

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*На правах рукописи*

Мальшева Алина Анатольевна

**ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА ЮЖНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО  
ОКЕАНА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ, НАТУРНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ  
ДАННЫХ**

Научная специальность 1.6.17 – Океанология

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Научный руководитель:

доктор географических наук

Белоненко Татьяна Васильевна

Санкт-Петербург

2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА</b> .....	20
1.1. Течение Агульяс .....	20
1.2. Южная часть Атлантического океана .....	22
<b>ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ</b> .....	23
2.1. Используемые данные .....	23
2.1.1. Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» .....	23
2.1.2. Данные буев-профилемеров Argo .....	24
2.1.3. GLORYS12V1 .....	24
2.1.4. ETOPO1 .....	25
2.1.5. WOA13 .....	25
2.1.6. TEOS-10 .....	25
2.1.7. Алгоритм AMEDA .....	26
2.2. Методы анализа .....	26
2.2.1. Метод со-локации .....	26
2.2.2. Расчет вихревого транспорта .....	27
2.2.3. Расчет потенциальной завихренности .....	28
Расчет потенциальной завихренности PV вихрей по формуле Эртеля .....	28
Расчет потенциальной завихренности $\sigma$ вихрей по формуле Россби .....	29
2.2.4. Лагранжев подход .....	30
<b>ГЛАВА 3. АГУЛЬЯСОВ ПЕРЕНОС</b> .....	32
3.1. Термин Агульясов перенос .....	32
3.2. Временная изменчивость числа вихрей Агульясова переноса .....	33
3.3. Метод со-локации .....	36
3.4. Лагранжев анализ Агульясова переноса в зоне смешения трех типов вод .....	40
3.4.1. Статистический анализ вихрей .....	42
3.4.2. Лагранжев анализ частиц воды .....	54
<b>ГЛАВА 4. МЕРИДИОНАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ ВИХРЕЙ АГУЛЬЯСА</b> .....	66
4.1. Анализ треков вихрей Агульяса .....	68
4.2. Анализ основных теоретических подходов к меридиональному смещению вихрей .....	76
4.3. Анализ трансформации волн Россби на незональном течении .....	82
<b>ГЛАВА 5. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕЙ КАПСКОЙ КОТЛОВИНЫ</b> .....	84
5. 1. Динамические характеристики вихрей .....	84

Относительная завихренность.....	88
Потенциальная завихренность вихрей по формуле Эртеля и Россби.....	89
5.2. Термохалинные характеристики вихрей.....	91
5.3. Кинематические характеристики вихрей.....	93
5.3.1. Взаимодействие вихрей с баротропным потоком .....	93
5.3.2. Поведение вихрей Капской котловины при вытягивании .....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	109

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Вихри океана известны продолжительное время, однако благодаря развитию измерительных технологий прямое и косвенное изучение вихревых образований началось только в 20 веке. Огромный интерес вызывают вихревые образования с горизонтальными размерами от десятков до сотен километров. Данный тип вихрей называют синоптическими. В зарубежных литературных источниках такие вихри называют мезомасштабными (Жмур, 2011).

«Синоптические вихри открытого океана, открытые в советских экспериментах «Полигон-67» (картированием путем расчета течений динамическим методом по данным двухмесячных гидрологических измерений в Аравийском море) и «Полигон-70» (прямым измерением течений в течение 6 месяцев на сети в 17 буйковых станций в северных тропиках Атлантики) и изучавшиеся в экспериментах МОДЕ (1973), ПОЛИМОДЕ (1977-78) и МЕГАПОЛИГОН (1986), представляют собой вихревые течения с типичными горизонтальными размерами (расстояние от центра до зоны максимальных скоростей) порядка 100 км, орбитальными скоростями 20 — 80 см/с и скоростями перемещения их центров 1 — 10 см/с. Иногда они могут быть обнаружены на поверхности океана по температурному фронту на их периферии: в интенсивных вихрях перепад температур во фронтальной зоне составляет 0,5 — 2,0°C при ее ширине 2 — 30 км» (Каменкович и др., 1982).

