

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ И БУЕВ АРГО

© 2020 г. А. А. Малышева^а, *, А. А. Кубряков^б, А. В. Колдунов^а, Т. В. Белоненко^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^бМорской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: alinamalysheva97@mail.ru

Поступила в редакцию 04.11.2019 г.

Изучение мезомасштабных вихрей дает 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. “Агульясов перенос” относится к водам, экспортируемым из Индийского океана в Атлантический системой течений Агульяс. Эти воды состоят главным образом из верхних и промежуточных вод индо-океанского происхождения. Мезомасштабные вихри, образованные течением Агульяс, являются доминирующими структурами, переносящими воды Индийского океана в Атлантику. В работе исследуется Агульясов перенос на основе комплексного анализа альтиметрических карт и данных буев ARGO. Захваченные вихрями буи ARGO позволяют исследовать вертикальную структуру вихрей Агульясова переноса. Установлено, что мезомасштабные вихри Агульясова переноса, пересекая Атлантику, проходят тысячи километров, сохраняя свою структуру. Показано, что оценка Агульясова переноса (расход) одним мезомасштабным вихрем в среднем составляет 8.5 Sv. Транспорт тепла и соли одним мезомасштабным вихрем Агульясова переноса составляет 2.25×10^9 Вт и 5.36×10^5 кг с⁻¹ соответственно. Теплосодержание и солесодержание в одном вихре Агульясова переноса – 2.03×10^{15} Дж и 4.83×10^{11} кг соответственно.

Ключевые слова: уровень океана, альтиметрические измерения, мезомасштабные вихри, волны Россби, Индийский, Атлантический океан, SLA, аномалии уровня океана, ARGO

DOI: 10.31857/S0205961420020049

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что мезомасштабные вихри образуются практически повсеместно на всей акватории Мирового океана и способны переносить тепло, массу, кинетическую энергию и биохимические характеристики из региона их формирования на огромные расстояния, влияя на колебания климата (см. обзор в работе Chelton et al., 2011). Районы повышенной 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 океане. В южном полушарии одним из таких течений является течение Агульяс, являющееся частью направленного на запад Южно-Экваториального течения. Термин “Агульясов перенос” (Agulhas leakage) относится к водам, экспортируемым мезомасштабными вихрями, зародившимися в районе системы течений Агульяс, из Индийского океана через Атлантический океан к берегам Южной Америки. Вихри Агульясова переноса

являются ключевым звеном водообмена в южном полушарии (Burne et al., 1995; Doglioli et al., 2006), влияют на Атлантическую меридиональную термохалинную циркуляцию, поэтому получение численных оценок этих явлений крайне важно.

Развитие современной океанографии невозможно без спутниковых наблюдений, которые произвели революцию в океанографии. Уолтер Манк высоко оценил возможности спутниковой альтиметрии и назвал запуск спутника TOPEX/Poseidon 10 августа 1992 года самым успешным океаническим экспериментом всех времен (Munk, W., 2000). В настоящее время доступны измерения уровня Мирового океана с пространственным разрешением 1/4°, и сегодня спутниковая альтиметрия является основным инструментом изучения вихревой динамики в морях и океанах. В последние годы было предпринято множество усилий, чтобы достичь точности измерений высоты морской поверхности 1–2 см (Marcos et al., 2015).

Согласно литературным источникам, влияние Агульясова переноса на общую циркуляцию в Ат-

лантическом океане происходит благодаря двум основным механизмам: излучение волн Россби и адвекция мезомасштабными вихрями (Bjostoch et al., 2008; van Sebille et al., 2007). Первый механизм авторы относят к линейным процессам, а второй к нелинейным. Однако есть, как минимум, один момент, который не позволяет однозначно отделить вихри от волн Россби. Когда говорят о волнах Россби, то, как правило, рассматривают линейное дисперсионное соотношение, позволяющее в длинноволновом приближении теоретически оценить фазовую скорость волн (Белоненко и др., 1998, 2004, 2016; Chelton et al., 2011; Белоненко и Кубряков, 2014). Однако и при нелинейном подходе скорость перемещения вихрей также берут из линейной задачи (Chelton et al., 2011). В рамках квазигеострофической теории показано, что волны Россби и мезомасштабные вихри в океане – это нелинейные процессы, имеющие единые механизмы генерации Ле Блон и Майсек (1981), Незлин (1986), Педлоски (1984), Гневешев и др. (2019). Не углубляясь далее в теорию, отметим лишь, что вихри Агульясова переноса перемещаются на запад, иногда преодолевают тысячи километров, при этом их траектории на несколько градусов отклоняются к экватору (Chelton et al., 2011).

Известно, что поступающие в бассейн мыса Игольного воды являются более теплыми и солеными по сравнению с окружающими в термоклине (Giulivi et al., 2006), а создаваемые в изопикнах неоднородности излучают вихревые возмущения, которые медленно распространяются по Южной Атлантике. По утверждению Bjostoch et al. (2008) и Weijer et al. (2014), эти вихри достигают южноамериканского побережья в течение нескольких лет и впоследствии в виде волн Кельвина быстро распространяются через экватор в северное полушарие. К югу от мыса Игольного есть несколько районов, где наблюдается повышенное образование мезомасштабных структур. Один из них, получивший в англоязычных источниках название “Agulhas Retroflexion” (в русскоязычной научной литературе не существует аналогов данному термину), характеризуется резким разворотом Агульясова течения на восток и образованием петли (Lutjeharms, Ballegooyen, 1988; Lutjeharms, Valentine, 1988). Вихри Агульясова переноса зарождаются преимущественно здесь, в районе, расположенном в пределах 30° – 45° ю.ш., 10° – 35° в.д. (Сандалюк, Белоненко, 2018).

