиметрических данных (Garzoli et al, 2000), эйлеровых модельных потоках (Reason et al, 2003; Matano et al, 2003; Treguier, 2003; Hermes et al, 2007) численных лагранжевых частиц (Bryden et al, 2005; Donohue et al, 2000; Donners et al, 2004; Schmitz et al, 1995; Voebel et al, 1998), комбинации моделирования и гидрографических оценок (Gordon et al, 1987; Gordon et al, 1992; Schmitz et al, 1995) или траекториям дрейфующих буев (Richardson et al, 2007). В работе (Gordon et al, 1990) на основе измерений спутника Geosat и CTD-профилей Агульсов перенос вод Индийского океана в Атлантику вихрями, дрейфующими на запад со скоростями 5-8 см/с, оценивается как 20-30 Sv. Richardson (Richardson et al, 2007) оценил Агульсов перенос примерно в 15 Sv, но отмечается, что эта оценка получена при довольно большой неопределенности в используемом подходе. Durgadoo et al. (Durgadoo et al, 2017) на основе

моделирования показывают, что общая оценка Агульсова переноса по модели составляет $14,1 \pm 2,2$ Sv, при этом Индийский океан дает вклад примерно в 12,6 Sv, остальное происходит из Южной Атлантики. Cheng et al. (Cheng et al, 2016) оценивают Агульсов перенос по данным моделирования (модель CCSM3.5) и получают значения от 2 до 15 Sv (см. также Renault et al, 2017). Van Sebille et al. (van Sebille et al, 2009) на основе линейной регрессии данных лагранжевых поплавков и определения положения фронта Агульсова течения по альтиметрическим данным получили оценку величины Агульсова переноса в 13,2 Sv.

De Ruijter et al. (de Ruijter et al, 2002) получили оценки Агульсова переноса путем подсчета числа рингов, оторвавшихся от течения Агульяс, и проанализировав их при помощи гидрографических данных, оценили величину Агульсова переноса от 2 до 10 Sv. По спутниковой информации они определили, что в год приблизительно 6 рингов отрывается от течения Агульяс. Перенос одним рингом составляет от 0,5 до 1,5 Sv. Они также обнаружили, что эти вихри экспоненциально убывают до половины их первоначального размера (измеряемого их потенциальной энергией) в пределах 1000 км от области зарождения.

В данной работе дается оценка Агульсова переноса независимым методом. Для получения необходимой оценки мы определяем число долгоживущих мезомасштабных вихрей, которые, зарождаясь в районе «Agulhas Retroflexion», дрейфуют на запад, тем самым транспортируя воды с характеристиками Индийского океана к берегам Южной Америки. Для этой цели мы используем спутниковые альтиметрические данные.

Западное направление перемещения мезомасштабных вихрей обусловлено влиянием β -эффекта. Для преодоления расстояния от «Agulhas Retroflexion» к Южной Америке вихрям требуется пересечь Атлантический океан и пройти 6000 км. Так как средняя скорость вихрей не превышает 10 см/с, то для преодоления этого расстояния вихрю требуется не менее 2 лет. Тем самым обоснован наш выбор, ограниченный рассмотрением только долгоживущих вихрей.

Определив общее число мезомасштабных вихрей, обладающих указанными свойствами, мы получаем возможность оценить Агульсов перенос, исходя из средних значений переноса одним вихрем. При этом мы применяем два подхода. Во-первых, мы используем оценки вихревого переноса, полученные другими исследователями. Как сказано выше, эти оценки варьируют от 0,5 до 1,5 Sv. Во-вторых, мы такие оценки получаем независимо, используя комплексный подход, основанный на комбинации спутниковых альтиметрических измерений и данных буев Argo.

Долгоживущие вихри, как правило, обладают устойчивостью и сохраняют свое ядро в течение продолжительного времени. В работе также рассмотрены термохалинные характеристики вихрей в динамике и дана качественная оценка, в какой степени вихри

Агульсова перенося сохраняют термохалинные свойства в течение их жизни. Все сказанное позволяет сформулировать цель исследования и решаемые задачи.

Целью работы является оценка Агульсова переноса на основе данных спутниковой альтиметрии и дрейфующих буев Argo.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Обзор научной литературы по проблеме.
2. Подготовка исходных массивов.
3. Анализ треков долгоживущих вихрей и оценка Агульсова переноса по трекам.
4. Совместный анализ альтиметрических карт и траекторий буев Argo с целью выделения долгоживущих вихрей, дрейфовавших вместе с буями в течение продолжительного времени.
5. Анализ временной изменчивости термохалинных характеристик в профилях Argo, захваченных вихрями.
6. Сравнение термохалинных характеристик вихрей Агульсова переноса с фоновыми термохалинными характеристиками вод Южной Атлантики по T-S-диаграммам.
7. Оценка Агульсова переноса отдельными долгоживущими вихрями на основе комплексного анализа альтиметрических карт и буев Argo.

Работа включает в себя введение, 3 главы, в которых решаются поставленные исследовательские задачи, заключение и список литературы.

Глава 1. Физико-географическое описание

Течение Агульяс – теплое западное пограничное течение в южной части Индийского океана, являющееся частью направленного на запад Южно-Экваториального течения, омывающее восточный берег Африки между 27° и 40° ю.ш. (Gordon, 1985) (рис. 1). Течение узкое и быстрое (на поверхности скорость может достигать 200 см/с).

Основным источником воды в течении Агульяс является рециркуляция малого круговорота Индийского океана в его юго-западной части (Gordon, 1985; Stramma and Lutjeharms, 1997). Дополнительные источники берут начало от вихрей Мозамбикского канала (de Ruijter et al., 2002) и с восточной части Мадагаскарского течения. Глубина и траектория течения варьируются во времени и по широте. По синоптическим измерениям, течение Агульяс охватывает всю толщу воды, но в исследовании (Voebel et al., 1998) было показано, что течение распространяется только до 2300 м. Глубина течения имеет тенденцию увеличиваться с широтой, что компенсирует увеличение планетарной завихренности. Кроме того, в районе течения наблюдаются сезонные колебания уровня воды: максимум наблюдается в течение летнего периода в южном полушарии (austral summer), минимум – в зимний период. Амплитуда сезонного колебания составляет около 30% от среднего показателя (Matano et al., 1998).

Являясь одним из основных течений в Южном Полушарии, система течений Агульяс перемещает большие массы воды. Одни из самых ранних оценок геострофического транспорта течения были приведены в работе (Gordon, 1985) и составили 67 Sv. Несколькими годами позже Toole and Warren получили более высокие оценки: 85 Sv. Тем не менее, некоторые исследователи отметили, что уровень отсутствия движения, который использовали Toole and Warren, не учитывал противотечение – Нижнее течение Агульяс. Beal and Bryden (1999) на основании данных LADCP определили геострофический транспорт 73 Sv, что всего на 3% отличалось от прямого расчета транспорта при помощи LADCP. Donohue et al. (2000) попытались уточнить предыдущие расчеты перемещаемого объема вод, убрав из них баротропные приливы и рассчитав погрешности приборов и измерений. Они оценили транспорт вод к югу величиной 78 ± 3 и 76 ± 2 Sv. Самые свежие оценки принадлежат группе ученых во главе Bryden et al. (2003), которые в 2003 г. вычислили средний объем перемещаемых вод: 69.7 ± 4.3 Sv на основе годовых измерений скоростей течения.

По мере того как течение Агульяс приближается к южному краю материкового шельфа Африки, оно начинает поворачивать на запад. Достигнув Южного Океана, течение разворачивается в обратную сторону и направляется на восток уже как Обратное течение Агульяс (Agulhas Return Current). Agulhas Return Current течет в восточном направлении и представляет собой квазистационарную меандрическую модель с длиной волны 500 км между 38° и 40° ю.ш. Его ширина около 70 км, а объем перемещаемых вод 44 ± 5 Sv в верхней тысяче метров.

Как правило, течение Агульяс имеет петлю диаметром 340 км и может быть обнаружено между 16° в.д. и 20° в.д. Данные альтиметрии показывают, что в зимнее время (в южном полушарии) происходит ранний разворот направления течения около 25° в.д. и большее мезомасштабное колебание.

Один интересный аспект Разворота Агульяса (Agulhas Retroflexion) состоит в том, что он периодически формирует отдельные антициклонические кольца. Эти кольца заполнены относительно теплой и соленой водой Индийского океана. Температурой этой воды более чем на 5°С теплее и соленость на 0.3 psu выше, чем воды на поверхности Южной части Атлантического океана равной плотности (Gordon, 1985). Кольца сохраняют свои характерные тепловые характеристики до 5° в.д. в западном направлении до 46° ю.ш. в южном направлении и распространяются в Южной части Атлантического океана со скоростью 12 см/сек (Lutjeharms and van Ballegooyen, 1987). Этот перенос между Индийским и Атлантическим океанами может оказывать значительное влияние на структуру глобального климата.

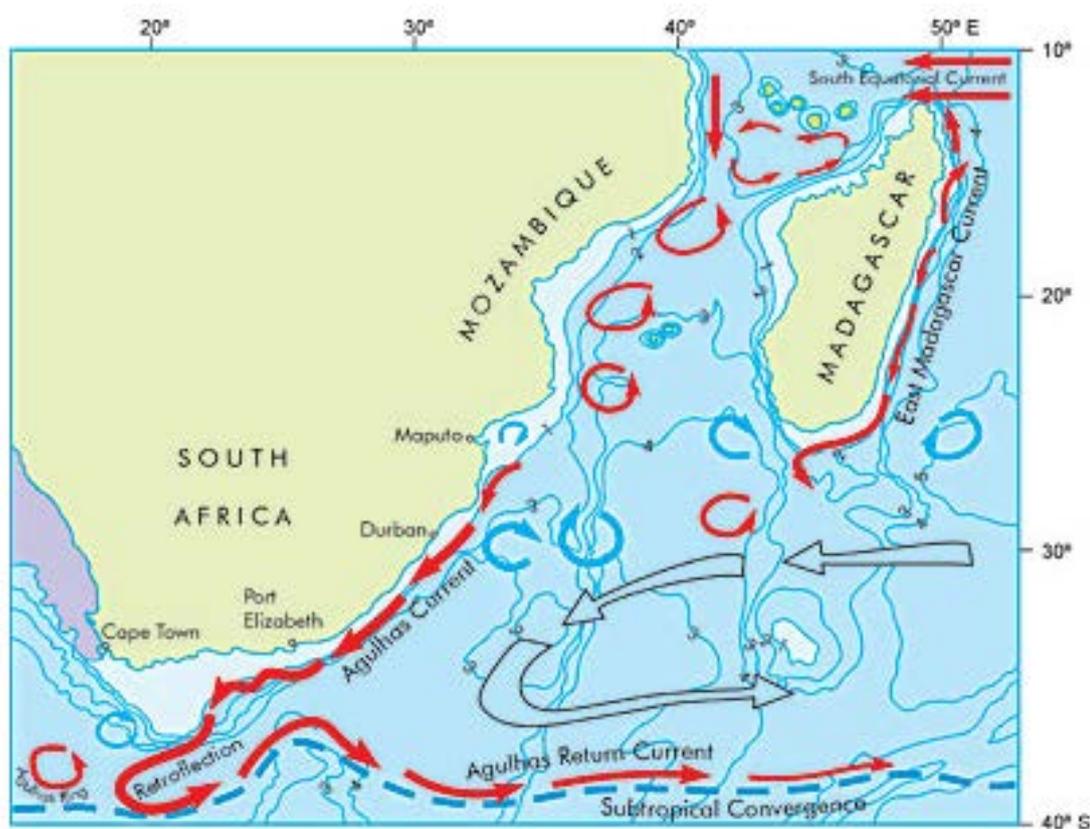


Рис. 1. Общая схема течения Агульяс. Morris Tamaryn et al, 2017.

Северное течение Агульяс начинается где-то между городами Дурбан и Мапуту. Течение сильное, интенсивное и увеличивается по глубине и в потоке объема вниз по течению. Основной поток течения проходит вдоль континентального шельфа Южной Африки. В интервале между Delagoa Bay на севере и Порт-Элизабет на юге континентальный шельф вдоль восточного побережья Южной Африки весьма узкий, не превышает по ширине 25 км и 200 метровую изобату по глубине (Lutjeharms, 2006). Континентальный склон в этом районе характеризуется высокой крутизной и отсутствием топографических неоднородностей. Вследствие этого континентальный склон стабилизирует течение Агульяс и в данном регионе оно не показывает серьезного меандрирования, в отличие от других западных пограничных течений, таких как Гольфстрим и Куроисио (Lutjeharms, 2007).

Поверхностные скорости северного Агульясова течения варьируются от месяца к месяцу. Среднее значение составляет 150 см/с, в то время как в отдельные месяцы оно может достигать 260 см/с. При этом не наблюдается ярко выраженного сезонного тренда в изменение скоростей течения (Gründlingh, 1994, Pearce, Gründlingh, 1982). Объем транспорта (расход) также существенно изменяется в течение года, среднее значение составляет порядка 69 Sv (Beal, Bryden, 1996).