В монографии Монин и Красицкий (1985) было дано очень точное и подробное описание того, что стоит понимать под понятием *синоптические вихри*: «...бароклинные квазигеострофические вихри или волны Россби в океане с горизонтальными масштабами порядка радиуса деформации Россби, образующиеся, по-видимому, главным образом вследствие бароклиновой неустойчивости крупномасштабных течений и создающие максимум спектра кинетической энергии, в полной аналогии с атмосферой...».

К.Н. Федоров в своей статье 1986 г. также описывал отдельный вид вихрей — внутритермоклинные вихри: «Внутритермоклинный вихрь — это вращающийся в антициклоническом или циклоническом направлении ограниченный объем воды толщиной в несколько сотен метров и диаметром в несколько десятков километров,

максимум азимутальной скорости которого расположен в термоклине (пикноклине) на уровне ядра, содержащего локальную аномалию потенциального вихря. Орбитальные (азимутальные) скорости и аномальные динамические и гидрофизические характеристики убывают от ядра вихря во все стороны, тогда как они могут сохраняться во времени практически неизменными при горизонтальном перемещении вихря с ядром на большие расстояния, превышающие многие тысячи километров...», «...Следует заметить, однако, что название «внутритермоклинные» является в достаточной мере условным. В высоких широтах, где плотность воды определяется в основном соленостью, а температура может играть роль пассивного трассера, лучше говорить о внутривихревых вихрях или линзах» (Федоров, 1986).

Согласно А.С. Монину, к синоптическим явлениям следует относить такие, у которых горизонтальный масштаб сравним или несколько больше, чем радиус деформации. «Полученные результаты дают основание утверждать, что, хотя квазиоднородные антициклонические внутритермоклинные линзы имеют протяженность обычно меньше, чем типичный для данного района океана внутренний радиус деформации, они не могут быть меньше, чем локальный (т.е. рассчитанный по характеристикам самой линзы) радиус деформации. Поэтому их следует считать разновидностью синоптических явлений».

Таким образом, на фоне крупномасштабных течений в океане развиваются интенсивные движения синоптического масштаба — вихри, перемещающиеся вместе с содержащейся в них водой, а также более крупные - волны Россби. Эти синоптические процессы во многом аналогичны атмосферным, хотя есть и значительные количественные различия, начиная с того, что крупномасштабные течения в океане имеют другое происхождение. Так, если в атмосфере пассатные циркуляции и западно-восточный перенос умеренных широт создаются нагревом снизу (убывающим от экватора к полюсам), то в океане их главной причиной является ветровое напряжение на океанской поверхности в сочетании с влиянием берегов (отсутствующим в атмосфере) и вращением Земли (точнее — изменением параметра Кориолиса с широтой вследствие ее сферичности).

Аналогами волн Россби на атмосферных струйных течениях в океане являются меандры на струйных течениях и образующиеся при их потере

устойчивости и отсечения образования в виде фронтальных синоптических вихрей — рингов. И хотя ринги и являются вихрями, но их движениям свойственно систематическое смещение на запад, характерное для волн Россби.

Известно о более 4 млн исследований и наблюдений, в которых показано, что наибольшее количество вихрей (плотность вихрей максимальна) наблюдается в районах западных пограничных течений (Жмур, 2011). Прежде считалось, что наиболее мощными источниками энергии для синоптических возмущений являются Гольфстрим и Куроисио, на данный момент список областей океана с наибольшей интенсивностью вихревой энергии следующий (по убыванию): область разворота течения Агульяс, Куроисио, Гольфстрим, район слияния Бразильского и Фольклендского течений, Антарктическое Циркумполярное течение, Восточно-Австралийское течение (Кошляков и Белокопытов, 2020).