По данным спутниковой альтиметрии средние скорости вихрей составляют 5–8 см/с (Garzoli et al., 2000). Вихри Агульясова переноса неоднократно исследовались по спутниковым снимкам температуры поверхности моря совместно с данными альтиметров (Burne et al., 1995, Beismann et al., 1999, Schouten et al., 2000, Garzoli et al., 2000; Doglioli et al., 2007), однако оценка вихревого транс-

порта на основе этих данных не проводилась. Существуют оценки Агульясова переноса, полученные альтернативными методами: при помощи анализа водных масс (Gordon et al., 1992), эйлеровых модельных потоков (Reason et al., 2003), численных лагранжевых частиц (Bryden et al., 2005), путем комбинации моделирования и гидрографических оценок (Gordon et al., 1987), а также с помощью дрейфующих буев (Richardson, 2007). В работе (Gordon, Haxby, 1990) на основе измерений спутника Geosat и STD-профилей Агульясов перенос составляет 20–30 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$). Richardson (2007) оценивает Агульясов перенос примерно в 15 Sv, но отмечает, что эта оценка получена при довольно большой неопределенности в используемом подходе. Van Sebille et al. (2009) на основе линейной регрессии данных лагранжевых поплавков и определения положения фронта Агульясова течения по альтиметрическим данным получили оценку величины Агульясова переноса в 13.2 Sv. Таким образом, в литературных источниках количественные оценки Агульясова переноса варьируются в широком диапазоне: от 4 Sv (Schmitz, 1995) до 22 Sv (Donners et al., 2004), однако в большинстве исследований сообщается о величинах 11–17 Sv.

В данной работе мы получаем оценку Агульясова переноса независимым методом. Мы определяем число долгоживущих мезомасштабных вихрей, которые, зарождаясь в системе Агульясова течения, дрейфуют на запад, тем самым транспортируя воды с характеристиками Индийского океана к берегам Южной Америки. Мы оцениваем характеристики Агульясова переноса на основе совместного анализа альтиметрических данных и измерений профиломеров ARGO. В работе также рассмотрены термохалинные характеристики вихрей и показано, что вихри Агульясова переноса, перемещаясь на запад, могут сохранять исходные термохалинные свойства в течение продолжительного времени.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

- Для анализа перемещения вихрей использовались данные массива автоматической идентификации и трекинга “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”, доступные на портале <https://www.aviso.altimetry.fr>. При создании этого массива 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).

- При анализе термохалинных свойств вихрей использовались данные дрейфующих буев-профиломеров Argo (<http://www.argo.net>). Также использовалась обновленная версия Атласа Мирового

Океана (WOA13), который представляет собой базу обобщенных климатологических данных.

• Использовался массив аномалий уровня моря SLA (Sea Level Anomalies) за период 1993–2017, доступный на сетевом ресурсе Copernicus Marine environment monitoring service (<http://marine.copernicus.eu>). Данный альтиметрический продукт является частью европейского проекта Ssalto/Duacs, распределяемый AVISO-CNES Data Center (<https://www.aviso.altimetry.fr/>). Альтиметрические измерения получены со спутников Topex/Poseidon и серии Jason (период обращения 10 дней), GFO-1 (17 дней), ERS-1, ERS-2 и Envisat (35 дней). Данные скорректированы с учетом закона обратного барометра, влияния приливов, различных эффектов атмосферы, тропосферы, ионосферы. Пространственное разрешение данных составляет 0.25° , временная дискретность – 7 сут.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе анализировались треки и характеристики вихрей на основе архива “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”. Нас интересовали вихри, сформировавшиеся в районе “Agulhas Retroreflection”, которые пересекают Южную Атлантику. На рис. 1 видно, что долгоживущие вихри, 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.

Далее мы проанализировали временную изменчивость числа вихрей Агульсова переноса, зародившихся в районе “Agulhas Retroreflection”, которые пересекли определенный меридиан в Южной Атлантике в диапазоне 35° з.д.– 10° в.д. Рис. 2 дает полную статистику числа вихрей за каждый год в зависимости от долготы. Понятно, что чем больше расстояние от места генерации, тем меньше вихрей его преодолевает. Если для 10° в.д. число вихрей Агульсова переноса в различные годы, как правило, превышает 20, то нулевой меридиан пересекают не более 4 вихрей (в зависимости от года). На рис. 2 видно, что Южно-Атлантический хребет (восточнее 20° з.д.) пересекает все еще значительное число вихрей Агульсова переноса, однако 30° з.д. достигают только два вихря (в 2007 и 2016 гг.), и лишь один зафиксирован на 34° з.д. в 2007 г. Это опровергает главные выводы, сделанные в работах (Biaostoch et al., 2008; Weijer et al., 2014) о том, что воды Индийского океана могут оказывать значительное влияние на динамические процессы в северном полушарии, распространяясь к северу через экватор в виде волн

Кельвина. На рис. 2 также можно выделить годы, когда Агульсов перенос был наиболее интенсивным: 2009–2010 гг., а также 1996, 2014 и 2015 гг. В то же время в отдельные годы (1993, 1996, 1998, 2000–2003, 2005, 2008, 2011, 2012, 2017, 2018 гг.) Агульсов перенос не распространялся далее Южно-Атлантического хребта.

Для изучения вертикальной структуры мезомасштабных вихрей использовался, так называемый, метод со-локаций (co-location) – совместного анализа мезомасштабных вихрей и профилей ARGO. Суть этого метода заключается в следующем.

Среди всех вихрей Агульсова переноса (см. рис. 1), мы выбирали те, которые удовлетворяли следующим условиям:

- Мезомасштабный вихрь образован в районе “Agulhas Retroreflection”.
- Мезомасштабный вихрь в течение всего жизненного цикла автоматически идентифицируется по базе “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”.
- Мезомасштабный вихрь является долгоживущим: продолжительность его жизни превышает 6 месяцев.
- Мезомасштабный вихрь захватывает профиль буя ARGO, а сам буй перемещается вместе с вихрем.
- Профиль ARGO расположен в ядре мезомасштабного вихря.
- Если в какой-то момент времени профиль ARGO располагался на расстоянии, превышающем радиус вихря, то такой вихрь отбраковывался.

Последние три условия означают, что среди всех вихрей Агульсова переноса при совместном анализе мы рассматриваем только те из них, которые постоянно перемещаются на запад вместе с буюм ARGO. Нам удалось найти шесть вихрей, которые удовлетворяют выбранным условиям в промежуток времени 1993–2017 гг., и в дальнейшем их характеристики анализировались для получения необходимых оценок.

Ниже в качестве примера приводятся данные об одном мезомасштабном вихре, который дрейфовал в западном направлении вместе с профилирующим буюм ARGO (№ 6901635). Продолжительность измерений этого буя ARGO фиксируется в период с 06.12.14 по 01.04.16 (482 сут), и, что важно отметить, буй № 6901635 весь период был захвачен вихрем, что позволяет проанализировать совместно термодинамические характеристики этого вихря с его геометрическими и кинематическими параметрами. На рис. 3 показано географическое положение буя на момент его захвата антициклоническим вихрем (положительные значения аномалий уровня моря).