Вдоль полосы восточного побережья Южной Африки в районе между Richards Bay и Дурбаном в месте под названием Natal Bight шельф значительно расширяется. Данная топографическая неоднородность в морфологии побережья является причиной образования одиночных меандров в потоке Агульсова течения. Эти меандры получили название Natal pulses (Lutjeharms и Van Ballegooyen 1988), они двигаются на юго-запад вместе с течением со средней скоростью 20 км/день, постепенно увеличиваясь в размерах по ходу движения в юго-западном направлении (до 200 км), а их скорость, при достижении района Agulhas Bank уменьшается до 4.5 км/день (Lutjeharms, Roberts, 1988). Lutjeharms в 1988 году высказал предположение, что эти меандры могут оказывать значительное влияние на образование рингов Агульсова течения. Последующие исследования с использованием *in situ* и спутниковых данных подтвердили эту гипотезу (de Ruijter et al, 1999; Van Leeuwen et al, 2000).

Путь южного течения Агульса, вниз по течению от города Порт-Элизабет, гораздо менее стабилен, демонстрирует меандрирование, а также сопутствующее образование многочисленных циклонических вихрей и линз теплых вод (Harris et al., 1978). Объем транспорта составляет порядка 70 Sv.

Около 36° ю.ш. течение отделяется от континентального шельфа и поворачивается на восток в большой антициклонической петле, названной Agulhas retroflexion, формируя Агульсово возвратное течение. Повышенное вихреобразование объясняется сдвиговой нестабильностью (shear instability), вызванной непосредственной близостью Возвратного течения Агульс и зоны Субтропической конвергенции. Конфигурация течения не остается постоянной, образующаяся петля постоянно движется в сторону Южной Атлантики. Достигая некой точки экстремума, петля отрывается и замыкается в кольцо, образуя ринг (Lutjeharms, Gordon, 1987), который продолжает движение в западном направлении. Течение Агульс и ринги, сформированные в Возвратном течении, являются важным звеном в глобальной термохалинной циркуляции (Gordon, 1986).

Глава 2. Используемые данные

В нашем исследовании были использованы данные массива «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH», основанные на анализе альтиметрических снимков, данные дрейфующих буёв-профиломеров Argo, данные абсолютной динамической топографии (ADT), представляющие собой сумму аномалий уровня моря (SLA) и средней динамической топографии (MDT), и данные WOA13.

2.1 Альтиметрические данные

Использовался массив аномалий уровня моря AVISO, доступный на портале Copernicus Marine environment monitoring service (http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/accessto-products/?option=com_csw&view=details&product_id=SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047). В нём содержатся аномалии уровня относительно средней динамической топографии MDT, распространяемые Aviso+ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt.html>). Данные хранятся в формате NetCDF и представляют собой трёхмерный массив, полученный путём комбинирования данных со всех альтиметрических миссий в период с 1993 г. по настоящее время, включая спутники серии TOPEX/ Poseidon и ERS. Пространственное разрешение данных составляет $0,25^\circ$ широты и долготы, временная дискретность — 7 сут. Как описано подробно в работе (Pujol et al., 2016), обработка данных AVISO включала новые сенсорные и атмосферные поправки, специфические для сенсоров, новую калибровку различных высотомеров, новую модель приливов и учитывала более длительный базовый период в 20 лет для оценки для среднего уровня моря.

2.2. Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH»

Использовались данные массива «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» (<http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/>). Для создания этого массива, содержащего мезомасштабные вихри, выделенные методом автоматической идентификации и трекинга, применялся специально разработанный алгоритм идентификации вихрей, основанный на анализе альтиметрических снимков. Данный алгоритм впервые подробно описан в работе Chelton et al. (2011) и впоследствии был модифицирован и упрощен на основе работы Williams et al. (2011).

Суть работы оригинального алгоритма заключалась в следующем. Отдельный мезомасштабный вихрь, идентифицированный с помощью автоматического алгоритма, выделялся как связанный набор пикселей, которые удовлетворяют определенному ряду критериев, таких как наличие локального максимума (минимума) в поле SSH для антициклонического (циклонического) вихря, согласованность значений аномалий внутри контура этого скопления со знаком его экстремума. Максимальный размер вихря ограничивался количеством 1000 пикселей, минимальный – 8 пикселей, минимальная амплитуда вихря составляла 1 см. Более подробное описание данных критериев приводится в работе (Chelton et al., 2011).

Более простой метод, основанный на работе Williams et al. (2011), использовался для более поздних версий массива.

При использовании данного алгоритма в каждый момент времени анализировалось дискретное двумерное поле SSH, $h(i, j)$, где каждый индекс i соответствует конкретному значению долготы а индекс j – значению широты. Для идентификации антициклонического вихря пиксель (i_{ext}, j_{ext}) принимается за локальный экстремум, при условии что значение $h(i_{ext}, j_{ext})$ больше или равно значению SSH соседних четырех пикселей (для циклонического вихря используется отрицательный экстремум).

Рассмотрим антициклонический вихрь с локальным максимумом SSH (i_{ext}, j_{ext}) и с пороговым значением $h_t \leq h(i_{ext}, j_{ext})$. Определим $E(i_{ext}, j_{ext}, h_t)$ как связанный набор пикселей (i_l, j_l) , $l = 1, \dots, n$, содержащий (i_{ext}, j_{ext}) , и удовлетворяющий условию $h(i_l, j_l) \geq h_t$. Основная задача алгоритма заключается в поиске h_b , который является минимальным значением пошагово уменьшающихся пороговых значений h_t . При этом пороговое значение h_b должно удовлетворять следующим критериям:

1. $n \leq n_{max}$ (n_{max} – максимальное число пикселей в $E(i_{ext}, j_{ext}, h_t)$)
2. $n \geq 2$
3. Ни один пиксель, принадлежащий E , не может иметь соседний пиксель, который является частью другого вихря
4. В связанном наборе пикселей $E(i_{ext}, j_{ext}, h_t)$ не может быть «дыр» (пропусков) между пикселями.
5. Пусть $d(i_k, j_k, i_l, j_l)$ будет дистанцией между пикселями (i_k, j_k) и (i_l, j_l) . В таком случае максимальное значение $d(i_k, j_k, i_l, j_l)$ для все пар пикселей в $E(i_{ext}, j_{ext}, h_t)$ должно быть меньше, чем определенное значение d_{max} .

Пошаговое «наращивание» площади вихря продолжается до тех пор, пока любой из данных пяти критериев не будет нарушен. Набор граничных пикселей в $E(i_{ext}, j_{ext}, h_b)$ определяет внешний периметр мезомасштабного вихря (Schlax, Chelton, 2016).

Процедура отслеживания вихрей

Распространяющийся вихрь формируется путем объединения вихревых реализаций с одного временного шага на следующий временной шаг. Чтобы определить, как это делается, предположим, что $E(i, t)$ является i -й вихревой реализацией, найденной на временном шаге t , с соответствующим центроидом $[x_c(i, t), y_c(i, t)]$, амплитуда $A(i, t)$ и эффективный радиус $L_{eff}(i, t)$. Две вихревые реализации $E(i, t)$ и $E(j, t + 1)$ объединяются, если:

1. В пределах определенной области пространственного поиска S реализация j -го вихря на временном шаге $t + 1$ с местоположением центроида $[x_c(j, t + 1), y_c(j, t + 1)]$ является ближайшим к центроиду $[x_c(i, t), y_c(i, t)]$ на шаге времени t .
2. Амплитуда $A(j, t + 1)$ и масштаб эффективного радиуса $L_{eff}(j, t + 1)$ попадают в диапазоны $\alpha^{-1}A(j, t + 1) \leq A(i, t) \leq \alpha A(j, t + 1)$ и $\alpha^{-1}L_{eff}(j, t + 1) \leq L_{eff}(i, t) \leq \alpha L_{eff}(j, t + 1)$ для заданной константы $\alpha \geq 1$.

Диапазоны допустимого изменения шкалы амплитуды и радиуса от одного временного шага к следующему, который управляется параметром α на шаге 2, учитывают естественную изменчивость и шум в полях SSH. Для нашего вихревого набора данных использовалось значение $\alpha = 2,5$.

Вихревой набор данных сохраняет только вихри со сроком «жизни» 4 недели или дольше.

Временная дискретность данных составляет 1 сутки.

Исходный массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» содержит информацию о следующих параметрах:

1. Долгота и широта вихря, которая определялась как координаты (x_c, y_c) центроида вихря:

$$x_c = \frac{\sum_{(i,j) \in E} x(i) h(i,j)}{\sum_{(i,j) \in E} h(i,j)}$$

$$y_c = \frac{\sum_{(i,j) \in E} y(i) h(i,j)}{\sum_{(i,j) \in E} h(i,j)}.$$

2. Амплитуда A , которая определяется как разность между значением экстремума SSH $h(i_{ext}, j_{ext})$ и средним значением SSH над пикселями края, которые определяют внешний периметр вихря.

3. Эффективный радиус вихря L_{eff} , определяется как радиус окружности, площадь которой равна площади связанного набора пикселей $E(i_{ext}, j_{ext}, h_b)$.
4. На каждом пороговом значении $h_l \geq h_b$ найдено среднее значение геострофической скорости на пограничных пикселях E_l . Вращательная или осевая скорость U вихря определяется как максимальное среднее значение этой скорости. Порог SSH, при котором определяется это максимальное среднее значение, обозначается как h_U . Набор связанных пикселей $E(i_{ext}, j_{ext}, h_U)$ называется ядром скорости вихря.
5. Радиус L , определяется как радиус окружности, площадь которой равна площади набора пикселей скоростного ядра $E(i_{ext}, j_{ext}, h_U)$.

2.3. Данные ARGO

Использовались данные дрейфующих буев-профиломеров Argo (<http://www.argo.net>). Важным преимуществом исследований с помощью буев-профиломеров является возможность проводить измерения не только на поверхности, но и в толще воды. Кроме того, контактные измерения до сих пор остаются наиболее точной информацией о состоянии морской среды. Так, с помощью буев-профиломеров Argo измеряются температура и соленость морской воды. Argo позволяют выполнять измерения до глубин 1500 м с периодичностью 1 раз в 5 суток.

2.4. Данные WOA13

Использовалась обновленная версия Атласа Мирового Океана (WOA13), который представляет собой базу климатологических данных. Полученные в результате обобщения собранных за историю наблюдений данных температурно-соленостных зондирований океана климатические распределения температуры и солености воды представлены в атласе на сетке 1° на 33 уровнях.

Глава 3. Методы и результаты

3.1 Исследование Агульсова переноса

Для анализа Агульсова переноса были выбраны пять районов (рис. 2). **Первый район** находится в пределах 0° - 45° ю.ш., 30° з.д.- 40° в.д. Выбор данного района обусловлен исследованием (Biaśtoch et al, 2008), где анализируются общая вихревая динамика региона, включая вихри Агульса, которые впоследствии вовлекаются в Агульсов перенос. **Второй район**, расположенный в пределах 30° - 45° ю.ш., 10° - 35° в.д. – район «Agulhas Retroflection», в котором непосредственно зарождаются вихри Агульсова переноса. **Третий район**, ограниченный 30° - 45° ю.ш., 5° - 10° в.д., примыкает к району «Agulhas Retroflection» и характеризует количество вихрей, которые покинули район формирования. Большая часть из них под влиянием β -эффекта распространяются в западном направлении. Именно эти вихри участвуют в переносе свойств вод Индийского океана в Атлантический. **Четвертый район**, ограниченный 20° - 35° ю.ш., 15° - 20° з.д., демонстрирует число долгоживущих вихрей Агульсова переноса, достигших центральной части Южной Атлантики. И, наконец, **пятый район**, ограниченный 20° - 35° ю.ш., 30° - 35° з.д., характеризует число долгоживущих вихрей, которые достигли западной части Южной Атлантики.