Также известно, что причиной генерации вихрей является бароклинная неустойчивость крупномасштабных течений (Жмур, 2011). Вот что писали Беляков и Волков (1985): «...Основной причиной появления вихрей в Мировом океане, наиболее вероятно, является баротропная и бароклинная неустойчивость...». А также: «...Оценка вкладов энергии неустойчивости баротропных и бароклинных процессов показала, что баротропная энергия возмущений значительно меньше бароклинной и не может и не может иметь большого значения для генерации вихрей в океане...». Каменкович с соавторами в своей работе (1982) отмечали: «Основной вывод состоит в том, что реальные океанские течения, создаваемые внешними силами, при весьма широких условиях должны, по-видимому, оказываться неустойчивыми. Причем, поскольку характерные пространственные масштабы нарастающих возмущений имеют тот же порядок, что и соответствующие масштабы для реально наблюдаемых синоптических вихрей в океане, то кажется весьма правдоподобным, что бароклинная неустойчивость является одним из важнейших процессов, генерирующих синоптическую изменчивость океана. В пользу этого говорят и результаты обработки наблюдений экспедиций «Полигон-70» и ПОЛИМОДЕ». Эти же авторы считают, что наибольший вклад в образование синоптических вихрей вносит именно бароклинная неустойчивость: «Основным признанным механизмом циклогенеза остается тем не менее бароклинная неустойчивость, независимо от того, насколько быстро развивается возникшее возмущение» (Шакина, 1990).

«...Следует полагать, что вихри генерируются бароклинной неустойчивостью, о чем свидетельствует хорошее согласие наблюдаемых и вычисленных значений  $L$ . Вихри с меньшими масштабами существовать не должны, вихри большего масштаба должны определяться размерами вынуждающей силы. Характерно, что арктические подповерхностные вихри имеют ядро с водной массой другого района. Представляется, что арктические вихри образуются подобно фронтальным, однако это происходит в подповерхностном слое океана» (Беляков и Волков, 1985).

Всплеск интереса к вихревой тематике был вызван открытием примерно полвека назад так называемых когерентных структур. Многочисленные их природные проявления в «чистом» виде (циклоны и антициклоны в атмосфере, ринги Гольфстрима и синоптические вихри открытого океана, грибовидные и триполярные структуры, внутритермоклинные линзы, топографические вихри), а также в виде обусловленных ими эффектов (бимодальная структура зональных течений, глубоководная конвекция в океане) послужили питательной средой для создания соответствующих математических моделей на основе теории вихрей. Как результат, в настоящее время наблюдается существенный прогресс в понимании механизмов и сути физических явлений, обусловленных взаимодействием вихревых структур (Борисов, Мамаев (ред.), 2003).

Рассмотрим синоптические возмущения подробнее. Как уже было сказано выше, струйные течения меандрируют, вследствие чего возникают меандры. Меандры способны отделяться от течения, в результате чего образуются ринги (Монин и Красицкий, 1985). Изначально (например, Stommel, (1965)) наиболее подробно были изучены меандры Гольфстрима. Далее внимание привлекли меандры Куроисио и других струйных течений (Монин и Красицкий, 1985). Ринги и меандры – это синоптические возмущения фронтального происхождения (западных пограничных течений), а ринги являются уединенными вихрями (Монин и Красицкий, 1985). Однако, известно, что данный тип возмущений возникает и в открытом океане вдали от каких-либо струйных течений (Жмур, 2011). Синоптические вихри открытого океана широко распространены, а также содержат большую часть кинетической энергии океанических течений (Монин и Красицкий, 1985). Открытие данного факта является крупнейшим в гидродинамике океана за послевоенные годы. Этот тип вихрей рассматривали, например, Richardson (1989),

Olson, Evans (1986) и многие другие. Горизонтальные размеры вихрей открытого океана в более ранних исследованиях имели довольно широкий разброс значений, в среднем были равны локальному бароклинному радиусу Россби. На основе современных спутниковых данных горизонтальные размеры синоптических вихрей открытого океана находятся в диапазоне 50-150 км (Кошляков и Белокопытов, 2020).

Приведем еще несколько определений мезомасштабных (синоптических) вихрей. «Мезомасштабные вихри — турбулентные или вращающиеся структуры с масштабами в несколько сотен километров» (Stewart, 2006). Жмур В.В. (2011) определяет мезомасштабный вихрь как вращающееся ядро («мешок с водой») вместе с вращающейся вокруг ядра массой воды (Жмур, 2011). Cushman-Roisin (1994) дает другое определение вихрю: «вихрь – это замкнутая циркуляция, которая является относительно постоянной. Под постоянством подразумевается то, что время оборота жидкости короче, чем время, в течение которого структура остается идентифицируемой».