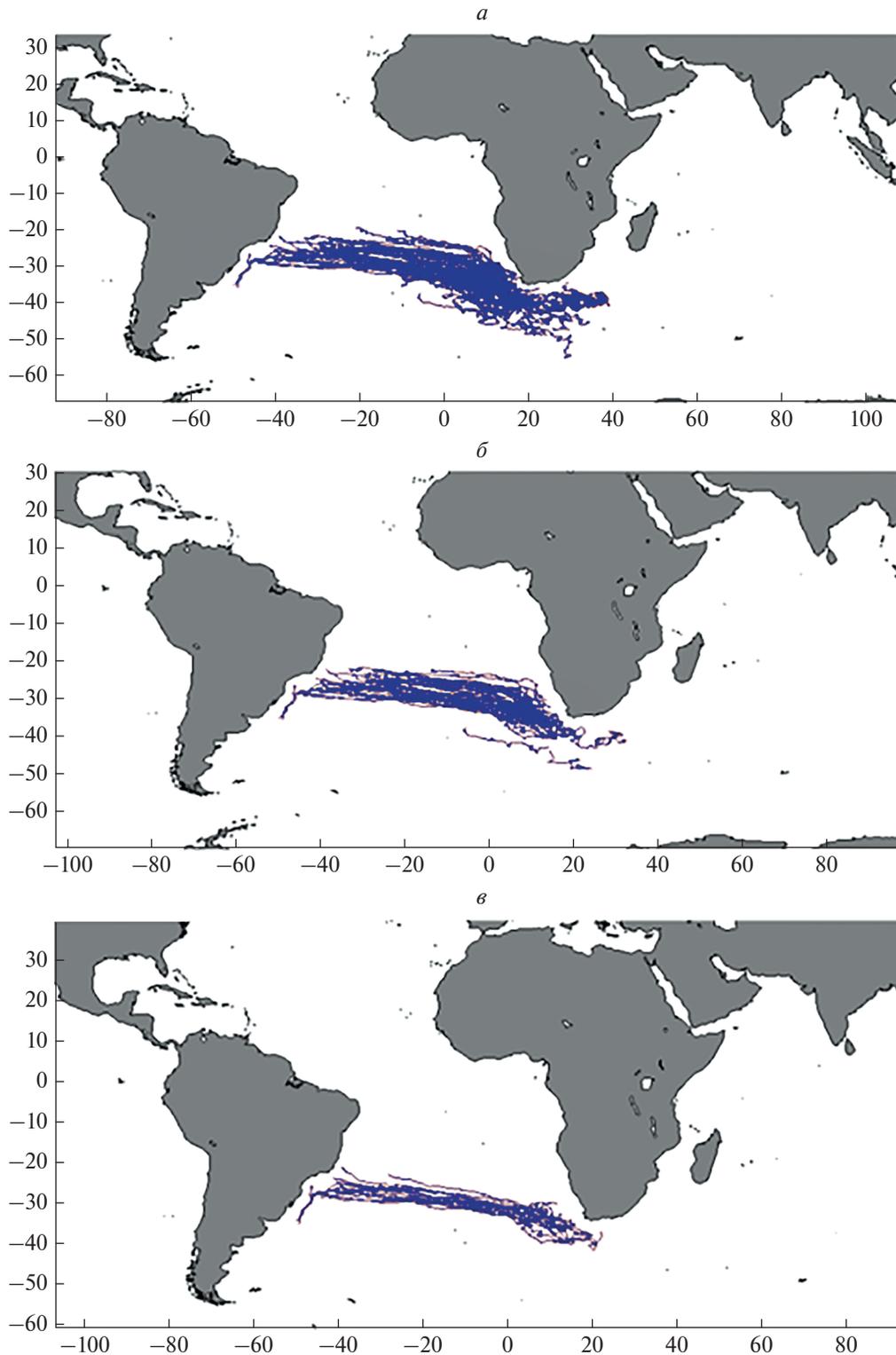


Рис. 1. Треки мезомасштабных вихрей с продолжительностью жизни не менее 1 (а), 2 (б) и 3 (в) года за период 1993–2017 гг.

В табл. 1 указаны параметры вихря, полученные из архива “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”. Отметим, что средние значения ампли-

туды и скорости перемещения вихря в среднем почти такие же, как и в начальный момент захвата вихря буем, а средняя орбитальная скорость даже

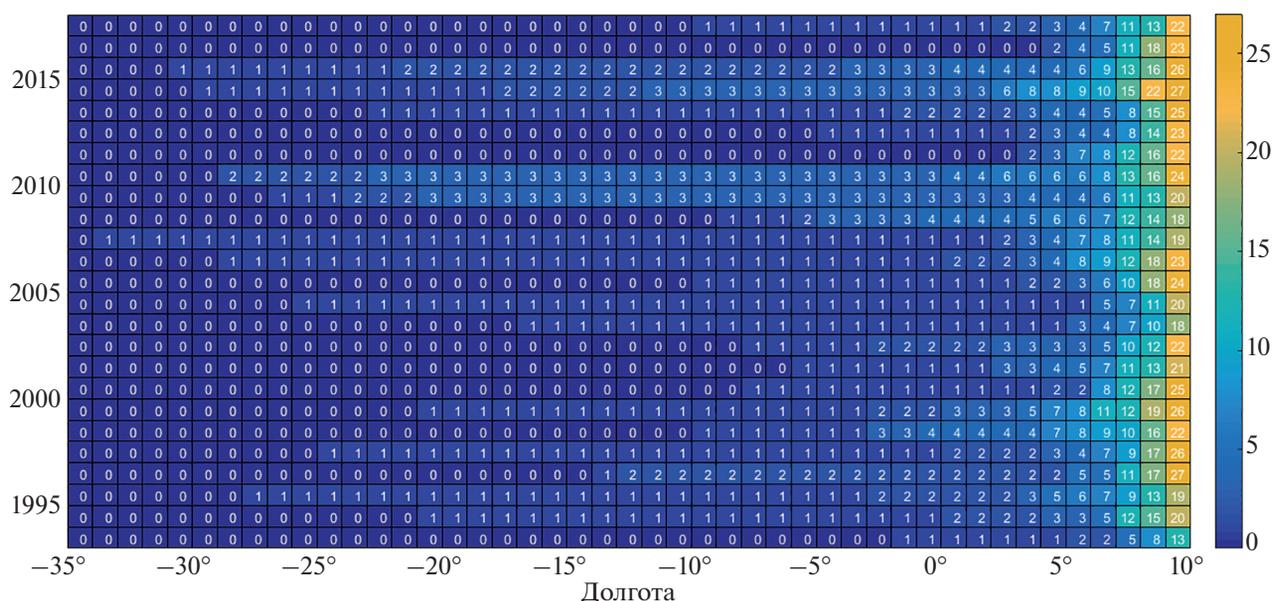


Рис. 2. Статистика вихрей Агульясова переноса в Южной Атлантике: значения показаны на шкале и числами на графике. По оси абсцисс показаны долготы, по оси ординат – время (1993–2017).