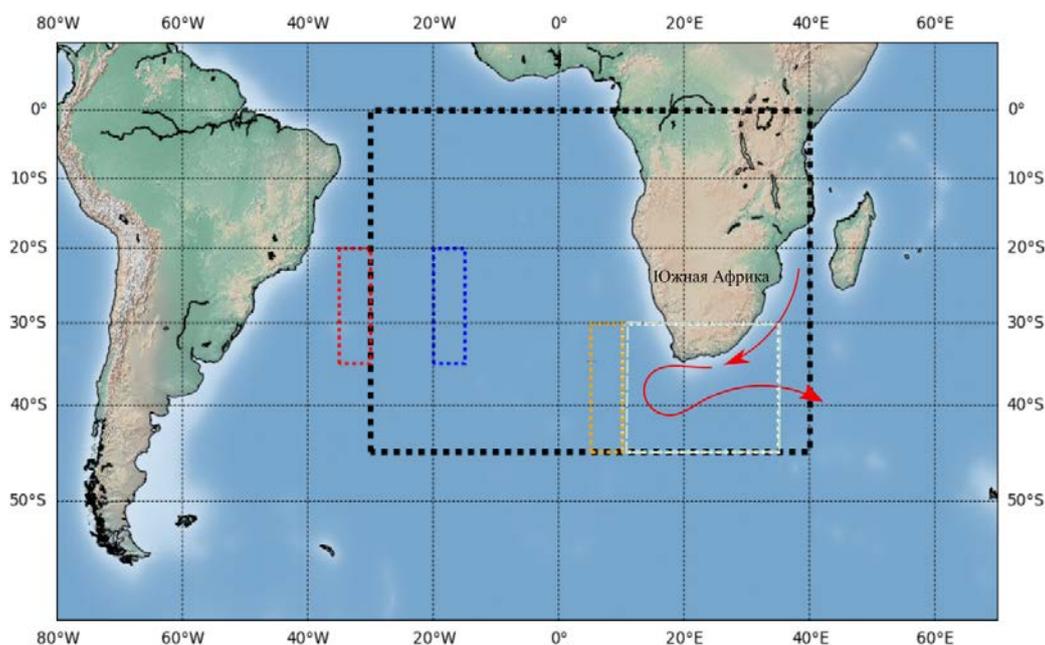


Рис. 2. Районы исследования. Первый район выделен черным прямоугольником, второй – белым, третий – жёлтым, четвертый – синим, пятый – красным.

Для каждого из пяти районов мы составили временные ряды (месячное осреднение), характеризующие число мезомасштабных вихрей, выделенных методом автоматической идентификации. В наборах данных для районов 1 и 2 выделяются как ринги системы течения Агульяс, так и вихри, которые образуются из-за бароклинной неустойчивости течения или топографических особенностей дна океана. Агульясов перенос составляют вихри, которые, образуясь в районе «Agulhas Retroflection», впоследствии перемещаются на запад (или северо-запад) и пересекают Атлантический океан. Так как скорости дрейфа мезомасштабных вихрей составляют несколько см/с, вихри с небольшой продолжительностью жизни диссипируют раньше, чем они пройдут необходимое расстояние, чтобы достичь западной части Южной Атлантики. Поэтому мы будем рассматривать долгоживущие вихри с продолжительностью жизни, превышающей один год.

Для дальнейшего анализа нами были построены треки движения вихрей, образованных в районе «Agulhas Retroflection». Так как нас интересовали вихри, которые прошли значительное расстояние, мы рассматривали долгоживущие вихри. На рисунке 3 показаны треки вихрей с продолжительностью жизни 1, 2 и 3 года. Видно, что долгоживущие вихри Агульясова течения, перемещаясь в западном направлении, пересекают Атлантический океан и тем самым переносят свойства вод Индийского океана к берегам Южной Америки. Заметим, что число вихрей с продолжительностью жизни не менее 3 лет, существенно уступает числу вихрей с продолжительностью жизни более 2 лет, которое, в свою очередь, меньше числа вихрей с продолжительностью жизни, превышающей 1 год. Средний диаметр вихрей, участвующих в Агульясовом переносе, составляет 165,5 км, максимальный – 366,9 км, а минимальный – 26,4 км.

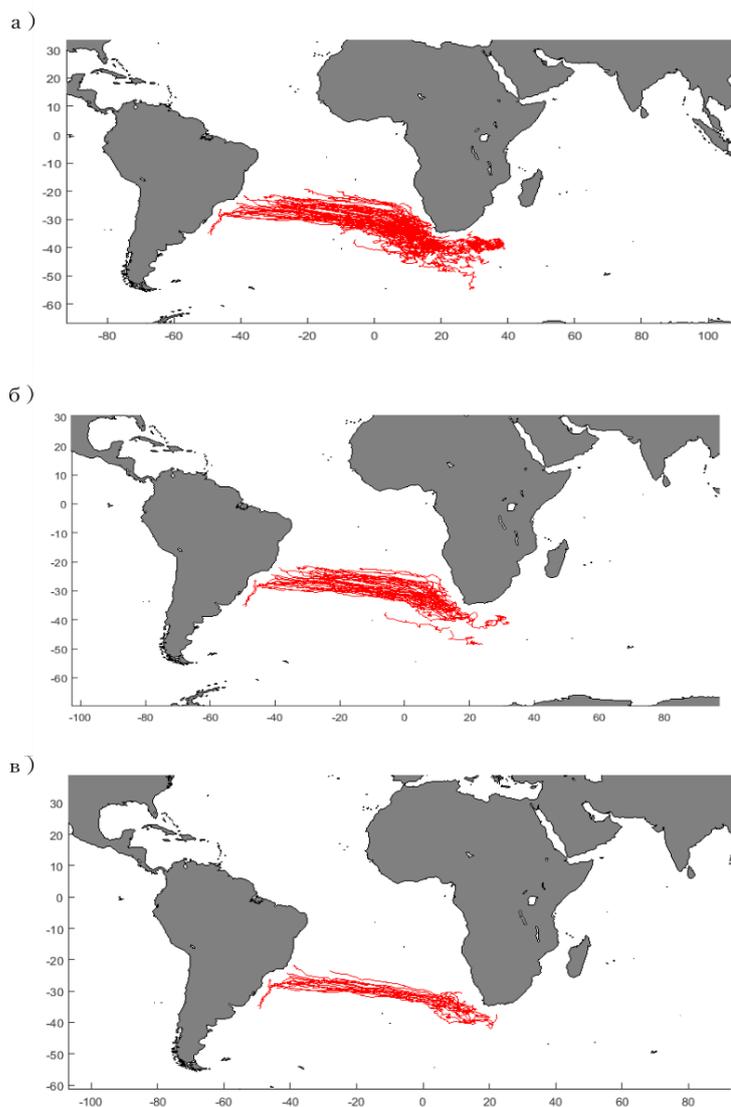


Рис. 3. Треки мезомасштабных вихрей с продолжительностью жизни не менее 1 (а), 2 (б) и 3 (в) года.

Проанализируем изменчивость количества мезомасштабных вихрей в рассматриваемых районах. Временной ряд составляет 276 значений, соответствующих числу вихрей за каждый месяц. На рисунке 4, а видно, что число вихрей в 1 районе варьирует от 223 до 268. Изменчивость составляет приблизительно 17 % от общего числа вихрей. На вейвлет-диаграмме (рис. 4, б) хорошо выделяются масштабы 1 год и 3 года, а также промежуточные максимумы в диапазоне 2-3 года. Отметим, что рассматриваемая изменчивость существенно нестационарна: годовые циклы выделяются для 1994-1999 гг. и 2004-2013 гг., в то время как в промежуток 1999-2005 гг. годовой масштаб не выделяется. Трехлетний цикл с разной интенсивностью выделяется во всем рассматриваемом диапазоне с максимумами интенсивности в период 1999-2005 гг. Внутригодовая изменчивость выражена незначительно, хотя в отдельные годы наблюдаются максимумы на полугодовом (в 1995 и 2013 гг.) и 3-4 месячных масштабах, но в последующие годы эти периодичности не проявляются.

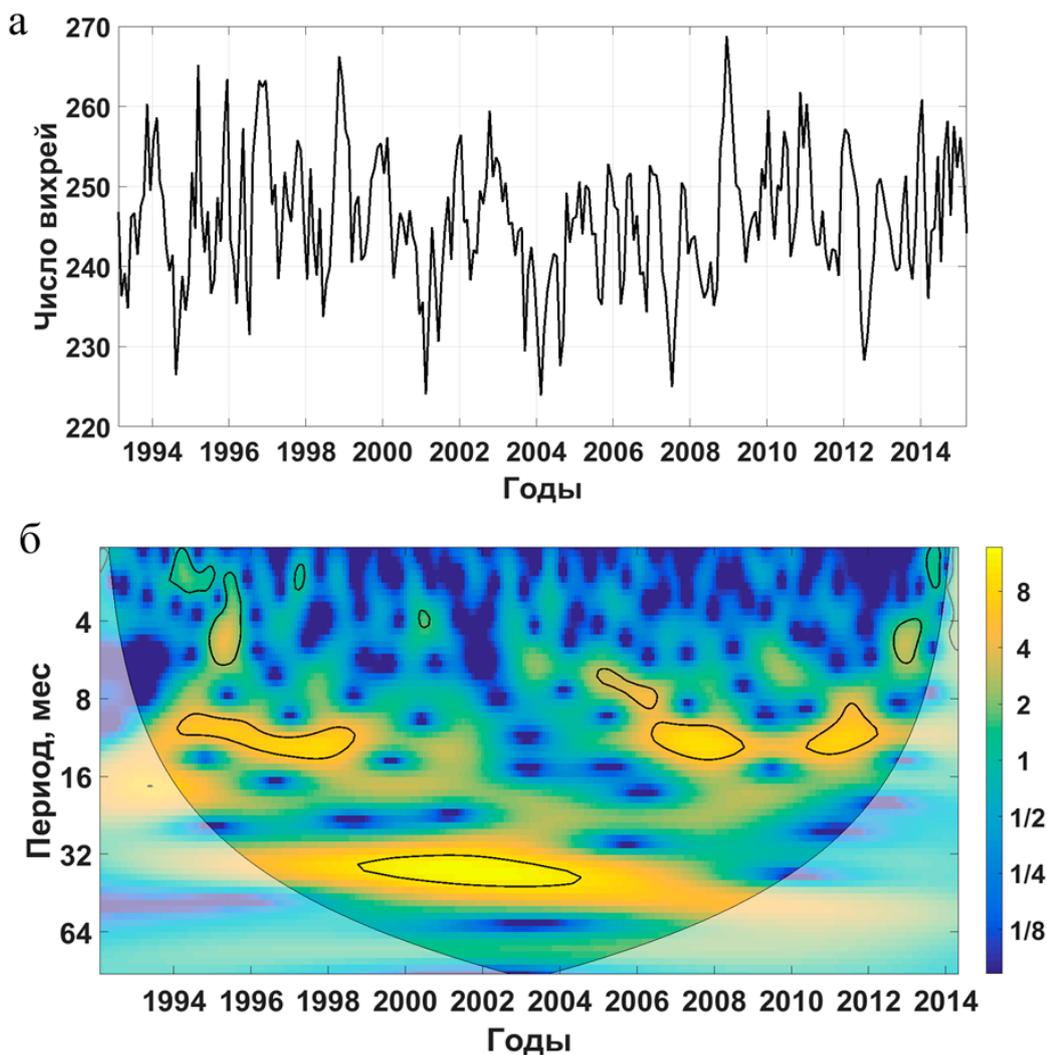


Рис. 4. Временная изменчивость количества мезомасштабных вихрей, выделенных в районе 1 методом автоматической идентификации за период 1993-2015 гг. (а); вейвлет-анализ временного ряда (б). Использовались вейлеты Морле. Цветом выделена область достоверности.

Рисунок 5 характеризует вихреобразование в районе 2. Вихри, образованные в районе «Agulhas Retroflection», участвуют в Агульясовом переносе. На рисунке 5, а видно, что среднее за месяц число вихрей в этом районе варьирует от 28 до 41. На вейвлет-диаграмме (рис. 5, б) для всей реализации выделяется масштаб 3 года, а также масштаб 1,5-2 года для периода 1999-2012 гг. В отдельные годы проявляются масштабы изменчивости числа вихрей 6-8 месяцев. Интересно, что годовой масштаб на вейвлет-диаграмме не выделяется.

За период 1993-2015 гг. в районе 2 зафиксировано 126 вихрей со сроком жизни, превышающем год (см треки на рис. 3, а).