Мезомасштабные вихри играют важную роль в океанической циркуляции. Они обладают собственной динамикой, в которой доминируют нелинейные эффекты. Более детальное изучение вихрей позволило предположить, что большая часть энергии движения вод заключена в вихрях, а не в общей циркуляции океана (Chelton et al., 2011). Циклон — это вихрь, в котором вращательное движение происходит в том же направлении, что и вращение Земли: против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии. Антициклон вращается в другую сторону: по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки в южном полушарии (Cushman-Roisin, 1994).

Вихри способны переносить тепло, массу, кинетическую энергию и биохимические характеристики из области своего образования на значительные расстояния, оказывая влияние на климат (Gordon et al., 1992; Biastoch et al., 2008; Donners et al., 2004; Belonenko et al., 2020, Малышева и др., 2023). Они образуются практически повсеместно на всей акватории океана (Chelton et al., 2007, 2011) и являются одним из главных механизмов горизонтального и вертикального перемешивания. Вихри, в зависимости от температуры вод, определяют погоду побережья локально. Также вихри оказывают влияние на оптические, гидрохимические, гидрофизические и акустические характеристики океана (Жмур,



2011). Таким образом, детальное изучение мезомасштабных вихрей в Мировом океане является **актуальной** задачей, так как позволяет улучшить понимание динамических, климатических и биологических океанических процессов.

Развитие методов дистанционного зондирования Земли, главными преимуществами которых являются пространственная репрезентативность, обеспечивающая проведение региональных и глобальных исследований, оперативность получения информации, возможность организации оперативного комплексного мониторинга в любой точке Мирового океана, открыли новую эру исследования океана в синоптическом диапазоне частот. В настоящее время можно высоко оценить возможности спутниковой альтиметрии: измерения уровня Мирового океана доступны с пространственным разрешением  $1/12^\circ$ . В последние годы было предпринято множество усилий, чтобы достичь точности измерений высоты морской поверхности 1–2 см (Marcos et al., 2015). Исследования мезомасштабных вихрей включают в себя изучение структуры, эволюции и динамики вихрей, их влияния на погодные явления, климат и глобальную океаническую циркуляцию, а также разработку методов и моделей для их исследования и прогнозирования. В результате существующих исследований получено более глубокое понимание процессов, происходящих в мезомасштабных вихрях, их важности для формирования погодных явлений и их влияния на климат. Тем не менее, данная область науки все еще представляет собой активную область исследования. Современные достижения в областях компьютерных технологий и моделей позволяют сохранять актуальность исследований синоптической (мезомасштабной) динамики океана в течение длительного времени, ставя все новые задачи. Данная работа является **частью** этих глобальных исследований.

Как правило, 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 (Монин и Жихарев, 1990). В каждом регионе мезомасштабные вихри имеют свои специфические особенности, характерные только для конкретного региона и определяемые множеством факторов, среди которых основным является существующая система течений. В Южном полушарии одним из самых динамически активных течений является течение Агульяс. Вихри Агульяс способны преодолевать сотни (и даже тысячи) километров, что говорит об

их высоком водообменном потенциале, поэтому 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). Влияние вихрей Агульяс на общую циркуляцию в Атлантическом океане происходит благодаря двум основным механизмам: излучение волн Россби и адвекция тепла и соли мезомасштабными вихрями (Bjastoch et al., 2008; van Sebille et al., 2007). Более подробно это явление рассмотрено в Главе 3.

Таким образом, **объектом** исследования является мезомасштабная вихревая динамика в районе течения Агульяс, Капской котловины и южной части Атлантического океана. **Предметом** исследования являются мезомасштабные (синоптические) вихри в данном регионе.

### Цель и задачи

**Основной целью** данной работы является выявление специфических особенностей мезомасштабной вихревой динамики Южной части Атлантического океана на основе данных спутниковой альтиметрии, глобального океанического реанализа GLORYS12V1 и дрейфующих буев Argo.