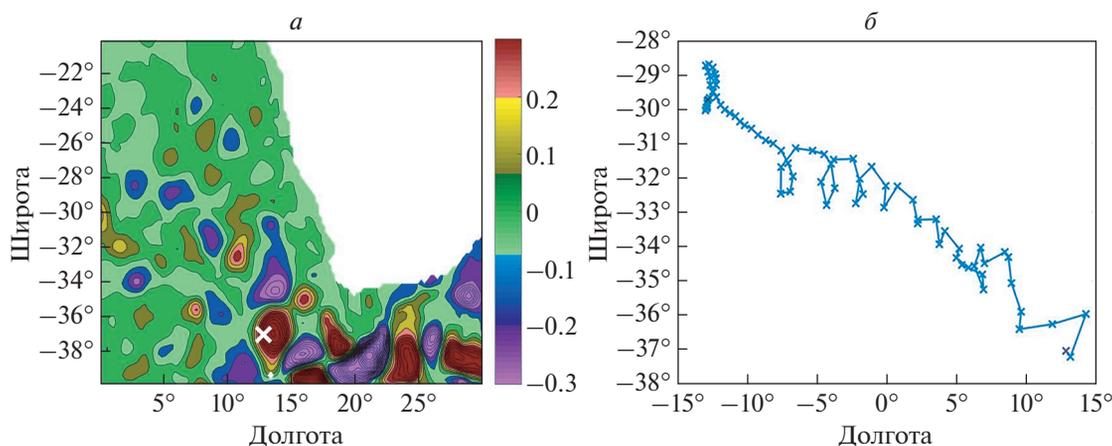


Рис. 3. Аномалии уровня моря (см) по данным спутниковой альтиметрии (а) на дату 06.12.2014. Положение буя № 6901635 показано крестиком; траектория перемещения буя вместе с мезомасштабным вихрем (б). Красным крестиком обозначено начало движения, черным – конец.

превышает первоначальные значения. Однако радиус, который был у вихря в начале рассматриваемого периода, несколько превышает средний, что, вообще говоря, не удивительно, так как вихри в процессе движения, как правило, теряют свою энергию и постепенно диссипируют.

На рис. 4 показан временной ход аномалий солености и температуры в вихре. Аномалии с использованием данных WOA13 рассчитывались на каждый момент времени относительно среднеклиматических значений в соответствующих точках траектории вихря. Видно, что изменчивость термохалинных характеристик с момента захвата и

до конца нахождения буя в вихре нестационарна, значения аномалий постепенно уменьшаются, однако важно отметить, что в течение указанного промежутка времени мезомасштабный вихрь идентифицируется как по базе “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”, так и по аномалиям термохалинных характеристик. На рис. 4 также видно, что глубина вихря составляет около 1000 м, максимум значений аномалий расположен на глубине 500–700 м, аномалии солености и температуры на этих глубинах выше среднеклиматических значений на 0.6 и 5°C соответственно. Ядро вихря, которое располагается на глубине 300–700 м хоро-

Таблица 1. Параметры мезомасштабного вихря Агульсова переноса по базе “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”

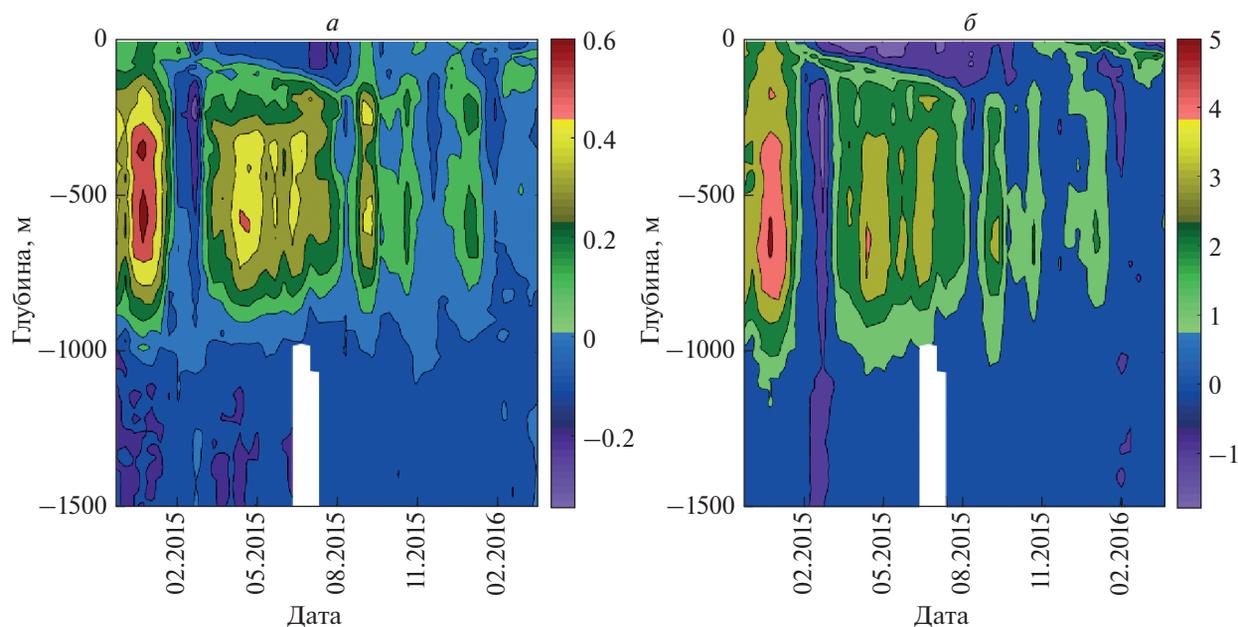
Характеристика	Средние значения за весь период существования	Значения на момент попадания буя в вихрь
Время нахождения буя в вихре, сут	482	482
Орбитальная скорость, см/с	45	39
Амплитуда, см	15	14
Радиус, км	98	112
Скорость перемещения, см/с	8.5	8.5

шо прослеживается в аномалиях в течение первых двух месяцев захвата вихрем буя. Важно отметить, что мезомасштабный вихрь сохраняет свои характеристики в течение длительного времени — около 8 мес., затем его интенсивность уменьшается, и вихрь постепенно диссипирует. T/S -диаграмма вихря (рис. 5) подтверждает, что все профили буя имеют однородную структуру. Это свидетельствует о том, что вихрем, захватившим буй, переносилась одна и та же водная масса, а перемешивание с окружающими водами было незначительным.