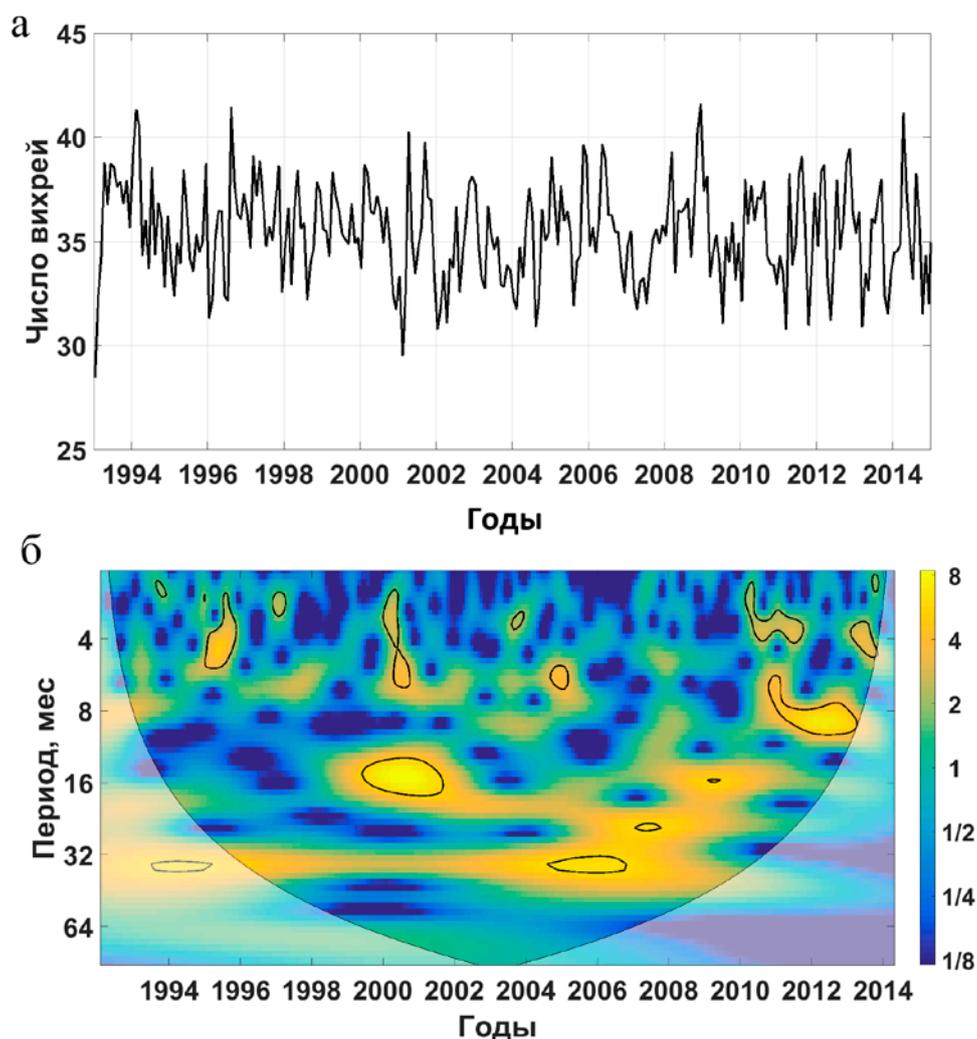


Рис. 5. Временная изменчивость количества мезомасштабных вихрей, выделенных в районе 2 методом автоматической идентификации за период 1993-2015 гг. (а); вейвлет-анализ временного ряда (б). Использовались вейвлеты Морле. Цветом выделена область достоверности.

Отметим, не все мезомасштабные вихри, впервые зарегистрированные в районе «Agulhas Retroflection», действительно покидают этот район. Некоторые из них стационарируют, перемещаются по петлеобразным траекториям и впоследствии диссипируют (Schouten et al., 2000). Те вихри, которые перемещаются в западном направлении, пересекают район 3 и, следовательно, их число может косвенно характеризовать Агульясов перенос. Несмотря на всю условность таких оценок, данный подход позволяет проанализировать Агульясов перенос по числу мезомасштабных вихрей, участвующих в переносе свойств Индийского океана к берегам западной Атлантики. На рисунке 6, а видно, что в районе 3 среднее за месяц число вихрей варьирует от 6,5 до 13. (рис. 6, б). Структуру этой изменчивости мы проанализировали при помощи вейвлет-анализа. Вклад годовых колебаний обнаруживается лишь в отдельные

промежутки: 1994-1995 гг., 1999-2002 гг. с максимальной энергией для периода 2006-2007 гг. Также проявляется трехлетний масштаб колебаний с тенденцией уменьшения до двух лет. В отдельные годы наблюдаются максимумы на масштабах 3-6 месяцев. Отметим, что в целом рассматриваемая изменчивость существенно нестационарна.

За весь период (1993-2015 гг.) 89 вихрей с продолжительностью жизни более 1 года пересекают район 3 (см. рис. 3). Именно эти вихри потенциально способны переносить на большие расстояния воды течения Агульяс.

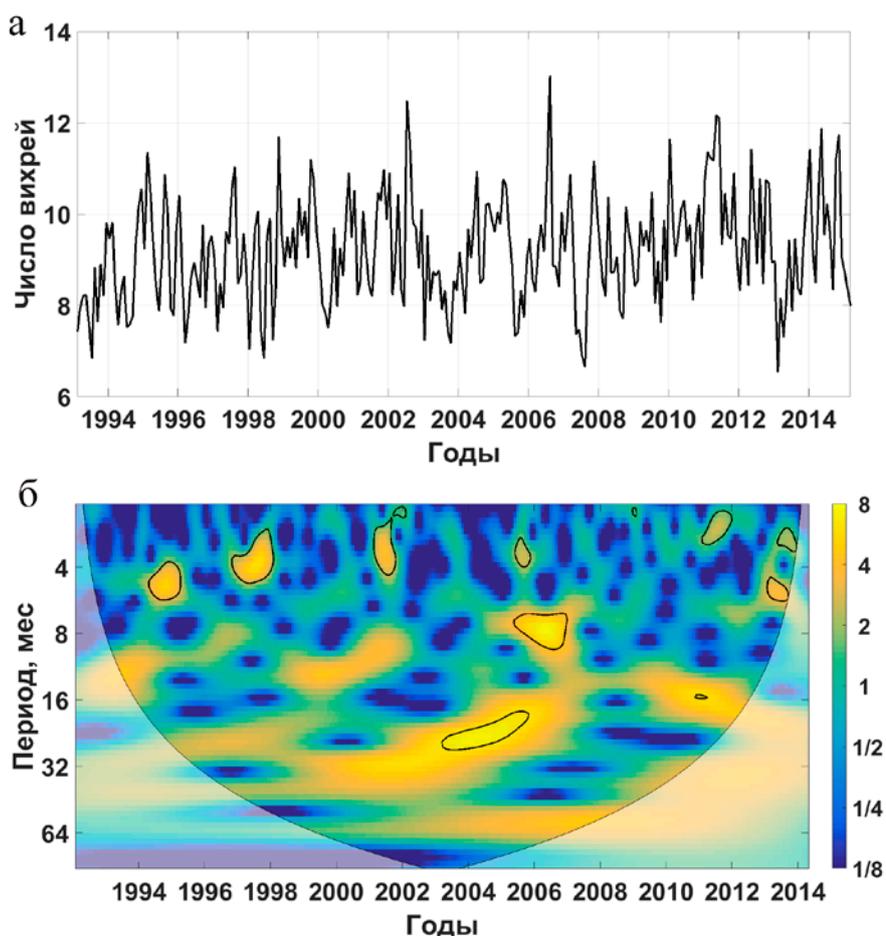


Рис. 6. Временная изменчивость количества мезомасштабных вихрей, выделенных в районе 3 методом автоматической идентификации за период 1993-2015 гг. (а); вейвлет-анализ временного ряда (б). Использовались вейвлеты Морле. Цветом выделена область достоверности.

Район 4 расположен в центре южной части Атлантического океана – вдали от крупномасштабных течений. Вихри, зарегистрированные в этом районе, включают как вихри Агульясова переноса (см. рис. 3), так и другие мезомасштабные вихри. На рисунке 7, а видно, что среднее за месяц число вихрей в районе 4 изменяется от 3 до 11. Вейвлет-анализ показывает, что в отдельные промежутки времени наблюдаются максимумы на масштабах 3-6 месяцев, для годового масштаба и в широком диапазоне масштабов 2-3 года с максимумами для 3 лет в период 2001-2007 гг.

За весь период наблюдений (1993-2015 гг.) только 40 вихрей сроком жизни, превышающем год, пересекли район 4 (рис.3).

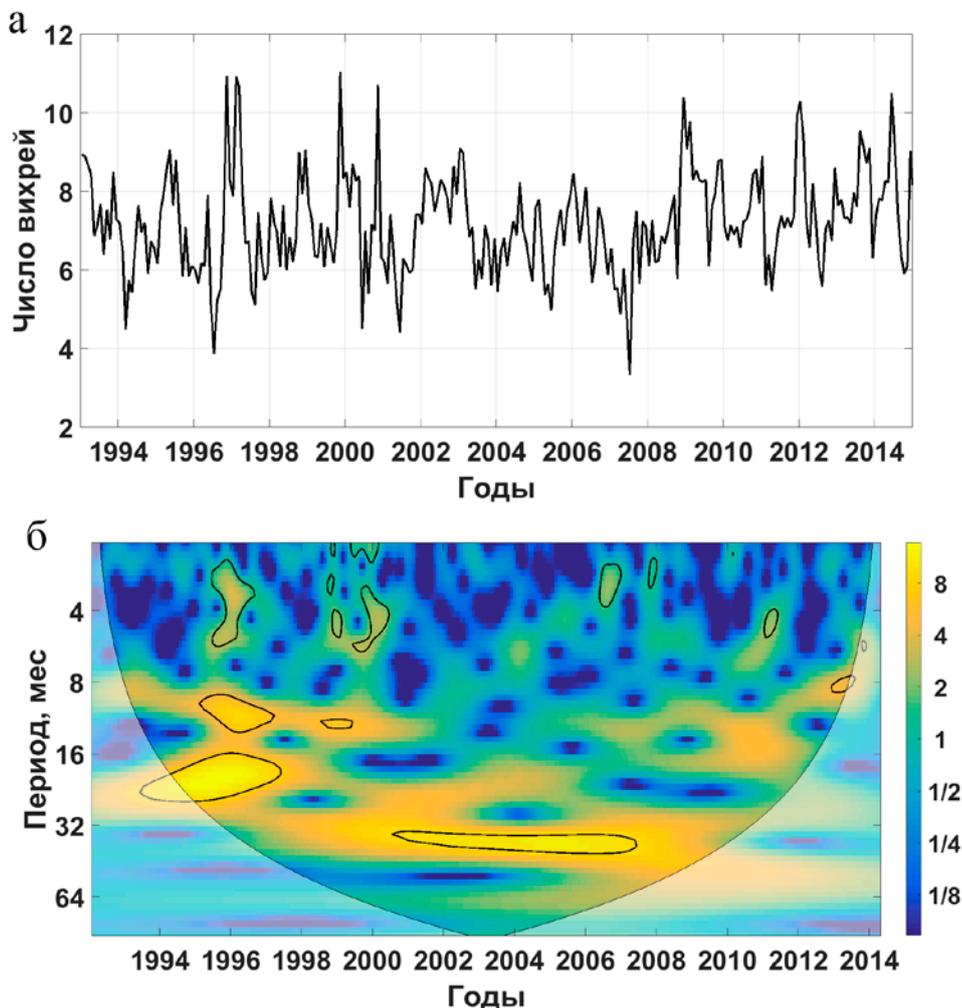


Рис. 7. Временная изменчивость количества мезомасштабных вихрей, выделенных в районе 4 методом автоматической идентификации за период 1993-2015 гг. (а); вейвлет-анализ временного ряда (б). Использовались вейвлеты Морле. Цветом выделена область достоверности.

Рассмотрим теперь последний исследуемый район 5, который расположен вблизи берегов Южной Америки (рис. 2). Всего лишь 20 вихрей с продолжительностью жизни более 1 года, сформированные водами течения Агульяс (в районе 2), достигли берегов Южной Америки. Проанализируем среднемесячную изменчивость числа вихрей, зарегистрированных в районе 5 вне зависимости от их возраста. На рисунке 8, а видно, что среднее за месяц число вихрей в районе 5 в период 1993-2015 гг. варьирует от 4 до 11, а структура изменчивости (рис. 8, б) схожа с изменчивостью в районе 4.