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

1. Оценка Агульясова переноса и изучение вертикальной структуры вихрей независимым методом со-локации. Сравнение полученных оценок с оценками, полученными ранее другими исследователями различными, но отличными от нашего методами.
2. Анализ структуры вод различного происхождения в вихрях Капской котловины на основе Лагранжева метода.
3. Оценки меридионального смещения мезомасштабных вихрей при их перемещении в западном направлении на основе альтиметрических данных.
4. Оценка кинематических и динамических характеристик разнополярных вихрей Агульяс. Оценка потенциальной завихренности вихрей при помощи подходов Россби и Эртеля на примере двух разнополярных вихрей, расположенных в Капской котловине.

5. Анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе их трансформации путем вытягивания на основе данных реанализа.

### **Научная новизна**

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые для рассматриваемого региона по данным буев-профилемеров Argo получены оценки теплосодержания и солесодержания в отдельном вихре Агульса, а также оценки расхода и переноса тепла и соли.
2. Впервые дана интерпретация существующей двухмодовой термохалинной структуры вихрей в Капской котловине. Доказано, что указанная двухмодовая структура объясняется взаимодействием вихрей Агульса с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения в Капской котловине.
3. Впервые получены оценки зонального и меридионального смещения вихрей Агульса на основе данных МЕТАЗ.2. Получены оценки пройденных расстояний и периодов жизни долгоживущих вихрей, а также средние оценки их параметров: амплитуда, радиус, орбитальная скорость. Предложена новая интерпретация меридионального смещения вихрей.
4. Впервые получены оценки изменения кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в Капской котловине при их трансформации путем вытягивания.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость результатов состоит в получении новых представлений о мезомасштабной вихревой динамике вод акватории Южной части Атлантики на основе комплексного анализа альтиметрических, модельных и натуральных данных. Выполненная работа раскрывает проблему с новой стороны, дополняет имеющиеся знания по мезомасштабной вихревой динамике в данном регионе и вносит определенный вклад в развитие теории по динамике моря.

Практическая значимость результатов способствует расширению знаний о вихревой динамике океана и состоит в том, что разработанные автором оригинальные методы и подходы могут использоваться для исследования океанологических полей в других регионах Мирового океана.

### Степень достоверности

Достоверность результатов определяется репрезентативностью используемого арсенала исходной информации: альтиметрическими измерениями, модельными данными и *in situ* измерениями, полученными при помощи буев Argo. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационном исследовании, обеспечивается апробированной методологией и применением современных методов анализа эмпирической информации и гидродинамических моделей, описывающих рассматриваемые процессы.

Исследования, выполненные в рамках данной работы, поддержаны грантами:

- РФФИ № 17-05-00034: «Синоптическая структура динамики морских вод и ее влияние на средние характеристики гидрофизических и биотических полей с использованием данных дистанционного зондирования»;
- РФФИ № 20-05-00066: «Характеристики волн Россби в струйных потоках с использованием данных дистанционного зондирования».

### Публикации и апробация результатов исследования

По теме диссертационного исследования опубликовано 7 статей (4 на русском, 3 на английском языке). Все статьи опубликованы в периодических изданиях: 3 статьи в периодических изданиях, включенных в список Web of Science/Scopus и 4 статьи в периодических изданиях, включенных в список ВАК. Список опубликованных работ по теме диссертации:

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 (РИНЦ, ВАК).
2. **Малышева А.А.**, Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Оценка Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Argo, Исследование Земли из Космоса. 2020, №2, С. 24–34. DOI: 10.31857/S0205961420020049 (РИНЦ, ВАК, Scopus).