Рис. 4 характеризует вихрь в аномалиях, положительные значения которых подтверждают, что термохалинные характеристики вихря иные, чем характеристики окружающих вод. Подтвердим данный факт при помощи T/S -анализа. На рис. 6 показано сравнение T/S -характеристик вихря

Агульсова переноса со средними T/S -характеристиками окружающих вод. Видно, что в вихре температура на 5°C и соленость на $0.8\text{--}1.0$ выше средних фоновых значений вод. Это означает, что рассматриваемый вихрь действительно переносит более теплые и соленые воды в Южную Атлантику и сохраняет отличные от окружающей среды свойства на протяжении длительного времени.

Приведенный выше анализ был проведен для шести выделенных вихрей Агульсова переноса, удовлетворяющих критериям совместного анализа. Для них получены значения средних характеристик, необходимых для расчета вихревого транспорта тепла и соли. Учитывая средние параметры выделенных вихрей (в расчетах радиус вихря 50 км, глубина — 1 км, скорость перемещения — 8.5 м/с) и следуя подходу, предложенному в работе

**Рис. 4.** Временная изменчивость аномалий солёности (а) и температуры ($^{\circ}\text{C}$) (б) в вихре по данным буя № 6901635.

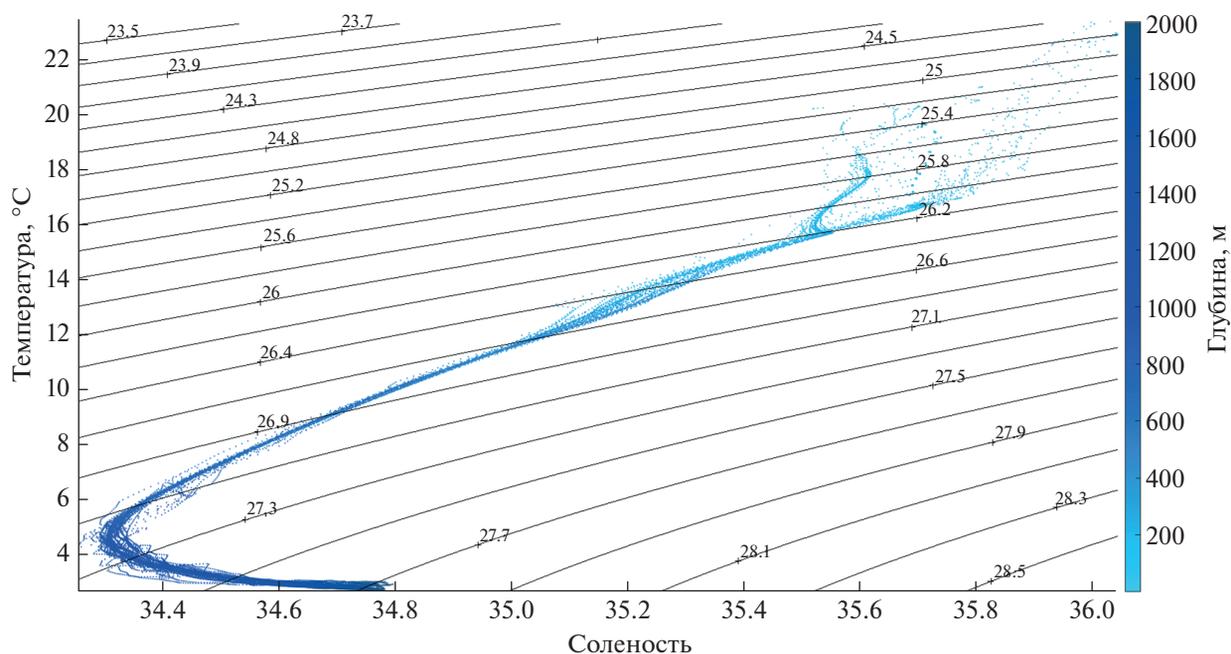


Рис. 5. T/S -диаграмма профилей буя № 6901635 за период 06.12.14–01.04.16. Цветом отмечена глубина точки на профиле с соответствующими характеристиками.

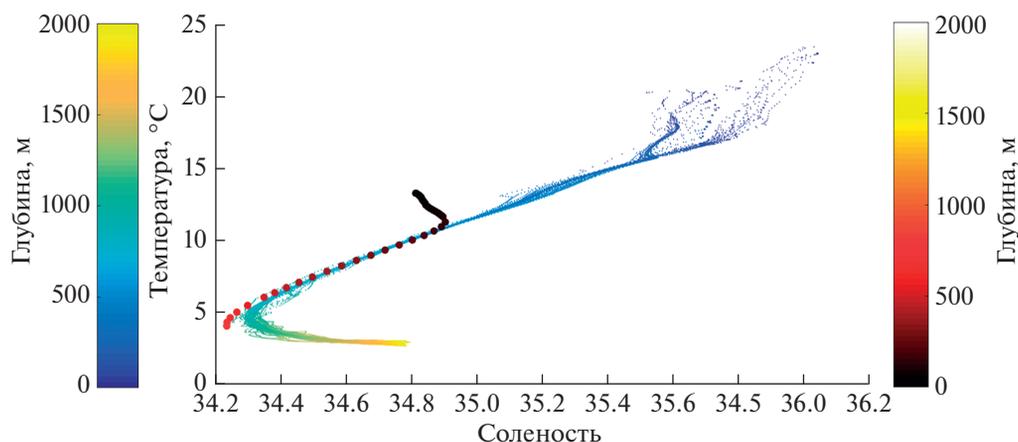


Рис. 6. Сравнение T/S -кривых вихря – профили буя № 6901635 (синий цвет) и окружающих вод (красный цвет). Цветом отмечена глубина точки на профиле с соответствующими характеристиками.

Chaigneau et al. (2011), оценка переноса (расход) составляет 8.5 Sv.