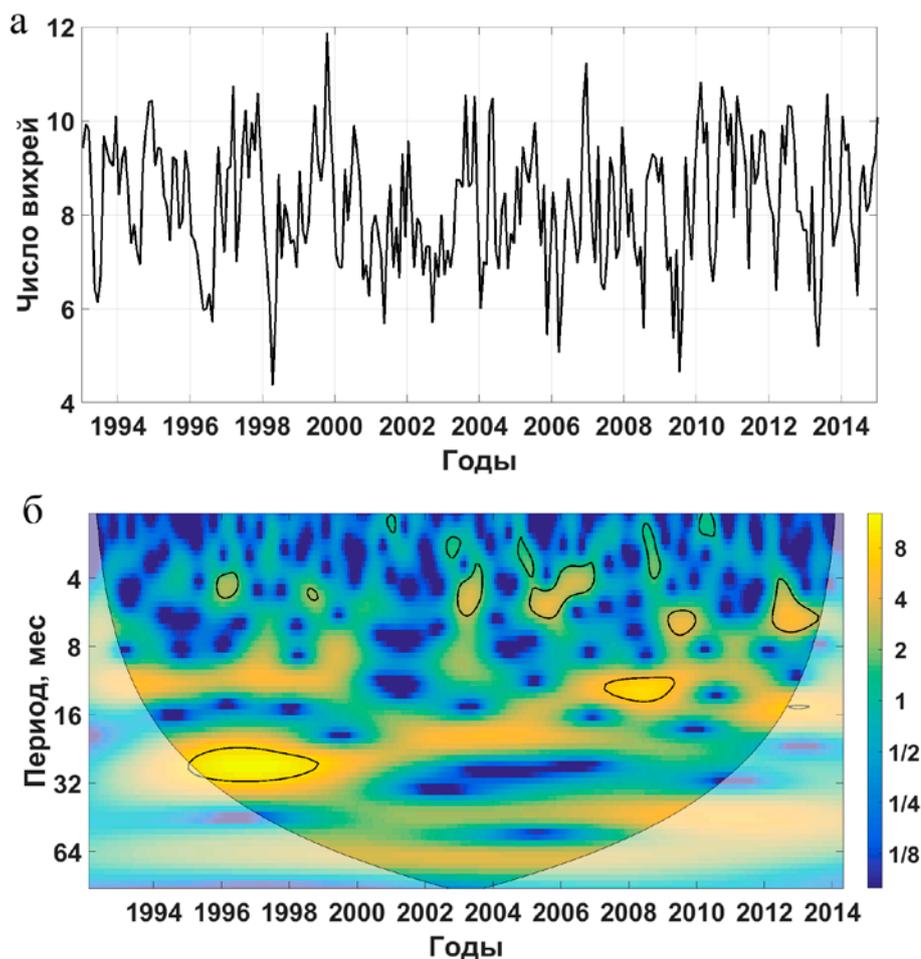


Рис. 8. Временная изменчивость количества мезомасштабных вихрей, выделенных в районе 5 методом автоматической идентификации за период 1993-2015 гг. (а); вейвлет-анализ временного ряда (б). Использовались вейлеты Морле. Цветом выделена область достоверности.

3.2 Анализ вихрей Агульясова переноса

Для исследования вертикальной структуры мезомасштабных вихрей при помощи профилей ARGO, необходимо было из множества вихрей, выделенных методом автоматической идентификации, выявить мезомасштабные вихри (МВ), которые удовлетворяли бы следующим условиям:

1. МВ образован в районе течения Агульяс.
2. МВ является долгоживущим: продолжительность его жизни превышает 6 месяцев.
3. МВ захватывает профиль буя ARGO, а сам буй перемещается вместе с МВ.

4. Профиль ARGO расположен в центре – в ядре МВ.

Таким образом за период с 2013 по 2016 год было зафиксировано и проанализировано около 200 буев и несколько сотен вихрей, и выяснилось, что за данный период, указанным требованиям удовлетворяют два МВ, которые захватили:

1) Буй №6901635.

2) Буй №1901225.

Буй №6901635

Буй №6901635 существовал в период с 06.12.14 по 01.04.16 и весь этот период буй был захвачен вихрем. Характеристики вихря представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики мезомасштабного вихря, которым был захвачен буй №6901635

	Средние значения	Значения на момент попадания буя в вихрь
Время нахождения буя в вихре, дни	482	482
Орбитальная скорость по данным массива Mesoscale... , см/с	45	39
Амплитуда по данным массива Mesoscale... , см	15	14
Радиус , км	98	112
Скорость вихрей, см/с	8,5	8,5

На рисунке 9 показано положение буя №6901635. Видно, что буй захвачен антициклоническим вихрем (положительные значения уровня). Траектории движения буя за весь период его нахождения в вихре изображена на рисунке 10.

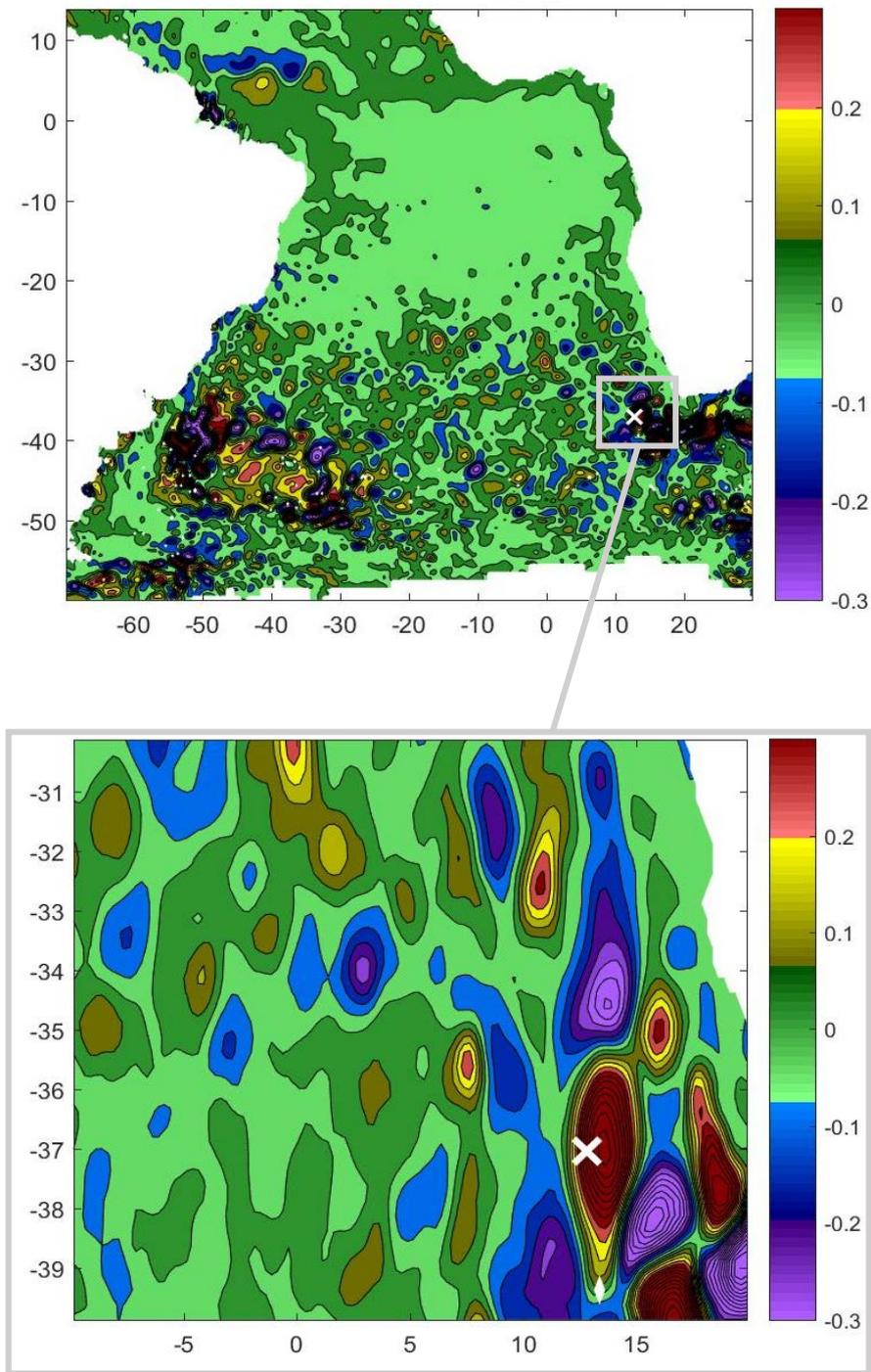


Рис.9 Положение буя №6901635 на 06.12.2014 показано крестиком

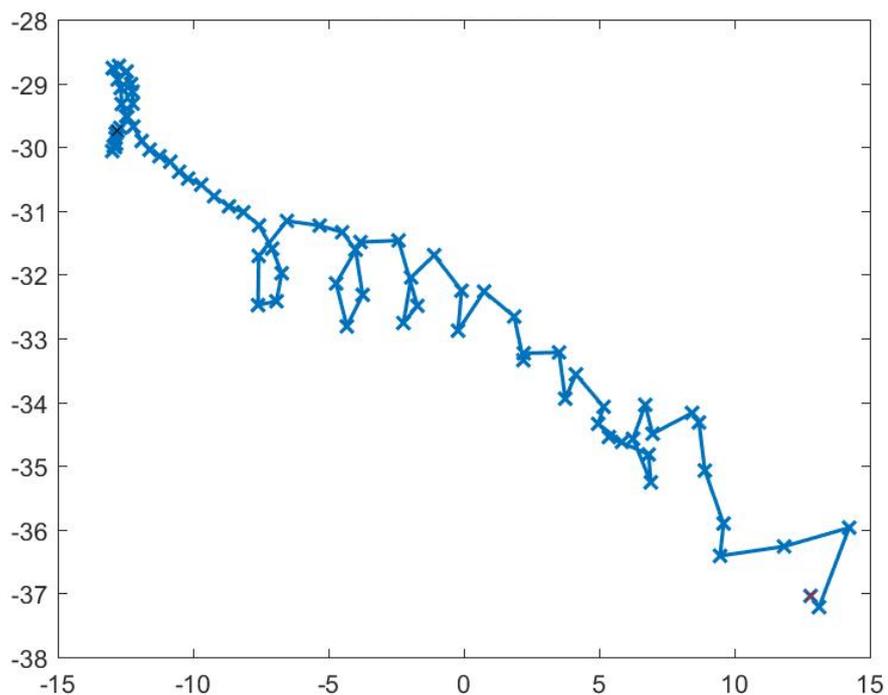


Рис. 10. Траектория буя №6901635. Красным крестиком обозначено начало движения, черным- конец.

Буй №1901225

Срок жизни буя №1901225 – с 08.01.13 по 15.10.15, но захвачен вихрем был только с 16.08.14 по 13.01.15. Характеристики вихря представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики мезомасштабного вихря, которым был захвачен буй № 1901225

	Средние значения	Значения на момент попадания буя в вихрь
Время нахождения буя в вихре, дни	150	150
Орбитальная скорость по данным массива Mesoscale... , см/с	19	16
Амплитуда по данным массива Mesoscale... , см	6	4
Радиус , км	40	49
Скорость вихрей, см/с	8,5	8,5

На рисунке 11 показано положение буя №1901225. Видно, что буй захвачен антициклоническим вихрем (положительные значения уровня). Траектории движения буя за весь период его нахождения в вихре изображена на рисунке 12.

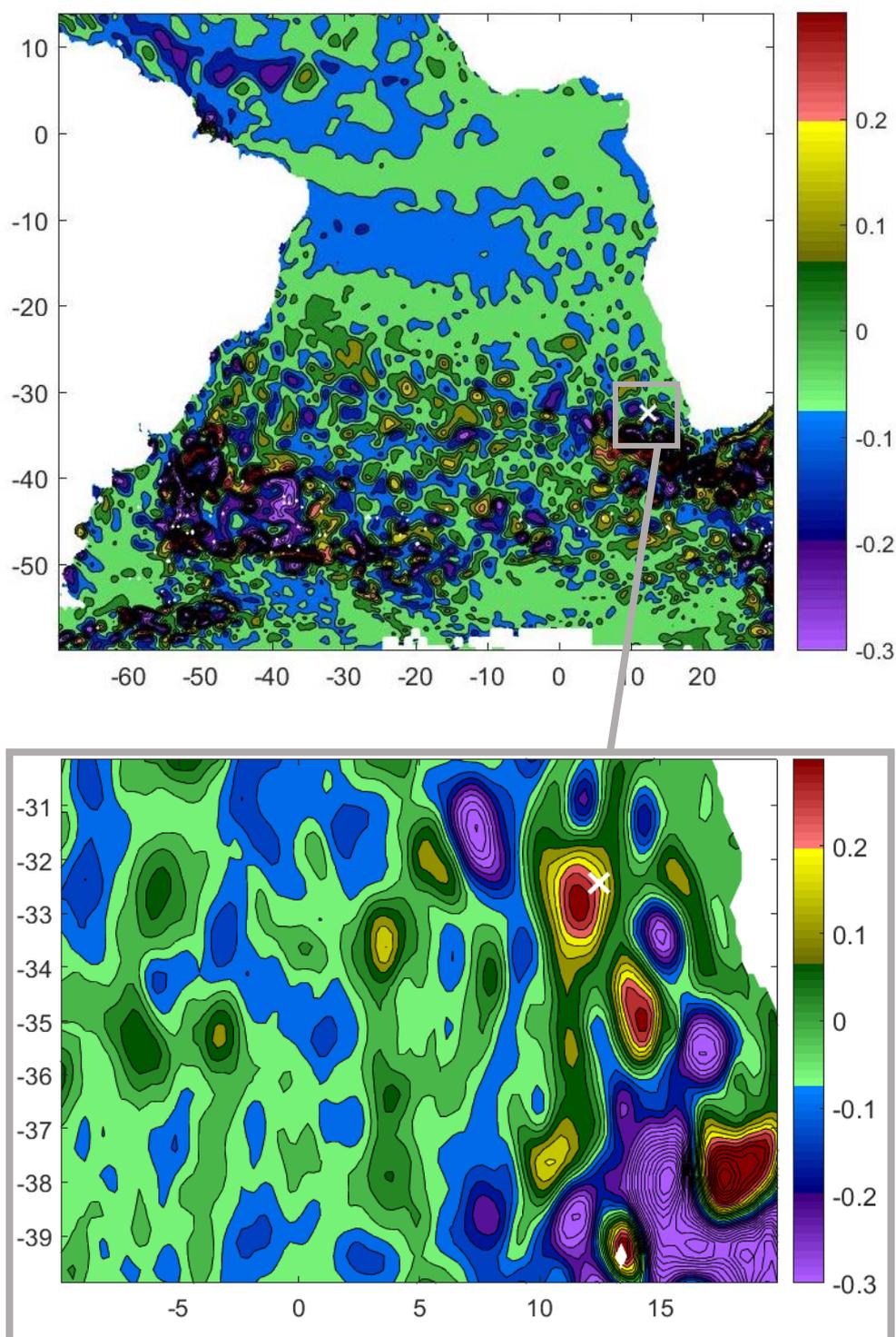


Рис. 11. Положение буя №1901225 на 16.08.2014 показано крестиком.