Далее мы оценили теплосодержание (AT) и содержание соли (AS) в объеме вихря V (Chaigneau et al., 2011):

$$AT = \int \rho C_p T' dV,$$

$$AS = \int \rho S' dV,$$

а также транспорт тепла (HT) и соли (ST) мезомасштабным вихрем:

$$HT = \int \rho C_p T' v dS,$$

$$ST = \int \rho S' v dS,$$

где $\rho = 1.025 \text{ кг м}^{-3}$, $C_p = 4200 \text{ Дж кг}^{-1} (\text{°C})^{-1}$, T' – средняя аномалия температуры по глубине, S' – средняя аномалия солёности по глубине (Yari et al., 2012). Полученные оценки представлены в табл. 2. Отметим, что эти оценки являются средними и характеризуют вихревой перенос одним вихрем.

Далее, используя совместно данные табл. 2 и статистику вихрей, представленную на рис. 2, мы

Таблица 2. Оценки теплосодержания и содержания соли в объеме мезомасштабного вихря и соответствующий транспорт тепла и соли Агульясова переноса одним вихрем

Характеристики вихря	Значения
Теплосодержание, AT , Дж	2.03×10^{15}
Содержание соли, AS , кг	4.83×10^{11}
Транспорт тепла, HT , Вт	2.25×10^9
Транспорт соли, ST , кг c^{-1}	5.36×10^5

можем оценить соответствующие оценки Агульясова переноса для каждой долготы Южной Атлантики, умножив эти оценки на число вихрей. В частности, для 34° з.д. оценки Агульясова переноса будут такими же, какие представлены в табл. 2, а для 30° з.д. они будут в 2 раза больше и т.д. Еще раз подчеркнем, что речь идет о средних оценках Агульясова переноса тепла и соли мезомасштабными вихрями.

ВЫВОДЫ

- На основе архива “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product” получена полная статистика числа вихрей Агульясова переноса в Южной Атлантике в зависимости от года и расстояния от места генерации. Показано, что в 2009–2010 гг., а также в 1995, 2014 и 2015 гг. Агульясов перенос был наиболее интенсивным. В то же время в отдельные годы Агульясов перенос не распространялся за Южно-Атлантический хребет.

- Показано, что 30° з.д. достигают только два вихря (в 2007 и 2016 гг.), и лишь один зафиксирован на 33° з.д. в 2007 г. Это опровергает выводы, сделанные в работах (Biastoch et al., 2008, Weijs et al., 2014) о том, что воды Индийского океана могут оказывать значительное влияние на динамические процессы в северном полушарии.

- На основе совместного анализа данных буев ARGO и архива “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product” выделено шесть мезомасштабных долгоживущих вихрей Агульясова переноса, которые перемещались вместе с буями ARGO. Для этих вихрей получены средние характеристики.

- Детально проанализирована вертикальная структура вихря Агульясова переноса. Показано, что температура и соленость в водах вихря выше средних значений в Южной Атлантике на $5^\circ C$ и на 0.8–1 соответственно. Установлено, что вихрь, перемещаясь на значительные расстояния в западном направлении, сохраняет свои уникальные термохалинные характеристики в течении длительного времени.

- Показано, что оценка Агульясова переноса (расход) одним мезомасштабным вихрем в сред-

нем составляет $8.5 Sv$. Полученная оценка несколько ниже, чем указывается в литературных источниках, однако, подчеркнем: данная оценка относится к одному вихрю. Статистика числа вихрей (рис. 2), позволяет оценить полный перенос для каждого года в зависимости от расстояния.

- Транспорт тепла и соли одним мезомасштабным вихрем Агульясова переноса составляет 2.25×10^9 Вт и 5.36×10^5 кг c^{-1} соответственно. Теплосодержание и солесодержание в одном вихре Агульясова переноса – 2.03×10^{15} Дж и 4.83×10^{11} кг соответственно.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00066.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Волны или вихри? // Вестник СПбГУ. 1998. Сер. 7. Вып. 3 (№ 21). С. 37–44.
- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 215 с.
- Белоненко Т.В., Кубряков А.А. Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в Северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 9–18.
- Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В. Спектральные характеристики волн Россби Северо-западной части Тихого океана // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43–52.
- Гневышев В.Г., Фролова А.В., Кубряков А.А., Собко Ю.В., Белоненко Т.В. Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для Антарктического циркумполярного течения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 39–50.
- Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане в 2-х томах. М.: Мир, 1981. 846 с.
- Мальшева 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.
- Незлин М.В. Солитоны Россби // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. № 1. С. 3–60.
- Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. В 2-х т. М.: Мир, 1984. Т. 1. 398 с. Т. 2. 416 с.
- Сандалюк Н.В., Белоненко Т.В. Мезомасштабная вихревая динамика в районе течения Агульяс по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 179–190.
- Beismann J.-O., Kase R.H., Lutjeharms J.R.E. On the influence of submarine ridges on translation and stability of Agulhas rings // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № C4.

- P. 7897–7906.
<https://doi.org/10.1029/1998JC900127>
- Biastoch A., Boning C.W., Lutjeharms J.R.E.* Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2008. V. 456. P. 489–492.
<https://doi.org/10.1038/nature07426>
- Bryden H.L., Beal L.M., Duncan L.M.* Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability // *J. Oceanography*. 2005. V. 61. P. 479–492.
<https://doi.org/10.1007/s10872-005-0057-8>
- Byrne D.A., Gordon A.L., Haxby W.F.* Agulhas Eddies: A Synoptic View Using Geosat ERM Data // *J. Physical Oceanography*. 1995. V. 25. P. 902–917.
- Chaigneau A., Le Texier M., Eldin G., Grados C., Pizarro O.* Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats // *J. Geophys. Res.* 2011. C11025.
<https://doi.org/10.1029/2011JC007134>
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* 2011. V. 91. P. 167–216.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A.* Global observations of large oceanic eddies // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L15606.
<https://doi.org/10.1029/2007GL030812>
- Doglioli A.M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G.* Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C05043.
<https://doi.org/10.1029/2006JC003952>
- Donners J., Drijfhout S.S., Coward A.C.* Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. № 16. L16312.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020644>
- Garzoli S.L., Goni G.J.* Combining altimeter observations and oceanographic data for ocean circulation and climate studies // *Elsevier Oceanographic Series*. 2000. V. 63. P. 79–95.
[https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(00\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(00)80006-9)
- Giulivi C.F., Gordon A.L.* Isopycnal displacements within the Cape Basin thermocline as revealed by the hydrographic data archive // *Deep Sea Res.* 2006. Part I. V. 53. P. 1285–1300.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.05.011>
- Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A., Sobko Yu.V., Belonenko T.V.* Interaction of Rossby waves with a jet stream: basic equations and their verification for the Antarctic circumpolar current. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. P. 412–422.
- Gordon A.L., Haxby W.F.* Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1990. V. 5. № C3. P. 3117–3125.
<https://doi.org/10.1029/JC095iC03p03117>
- 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.
[https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90006-9)
- Gordon A.L., Weiss R.F., Smethie W.M., Warner M.J.* Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *J. Geophysical Research*. 1992. V. 97. № C5. P. 7223–7240. 1.
<https://doi.org/10.1029/92JC00485>
- Lutjeharms J.R.E., van Ballegooyen R.C.* The retroflection of the Agulhas Current // *J. Physical Oceanography*. 1988. 18. P. 1570–1583.
- Lutjeharms J.R.E., Valentine, H.R.* Evidence for persistent Agulhas rings southwest of Cape Town // *S. Afr. J. Sci.* 1988. 84. P. 781–783.
- Marcos M., Pascual A., Pujol I.* Improved satellite altimeter mapped sea level anomalies in the Mediterranean Sea: A comparison with tide gauges. *Advances in Space Research*. 2015. 56(4). P. 596–604.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.027>
- Munk W.* Achievements in Physical Oceanography. 50 Years of Ocean Discovery, 50 Years of Ocean Discovery, Washington, DC, National Academic. 2000. Press: 44–50, 90.
- Reason C.J.C., Lutjeharms J.R.E., Hermes J., Biastoch A., Roman R.E.* Inter-ocean fluxes south of Africa in an eddy-permitting model // *Deep Sea Res.* 2003. Part II. V. 50. P. 281–298.
- Richardson P.L.* Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters // *Deep-Sea Res.* Part I. 2007. V. 54. № 8. P. 1361–1389.
- Schmitz W.J.* On the interbasin-scale thermohaline circulation // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. 2. P. 151–173.
<https://doi.org/10.1029/95RG00879>
- 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 southeastern Atlantic Ocean // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. № C9. P. 21913–21925.
<https://doi.org/10.1029/1999JC000046>
- van Sebille E., van Leeuwen P.J.* Fast Northward Energy Transfer in the Atlantic due to Agulhas Rings // *J. Physical Oceanography*. 2007. V. 37. P. 2305–2315.
<https://doi.org/10.1175/JPO3108.1>
- van Sebille, van Leeuwen E.P.J., Biastoch A., Barron C.N., de Ruijter W.P.M.* Lagrangian validation of numerical drifter trajectories using drifting buoys: Application to the Agulhas system // *Ocean Modell.* 2009. V. 29. № 4. P. 269–276.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.05.005>
- Weijer W.E.V.* Sebille Impact of Agulhas Leakage on the Atlantic Overturning Circulation in the CCSM4 // *J. Climate*. 2014. V. 27. P. 101–110.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00714.1>
- Williams S., Petersen M., Bremer P.-T., Hecht M., Pascucci V., Ahrens J., Hlawitschka M., Hamann B.* Adaptive extraction and quantification of geophysical vortices // *IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics*. 2011. V. 17. № 12. P. 2088–2095.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.162>
- Yari S., Kovačević V., Cardin V., Gačić M., Bryden H. L.* Direct estimate of water, heat, and salt transport through the Strait of Otranto // *J. geophysical research*. 2012. V. 117. C09009.
<https://doi.org/10.1029/2012JC007936>

Agulhas Leakage Estimation Using Altimetry and Argo Data

A. A. Malysheva¹, A. A. Kubryakov², A. V. Koldunov¹, and T. V. Belonenko¹

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

Agulhas leakage is a main source of warm and salty water of the Indian Ocean carried by mesoscale eddies from the southern Africa to the shores of South America. We assess a volume of waters transported by the Agulhas leakage using combination of altimetry and Argo observations. We explore a vertical structure of the Agulhas leakage eddies involved in the Agulhas leakage using Argo profiles. We demonstrate that the Agulhas leakage eddies keep the thermohaline characteristics while their moving to the west. We show that the temperature and salinity inside the individual eddy are higher at 5°C and 0.8–1 psu, respectively, than the average values in the South Atlantic. We prove that the Agulhas leakage eddies moving thousands kilometers to the west keep their thermal characteristics, and the waters inside the Agulhas leakage eddies mix a little with the surrounding waters. It is shown that the mean Agulhas leakage transport by one mesoscale eddy is 8.5 Sv. The heat and salt transports by the individual Agulhas leakage eddy are 2.25×10^9 W и 5.36×10^5 kg s⁻¹ respectively. Heat and salt anomalies inside it are 2.03×10^{15} J and 4.83×10^{11} kg respectively.

Keywords: sea level, altimetry, mesoscale eddies, Rossby waves, Indian, Atlantic, SLA, sea level anomalies, Argo