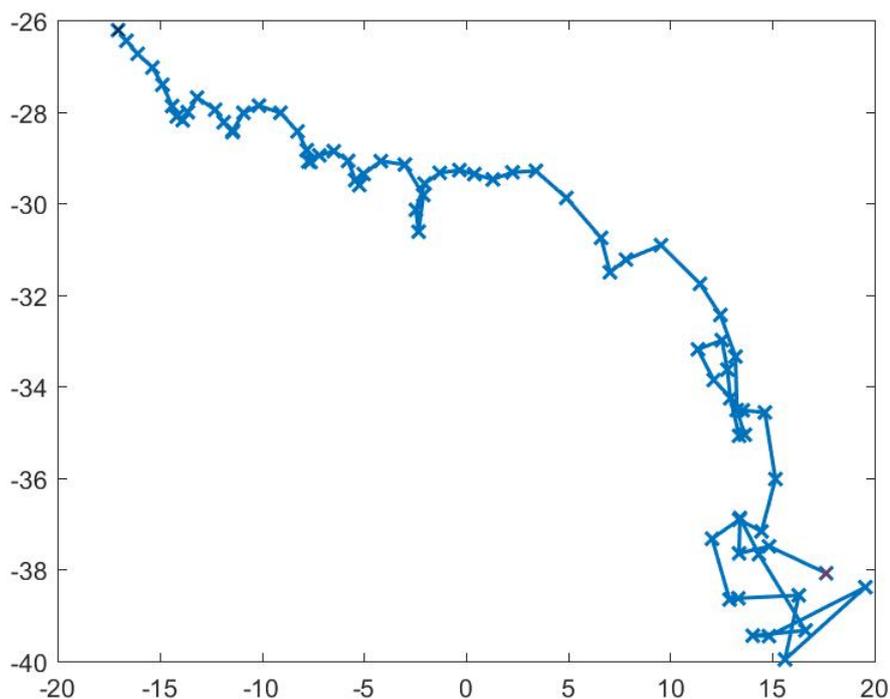


Рис.12. Траектория буя №1901225. Красным крестиком обозначено начало движения, черным- конец.

По профилям буев, захваченных вихрями, были построены графики изменчивости солености и температуры (рис. 13 и 15). Мы видим изменчивость термохалинных характеристик с момента захвата и до конца нахождения буя в вихре. Аномалии рассчитывались относительно среднеклиматических значений в соответствующих точках траектории вихря.

Вихрь буя №6901635

На рисунке 13 видно, что максимум значений аномалий расположен на глубине 500-700 м, температура и соленость на этих глубинах выше среднеклиматических значений на 5 °С и 0,6 psu соответственно. Видно, что глубина вихря составляет около 1000 м. В течение первых двух месяцев захвата вихрем буя на аномалиях четко можно проследить ядро вихря, которое располагается на глубине 300-700 м. Так же видно, что вихрь сохраняет свои характеристики, в течение около 8 месяцев, а затем его интенсивность уменьшается, что говорит либо о том, что буй перемещался в вихре от центра к периферии, либо о том, что вихрь диссипирует.

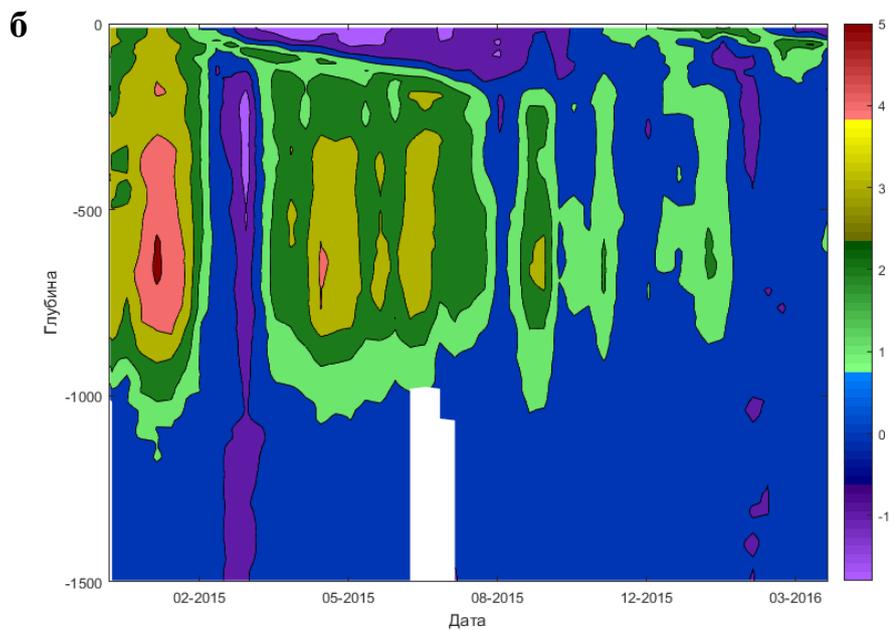
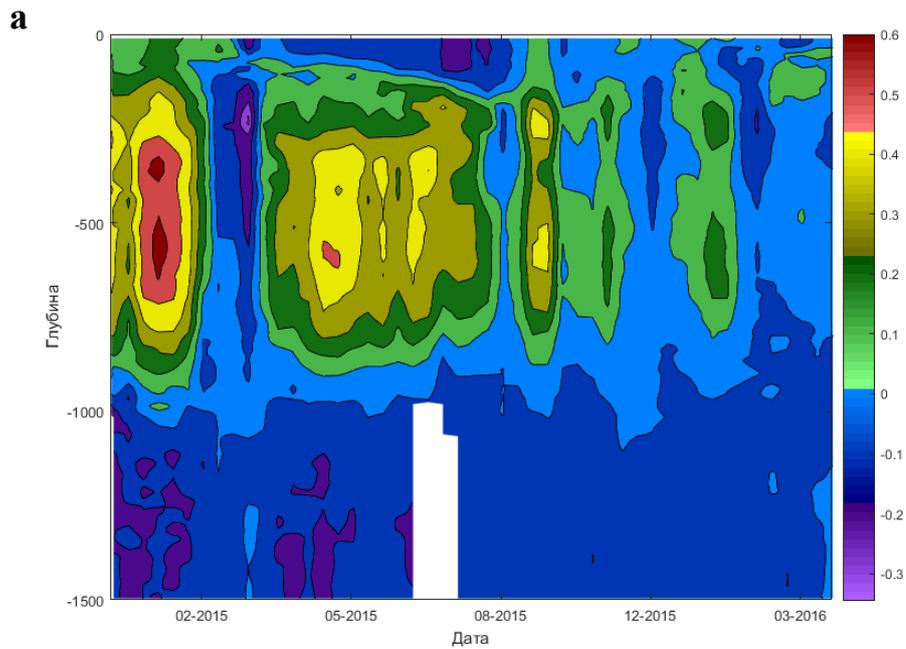


Рис.13. Временная изменчивость аномалий солености (а) и температуры (б) профиля буя №6901635.

На T,S-диаграмме (рис. 14) видно, что все профили буя №6901635 имеют одну и ту же структуру, что говорит о том, что переносилась одна и та же водная масса, и не было перемешивания с окружающими водами.

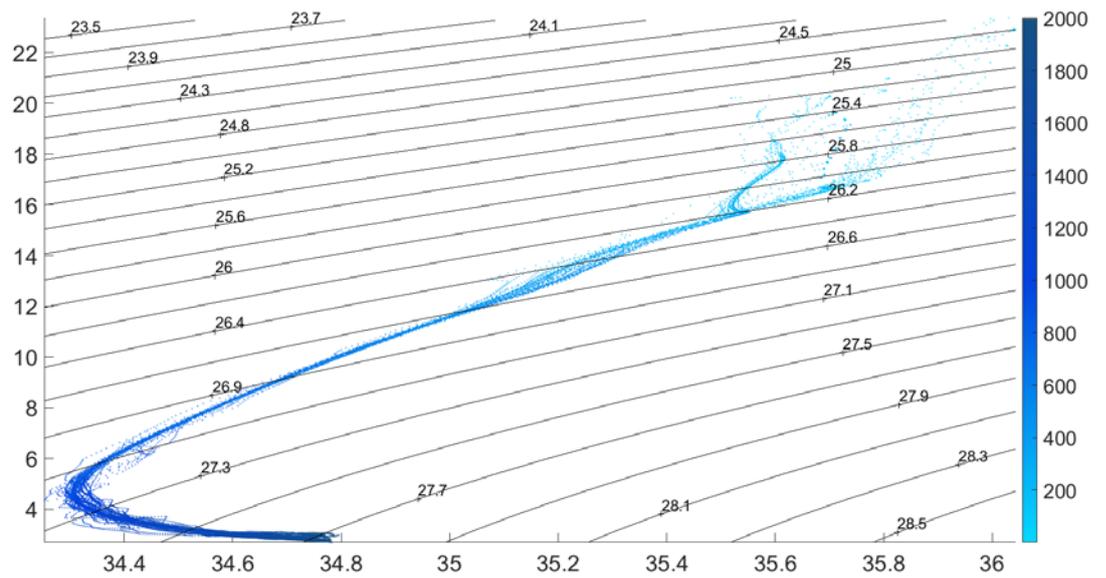


Рис. 14. T,S-диаграмма профилей буя №6901635.

Вихрь буя №1901225

На рисунке 15 представлены аномалии солёности (а) и температуры (б) профиля буя №1901225. Показано, что температура и солёность в ядре вихря, которое достигает глубины 500м, выше среднеклиматических значений на 4 °С и 0,6 psu соответственно. Видно, что глубина вихря составляет около 1000 м. Интенсивность вихря с течением времени уменьшается. Аномалии солёности выражены более явно, чем аномалии температуры.

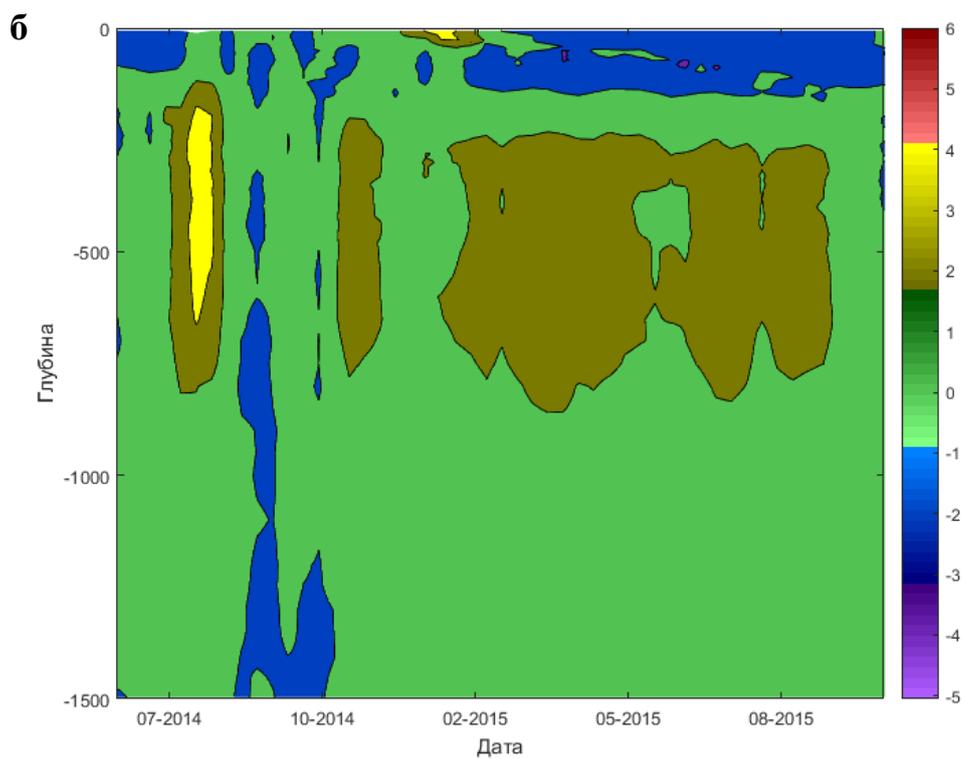
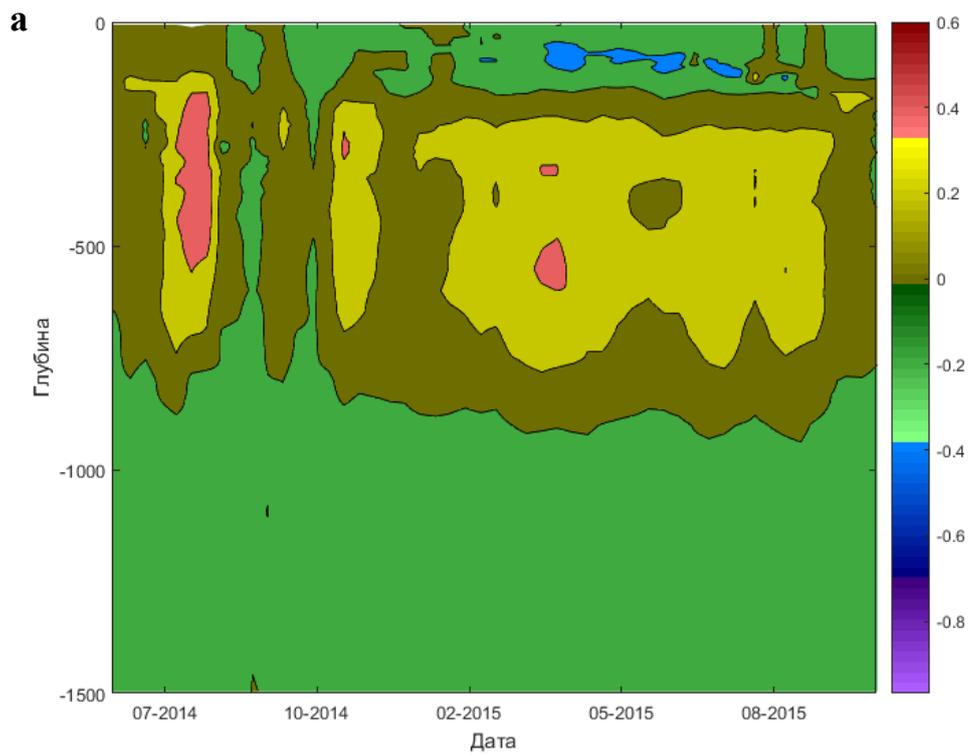


Рис.15. Временная изменчивость аномалий солёности (а) и температуры (б) профиля буя №1901225.

На T,S-диаграмме (рис. 16) наблюдается аналогичная ситуация, как и в вихре буя №6901635. Показано, что все профили буя имеют одну и ту же структуру, что говорит о том,

что переносилась одна и та же водная масса, и не было перемешивания с окружающими водами.

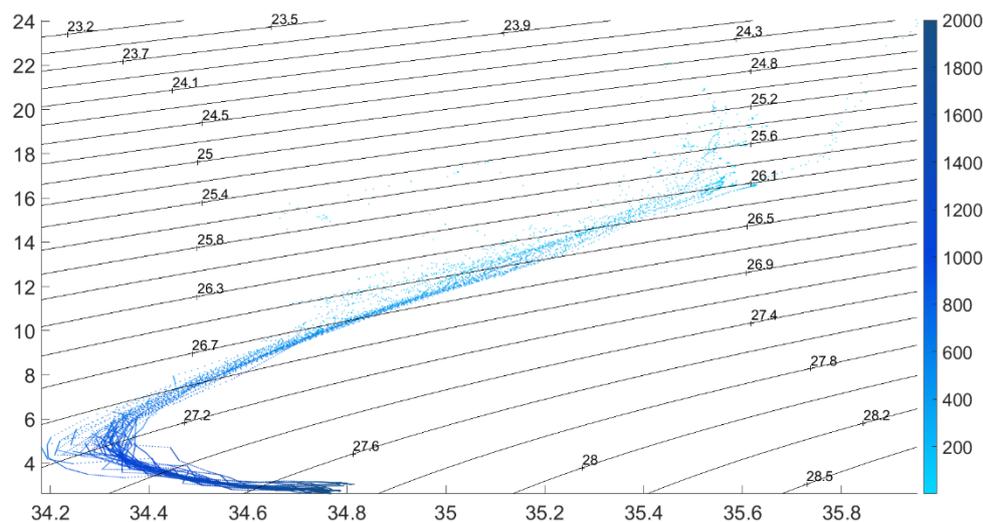


Рис. 16. T,S-диаграмма профилей буя №1901225.

На рисунке 17 и 18 видно, что температура и соленость в водах, индуцированных вихрями, выше средних фоновых значений в Южной Атлантике на 5 °С и 0,8-1 psu соответственно, что было показано и на графике временной изменчивости аномалий температуры и солености профилей буев №6901635 и №1901225 (рис. 13 и 15). Это говорит о том, что вихри несут более теплые и соленые воды в Южную Атлантику, и на протяжении долгого времени сохраняют свои тепловые характеристики.

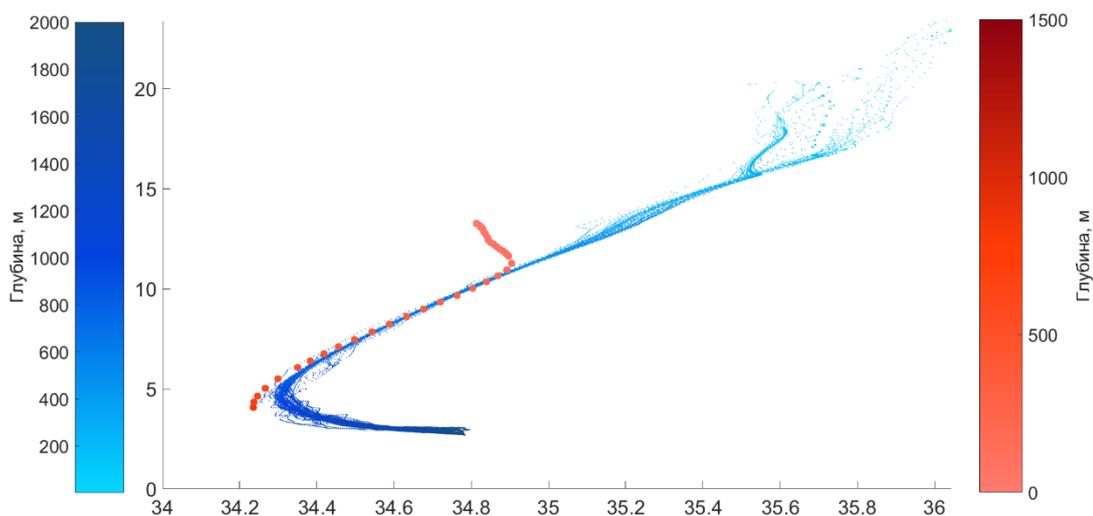


Рис. 17. T, S-кривые профилей буя №6901635 (синим цветом) и Южной Атлантики (красным цветом).

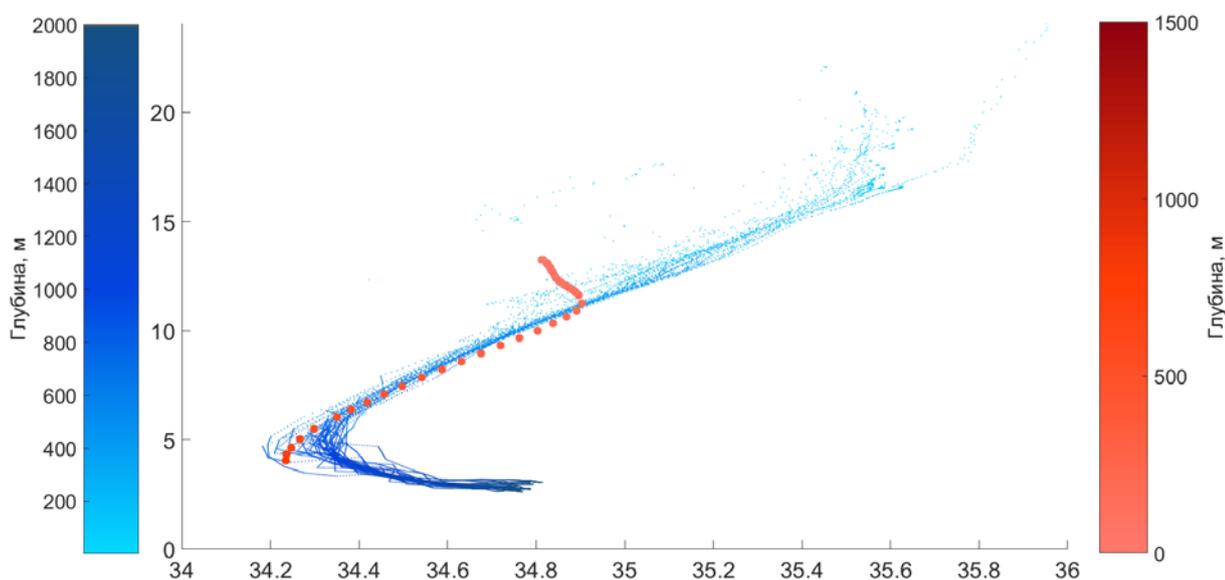


Рис. 18. Т, S-кривые профилей буя №1901225 (синим цветом) и Южной Атлантики (красным цветом).

3.3 Расчет расхода Агульсова переноса по характеристикам долгоживущим вихрей

Так как вихри течения Агульяс являются доминирующими структурами, переносящими воды Индийского океана в Атлантический, то количественная оценка Агульсова переноса позволяет понять, как Индийский океан влияет на процессы в Атлантике.

Перенос (расход) одним вихрем рассчитывался по стандартной формуле:

$$T = S * \mathcal{V},$$

где S -площадь поперечного сечения цилиндра, которая рассчитывается по формуле:

$$S = 2 * R * h,$$

где R -радиус вихря, равный 50 км, h - глубина вихря, равная 1 км,

\mathcal{V} – скорость перемещения вихря, равная 8,5 см/с или 0,085 м/с.

Таким образом, объемный транспорт одним вихрем составляет **8,5 Sv**.

Если исходить из того, что за весь период с 1993 по 2015 год западной части Южной Атлантики достигло 20 долгоживущих вихрей течения Агульяс, то за 23 года Агульсов перенос составляет **170 Sv**, а годовой перенос равен **7,4 Sv**, что согласуется с оценками, которые были получены другими методами.

Заключение

Мы рассмотрели 5 районов, относящихся к Агульсову переносу, и проанализировали треки мезомасштабных вихрей, генерация которых зафиксирована в районе «Agulhas Retroflexion» и перемещаются в западном направлении под влиянием β -эффекта. Будучи сформированными водами Индийского океана, эти вихри переносят в Южную Атлантику теплые и соленые аномалии, влияя на глобальную термохалинную циркуляцию.

На основе массива Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» мы проанализировали, как изменяется число вихрей, участвующих в Агульсовом переносе. Для этого мы рассматривали только те вихри, которые имеют продолжительность жизни больше года. Мы показали, что за 23-летний период (1993-2015 гг.) в районе «Agulhas Retroflexion» сформировалось 126 вихрей, а затем их число последовательно уменьшалось: 89 вихрей в 3м районе, 40 вихрей в 4м и 20 вихрей в 5м районе. Таким образом, только шестая часть вихрей пересекает Атлантику и достигает берегов Южной Америки. Указанные оценки позволяют косвенно оценить величину Агульсова переноса: для района 3 средняя оценка составляет 27 Sv, а для районов 4 и 5 – 21 Sv.

В рассматриваемых районах проанализирована изменчивость количества вихрей и показано, что во всех случаях устойчиво выделяется 2-3 летний масштаб колебаний, возможно, связанный с квазидвухлетними циклами колебания атмосферных параметров. Для других масштабов характерна выраженная нестационарность: вклад годовых колебаний проявляется только в отдельные годы и также не во всех районах, как и внутригодовые циклы, при этом наблюдается сходство вейвлет-диаграмм в районах 4 и 5, для которых практически одинаковый диапазон изменчивости.

На основе данных буев ARGO была проанализирована вертикальная структура вихрей и показано, что температура и соленость в водах вихрей выше средних значений в Южной Атлантике на 5 °C и 0,8-1 psu соответственно. Также показано, что вихри, перемещаясь на значительные расстояния, сохраняют свои тепловые характеристики, воды вихрей не перемешиваются с окружающими водами.

Была произведена оценка Агульсова переноса, он составляет 170 Sv за весь период наблюдений (23 года), а годовой перенос равен 7,4 Sv.