REFERENCES

- Belonenko T.V., Kubryakov A.A.* Vremennaya izmenchivost' fazovoi skorosti voln Rossbi v Severnoi chasti Tikhogo okeana [Temporal variability of the phase velocity of Rossby waves in the North Pacific] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. V. 11. № 3. P. 9–18 (In Russian).
- Belonenko T.V., Zaharchuk E.A., Fuks V.R.* Gradientno-vikhrevoi volny v okeane [Gradient-vorticity waves in the Ocean] // Saint Petersburg, Edit. SPbSU, 2004, 215 p. (In Russian).
- Belonenko T.V., Zaharchuk E.A., Foux V.R.* Volny ili vihri? [Waves or eddies?] // *Vestnik SPbGU*. 1998. V. 3. № 21. P. 37–44 (In Russian).
- Belonenko T.V., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Spectral'nye harakteristiki voln Rossbi Severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana [Spectral characteristics of Rossby waves in the Northwest Pacific] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 1–2. P. 43–52 (In Russian).
- Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A., Sobko Yu.V., Belonenko T.V.* Interaction of Rossby waves with a jet stream: basic equations and their verification for the Antarctic circumpolar current // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. 55(5), 412–422. doi: 10.1134/S0001433819050074
- Le Blon P., Maiseck L.* Volny v okeane [Waves in the Ocean] // M.: Mir. 1981. V. 1–2. 846 p. (In Russian).
- Malysheva A.A., Koldunov A.V., Belonenko T.V., Sandalyuk N.V.* Vihri Agul'yasova perenosy po dannym sputnikovoy al'timetrii (Eddies of the Agulhas leakage based on altimetry data) // *Uchenye zapiski RGGMU*. 2018. №. 52. P. 154–170 (In Russian).
- Nezlin M.V.* Solytony Rossby [Rossby solitons] // *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1986. V. 150. № 1. P. 3–60. (In Russian).
- Pedlosky J.* Geofizicheskaya gidrodinamika. [Geophysical Fluid Dynamics] // M.: Mir, 1984. V. 1. 398 c. V. 2. 416 c. (In Russian).
- Sandalyuk N.V., Belonenko T.V.* Mezomasshtabnaya vihrevaya dinamika v rajone techeniya Agul'yas po dannym sputnikovoy al'timetrii. [Mesoscale eddy dynamics in the Agulhas region based on altimetry data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 5. P. 179–190 (In Russian).
- Beismann J.-O., Kase R.H., Lutjeharms J.R.E.* On the influence of submarine ridges on translation and stability of Agulhas rings // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № C4. P. 7897–7906. doi: 10.1029/1998JC900127
- Biastoch A., Boning C.W., Lutjeharms J.R.E.* Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2008. V. 456. P. 489–492. doi: 10.1038/nature07426
- Bryden H.L., Beal L.M., Duncan L.M.* Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability // *Journal of Oceanography*. 2005. V. 61. P. 479–492. doi: 10.1007/s10872-005-0057-8.
- Byrne D.A., Gordon A.L., Haxby W.F.* Agulhas Eddies: A Synoptic View Using Geosat ERM Data // *J. Physical Oceanography*. 1995. V. 25. P. 902–917.
- Chaigneau A., Le Texier M., Eldin G., Grados C., Pizarro O.* Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats // *J. Geophys. Res.* 2011. C11025. doi: 10.1029/2011JC007134
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* 2011. V. 91. P. 167–216. doi: 10.1016/j.pocan.2011.01.002
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A.* Global observations of large oceanic eddies // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V.34. L15606. doi: 10.1029/2007GL030812
- Doglioli A.M., Blanke B., Speich S., Lapeyre G.* Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C05043. doi: 10.1029/2006JC003952
- Donners J., Drijfhout S.S., Coward A.C.* Impact of cooling on the water mass exchange of Agulhas rings in a high resolution ocean model // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. № 16. L16312. doi: 10.1029/2004GL020644
- Garzoli S.L., Goni G.J.* Combining altimeter observations and oceanographic data for ocean circulation and climate

- studies // Elsevier Oceanographic Series. 2000. V. 63. P. 79–95. doi: 10.1016/S0422–9894(00)80006–9
- Giulivi C.F., Gordon A.L.* Isopycnal displacements within the Cape Basin thermocline as revealed by the hydrographic data archive // *Deep Sea Res.* 2006. Part I. V. 53. P. 1285–1300. doi: 10.1016/j.dsr.2006.05.011
- Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A., Sobko Yu.V., Belonenko T.V.* Interaction of Rossby waves with a jet stream: basic equations and their verification for the Antarctic circumpolar current // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 412–422. doi: 10.1134/S0001433819050074
- Gordon A.L., Haxby W.F.* Agulhas eddies invade the south Atlantic: Evidence From Geosat altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey // *J. Geophysical Research: Oceans.* 1990. V. 5. № C3. P. 3117–3125. doi: 10.1029/JC095iC03p03117
- 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. doi: 10.1016/0198–0149(87)90006–9
- Gordon A.L., Weiss R.F., Smethie W.M., Warner M.J.* Thermocline and intermediate water communication between the South Atlantic and Indian Ocean // *J. Geophysical Research.* 1992. V. 97. № C5. P. 7223–7240. 1. doi: 10.1029/92JC00485.
- Lutjeharms J.R.E., van Ballegooyen R.C.* The retroflection of the Agulhas Current // *J. Physical Oceanography.* 1988. 18. P. 1570–1583.
- Lutjeharms J.R.E., Valentine H.R.* Evidence for persistent Agulhas rings southwest of Cape Town // *S. Afr. J. Sci.* 1988. 84. P. 781–783.
- Marcos M., Pascual A., Pujol I.* Improved satellite altimeter mapped sea level anomalies in the Mediterranean Sea: A comparison with tide gauges. *Advances in Space Research.* 2015. 56(4). P. 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.027>
- Munk W.* Achievements in Physical Oceanography. 50 Years of Ocean Discovery, 50 Years of Ocean Discovery, Washington, DC, National Academic. 2000. Press: 44–50, 90.
- Reason C.J.C., Lutjeharms J.R.E., Hermes J., Biastoch A., Roman R.E.* Inter-ocean fluxes south of Africa in an eddy-permitting model // *Deep Sea Res.* 2003. Part II. V. 50. P. 281–298.
- Richardson P.L.* Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters // *Deep-Sea Res.* Part I. 2007. V. 54. № 8. P. 1361–1389.
- Schmitz W.J.* On the interbasin-scale thermohaline circulation // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. 2. P. 151–173. <https://doi.org/10.1029/95RG00879>
- 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 southeastern Atlantic Ocean // *J. Geophysical Research.* 2000. V. 105. №. C9. P. 21913–21925. <https://doi.org/10.1029/1999JC000046>
- van Sebille E., van Leeuwen P.J.* Fast Northward Energy Transfer in the Atlantic due to Agulhas Rings // *J. Physical Oceanography.* 2007. V. 37. P. 2305–2315. doi: 10.1175/JPO3108.1.
- 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. V. 29. № 4. P. 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.05.005>
- Weijer W.E.V.* Sebille Impact of Agulhas Leakage on the Atlantic Overturning Circulation in the CCSM4 // *J. Climate.* 2014. V. 27. P. 101–110. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00714.1>
- Williams S., Petersen M., Bremer P.-T., Hecht M., Pascucci V., Ahrens J., Hlawitschka M., Hamann B.* Adaptive extraction and quantification of geophysical vortices // *IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics.* 2011. V. 17. № 12. P. 2088–2095. doi: 10.1109/TVCG.2011.162
- Yari S., Kovačević V., Cardin V., Gačić M., Bryden H.L.* Direct estimate of water, heat, and salt transport through the Strait of Otranto // *J. geophysical research.* 2012. V. 117. C09009. doi: 10.1029/2012JC007936