Публикации автора по теме исследования

1. Малышева А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В., Сандалюк Н.В. ВИХРИ АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ, Ученые записки РГГМУ, 2018, №52, С. 154-170

2. Малышева А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В., Сандалюк Н.В. Вихри Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии, Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 2018, С. 294

3. Малышева А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Влияние изменчивости Агульяского течения на меридиональную термохалинную циркуляцию, Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», 2018, С. 427-431

4. Малышева А.А., Белоненко Т.В., Кубряков А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ И БУЕВ АРГО, Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», г. Севастополь, ФГБУН МГИ, 2019, С. 108

Список литературы

1. Beal L.M., and Bryden H.L. The velocity and vorticity structure of the Agulhas Current at 32°S // *J. Geophys. Res.* - 1999. Vol.104. Issue C3. - P. 5151-5176.
2. Beismann J.-O., Kase R. H. and Lutjeharms J. R. E. On the influence of submarine ridges on translation and stability of Agulhas rings // *J. Geophys. Res.* - 1999. Vol.104. Issue C4. - P. 7897-7906.
3. Biastoch A., Böning C. W., Lutjeharms J. R. E. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature.* - 2008. Vol.456. - P.489–492.
4. Boebel O., Rae C.D., Garzoli S., Lutjeharms J., Richardson P., Rossby T., Schmid C. and Zenk W. Float experiment studies interocean exchanges at the tip of Africa // *Trans. Amer. Geophys. Union.* - 1998. Vol.79. - P.1–8.
5. Boebel, O., Rossby T., Lutjeharms J., Zenk W. and Barron C. Path and variability of the Agulhas Return Current // *Deep Sea Res.* - 2003 Part II. Vol.50. - P.35 – 56.
6. Bryden H.L., Beal L.M., and Duncan L.M. Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability // *Journal of Oceanography.* - 2005. Vol. 61. - P. 479 – 492.
7. Byrne D. A., Gordon A. L. and Haxby W. F. Agulhas Eddies: A Synoptic View Using Geosat ERM Data // *Journal of Physical Oceanography.* - 1995. Vol.25. - P.902-917.
8. Caley T., Giraudeau J., Malaizé B., Rossignol L., Pierre C. Agulhas leakage as a key process in the modes of Quaternary climate changes // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* - 2012. Vol.109. - P.6835–6839
9. Casanova-Masjoan M., Pelegrí JL, Sangrà P., Martínez A, Grisolia-Santos D., Pérez-Hernández M. D., Hernández-Guerra A. Characteristics and evolution of an Agulhas ring // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* - 2017. Vol.122. Issue 9. - P.7049-7065.
10. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* - 2011. Vol.91. - P.167-216.
11. Chelton, D. B., M. G. Schlax, R. M. Samelson, and R. A. de Szoeke Global observations of large oceanic eddies // *Geophys. Res. Lett.* - 2007. Vol.34. L15606.
12. Cheng Yu, Putrasahan D., Beal L., Kirtman B. Quantifying Agulhas Leakage in a High-Resolution Climate Model // *Ocean Sciences.* - 2016. Vol. 29. Issue 19. - P. 6881-6892.
13. Colin de Verdière, A., and T. Huck Baroclinic instability: An oceanic wavemaker for interdecadal variability // *J. Phys. Oceanogr.* - 1999. Vol.29. - P.893-910.

14. Danabasoglu, G., et al. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states // *Ocean Modelling*. - 2014. Vol.97. - P.65-90.
15. de Ruijter, W. P. M., Ridderinkhof H., Lutjeharms J. R. E. and Schouten M. W. Direct observations of the flow in the Mozambique Channel // *Geophys. Res. Lett.* - 2002. Vol.29. Issue 10. - P.140-1-140-3.
16. de Ruijter, W.P.M., Biastoch, A., Drijfhout, S.S., Lutjeharms, J.R.E., Matano, R.P., Pichevin, T., van Leeuwen, P.J. and Weijer, W. Indian-Atlantic interocean exchange: dynamics, estimation and impact // *Journal of Geophysical Research*. - 1999. Vol.104. Issue C9. - P. 20885-20910.
17. De Steur L., Van Leeuwen P. J. and Drijfhout S. S. Tracer leakage from modeled Agulhas rings // *J. Phys. Oceanogr.* - 2004. Vol.34. - P.1387–1399.
18. De Steur, L. and van Leeuwen P.J. The influence of bottom topography on the decay of modeled Agulhas rings // *Deep-Sea Res.* - 2009. Issue 56. - P.471-494.
19. Dijkstra H. A. and de Ruijter W. P. M. On the Physics of the Agulhas Current: Steady Retroflexion Regimes // *J. Phys. Oceanogr.* - 2001. Vol.31. - P.2971–2985
20. Doglioli A. M., Blanke B., Speich S. and Lapeyre G. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* - 2007. Vol.112. C05043.
21. Doglioli, A. M., Veneziani, M., Blanke, B., Speich, S., and Griffa, A. A Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model // *Geophysical Research Letters*. - 2006. Vol.33. L14611.
22. Donners J., Drijfhout S. S. and Coward A. C. Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. - 2004. Vol.31 Issue 16. L16312.
23. Donohue E.A., Firing E. and Beal L. Comparison of the three velocity sections of the Agulhas Current and the Agulhas Undercurrent // *Journal of Geophysical Research*. - 2000. Vol.105. Issue C12. - P.28,585 – 28,593.
24. Drijfhout S. S. and de Vries P. Impact of Eddy-Induced Transport on the Lagrangian Structure of the Upper Branch of the Thermohaline Circulation // *J. Phys. Oceanogr.* - 2003. Vol. 33. - P. 2141 – 2155.
25. Durgadoo J. V. Controls and impact of Agulhas leakage. Dissertation in fulfilment of the requirements for the degree “Dr. rer. nat.” of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences at Kiel University.- Kiel. - 2013. - 119 p.

26. Durgadoo, J. V., Ruhs S., Biastoch A. and Boning C. W. B. Indian Ocean sources of Agulhas leakage // *J. Geophys. Res. Oceans*. - 2017. Vol.122. - P.3481–3499.
27. Eden C., Jung T. North Atlantic Interdecadal Variability: Oceanic Response to the North Atlantic Oscillation (1865–1997). // *J. Climate*. - 2001. 14(5). - P.676–691
28. Garzoli, S. L., and A. L. Gordon Origins and variability of the Benguela Current // *J. Geophys. Res.* - 1996. Vol.101. - P.987–906.
29. Garzoli, S.L., and Goni G.J. Combining altimeter observations and oceanographic data for ocean circulation and climate studies // *Elsevier Oceanographic Series*. - 2000. Vol.63. - P.79-95.
30. Giulivi, C. F. and Gordon A. L. Isopycnal displacements within the Cape Basin thermocline as revealed by the hydrographic data archive // *Deep Sea Res.* - 2006. Part I. Vol.53. - P.1285–1300.
31. Goni, I., Garcia-Alonso, A., and Saura-Calixto, F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index // *Nutrition Research*. - 1997. Vol.17. - P.427–437.
32. Gordon A. L., Haxby W.F. Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. - 1990. Vol. 5. Issue C3. - P. 3117-3125.
33. Gordon A.L. Indian-Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflection // *Science*. - 1985. Vol.227. - P.1030-1033.
34. Gordon, A.L., Lutjeharms, J.R.E., Grundlingh, M.L. Stratification and circulation at the Agulhas retroflection // *Deep Sea Res.* - 1987. Part A, 34. - P.565–599.
35. Gordon, A.L., Weiss, R.F., Smethie, W.M., Warner, M.J. Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *Journal of Geophysical Research*. - 1992. Vol. 97. no. c5. - P. 7223-7240.
36. Hall M. M, Bryden H. L. Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport // *Deep Sea Res.* - 1982. 29. - P. 339 – 359.
37. Hermes, J.C., Reason, C.J.C., Lutjeharms, J.R.E, Modeling the variability of the Greater Agulhas Current System // *J. Climate*. - 2007. 20. - P.3131–3146.
38. Jayne S. R.,Marotzke J. The Oceanic Eddy Heat Transport // *J. Phys. Oceanogr.* - 2001. Vol.32. - P.3328 – 3345.
39. Kamenkovich, V. M., Leonov Y. P., Nechaev D. A., Byrne D. A, and Gordon A. L. On the influence of bottom topography on the Agulhas eddy // *J. Phys. Oceanogr.* - 1996. Vol.26. - P.892–912.
40. Lutjeharms J. R. E. Three decades of research on the greater Agulhas Current // *Ocean Science*. - 2007. 3. - P.129– 147.

41. Lutjeharms J. R. E. *The Agulhas Current*. - 2006. - Springer-Verlag, Berlin. - 329 p.
42. Lutjeharms J.R.E., Van Ballegooyen R.C. *The Retroflection of the Agulhas Current // J. Phys. Oceanogr.* - 1988. Vol. 18. - P. 1570 – 1583.
43. Lutjeharms, J.R.E., Valentine, H.R. *Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // J. Phys. Oceanogr.* - 1988. Vol.18. - P.761–774.
44. Matano R.P., Simionato C.G., Ruijter W.P., van Leeuwen P.J., Strub P.T., Chelton D.B. and Schlax M.G. *Seasonal variability in the Agulhas Retroflection region // Geophys. Res. Lett.* - 1998. 25. - P.4361 – 4364.
45. Matano, R.P., Beier, E.J. *A kinematic analysis of the Indian/Atlantic interocean exchange // Deep Sea Res.* - 2003. Part II. 50. - P. 229–249.
46. Olson, D. B., and R. H. Evans *Rings of the Agulhas Current // Deep Sea Res.* - 1986. Vol.33. - P.27-42.
47. Pujol, M.-I., Faugère, Y., Taburet, G., Dupuy, S., Pelloquin, C., Ablain, M., Picot, N. *DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years // Ocean Sci.* – 2016. 12. – P. 1067-1090.
48. Reason, C. J. C., Lutjeharms J. R. E., Hermes J., Biastoch A. and Roman R. E. *Inter-ocean fluxes south of Africa in an eddy-permitting model // Deep Sea Res.* - 2003 Part II. Vol.50. - P.281–298.
49. Renault, L., McWilliams J. C. and Masson S. *Satellite observations of imprint of oceanic current on wind stress by air-sea coupling // Scientific Reports.* - 2017. 7 (1), 17 747.
50. Richardson and Garzoli *Characteristics of intermediate water flow in the Benguela current as measured with RAFOS floats // Deep-Sea Research* - 2003 Part II Vol.50 - P.87–118.
51. Richardson, P.L. *Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters // Deep-Sea Res. Part I.* - 2007. Vol.54. Issue 8. - P.1361–1389.
52. Schmitz, W. J. *On the interbasin-scale thermohaline circulation // Rev. Geophys.* - 1995. Vol.33. 2. - P.151-173.
53. Schouten M. W., De Ruijter W. P. M., Van Leeuwen P. J. and Lutjeharms J. R. E. *Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean // Journal of Geophysical Research.* - 2000. Vol.105. NO. C9. - P. 21913-21925.
54. Stramma L. and Lutjeharms J.R.E. *The flow field of the subtropical gyre in the South Indian Ocean into the Southeast Atlantic Ocean: a case study // Journal of Geophysical Research.* - 1997. Vol.102. C3. - P.5513-5530.

55. Treguier, A.M., Boebel, O., Barnier, C., Madec, G. Agulhas eddy fluxes in a 1/6° Atlantic model // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. - 2003. Vol.50. Issue 1. - P. 251-280.
56. van Sebille, E., and P. J. van Leeuwen Fast Northward Energy Transfer in the Atlantic due to Agulhas Rings // *Journal of Physical Oceanography*. - 2007. Vol.37. - P.2305–2315.
57. van Sebille, van Leeuwen E., P. J., Biastoch A., Barron C. N. and de Ruijter W. P. M. Lagrangian validation of numerical drifter trajectories using drifting buoys: Application to the Agulhas system // *Ocean Modell.* - 2009. 29. - P.269–276.
58. Wang, Y., F. J. Beron-Vera, and M. J. Ollascoaga The life cycle of a coherent Lagrangian Agulhas ring // *J. Geophys. Res. Oceans*. - 2016. Vol.121. - P.3944–3954.
59. Wang, Y., M. J. Ollascoaga, and F. J. Beron-Vera Coherent water transport across the South Atlantic // *Geophys. Res. Lett.* - 2015. Vol.42. - P.4072–4079.
60. Weijer W., E. V. Sebille Impact of Agulhas Leakage on the Atlantic Overturning Circulation in the CCSM4 // *Journal of Climate*. - 2014. Vol.27. - P.101-110.
61. Weijer, W., W. de Ruijter, A. Sterl, and Drijfhout S., Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy // *Global Planet. Change*. - 2002. 34(3–4). - P.293–311.
62. Williams S., Petersen M., Bremer P.-T., Hecht M., Pascucci V., Ahrens J., Hlawitschka M. and Hamann B. Adaptive extraction and quantification of geophysical vortices // *IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics*. - 2011. Vol.17. No.12. - P.2088-2095.