3. **Malysheva A.A.**, Kubryakov A.A., Koldunov A.V. and Belonenko T.V. Estimating Agulhas Leakage by Means of Satellite Altimetry and Argo Data. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2020, 56, 1581–1589. DOI: 10.1134/S0001433820120476 (BAK, WoS, Scopus).
4. Gnevyshev V.G., **Malysheva A.A.**, Belonenko T.V., and Koldunov A.V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects, *Russ. J. Earth Sci.*, 2021, 21, ES5003. DOI: 10.2205/2021ES000773 (РИНЦ, BAK, WoS, Scopus).
5. **Малышева А.А.**, Белоненко Т.В., Яковлева Д. А. Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс, *Гидрометеорология и экология*, 2022, № 68, С. 478—493. DOI:10.33933/2713-3001-2022-68-478-493 (РИНЦ, BAK).
6. Belonenko T.V., Budyansky M.V., **Malysheva A.A.** et al. Observing the Agulhas Leakage Source in the Water Mixing Area, *Pure Appl. Geophys.*, 2023. DOI:10.1007/s00024-023-03331-w (РИНЦ, BAK, WoS, Scopus).
7. **Малышева А.А.**, Белоненко Т.В. Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в Капской котловине, *Гидрометеорология и экология*, 2023, № 73, С. 684—699. (РИНЦ, BAK).

Результаты данного исследования были представлены на различных всероссийских и международных **конференциях**:

1. 16-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 12-16 ноября 2018, Москва. **Малышева А.А.**, Колдунов А.В., Белоненко Т.В., Сандалюк Н.В. Вихри Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии. Устный доклад.
2. II Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 19–20 декабря 2018, Санкт-Петербург. **Малышева А.А.**, Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Влияние изменчивости Агульясского течения на меридиональную термохалинную циркуляцию. Устный доклад.
3. 17-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11-15 ноября 2019, Москва. **Малышева А.А.**, Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Оценка

- Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Арго. Стендовый доклад.
4. III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 18–19 декабря 2019, Санкт-Петербург. **Малышева А.А.**, Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Оценка Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Арго. Устный доклад.
  5. IV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-IV). 22–26 апреля 2019, Севастополь. **Малышева А.А.**, Белоненко Т.В., Кубряков А.А. Исследование Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Арго. Устный доклад.
  6. 18-ая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 ноября 2020, Москва. **Малышева А.А.**, Гневывшев В.Г., Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Меридиональное и зональное распространение мезомасштабных вихрей в Южной Атлантике. Устный доклад.
  7. V Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2020). 18–22 мая 2020, Калининград. **Малышева А.А.**, Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Co-location метод для исследования Агульясова переноса. Устный доклад.
  8. VI Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2021). 18–24 апреля 2021, Москва. **Малышева А.А.**, Гневывшев В.Г., Белоненко Т.В., Колдунов А.В. О вихрях Агульяса и волнах Россби, распространяющихся в Южной Атлантике. Стендовый доклад.
  9. 19-ая Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 ноября 2021, Москва. **Малышева А.А.**, Гневывшев В.Г., Белоненко Т.В., Колдунов А.В. Волны Россби, страты и мезомасштабные вихри Южной Атлантики. Стендовый доклад.
  10. 20-ая Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 14–18 ноября 2022, Москва. **Малышева А.А.**, Белоненко Т.В., Яковлева Д.А. Сравнительный анализ двух разнополярных вихрей течения Агульяс по спутниковым и модельным данным. Стендовый доклад.

11. VII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана». 15–19 мая 2023, Санкт-Петербург. **Малышева А.А.**, Белоненко Т.В., Будянский М.В. Лагранжевый метод для исследования Агульясова переноса в районе смешения вод. Стендовый доклад.

**Отдельные результаты, полученные в рамках данной работы, были отмечены наградами:**

1. **Диплом победителя (1 место)** в Конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2019.
2. **Диплом победителя (1 место)** в конкурсе лучших студенческих докладов секции "Физика океана" на V Всероссийской конференции КИМО2020, Атлантическое отделение Института океанологии им П.П. Ширшова РАН, 2020.
3. **Диплом победителя (1 место)** в Конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2022.
4. **Диплом победителя (3 место)** в Конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2023.

#### **Личный вклад автора**

Положения, выносимые на защиту, и полученные в них результаты содержатся в статьях, опубликованных в журналах WoS, Scopus и ВАК. Автор внес значительный вклад в основной объем исследований, представленных в диссертационной работе и статьях, написанных в соавторстве. В совместных публикациях автору принадлежит выбор данных, определение методики их обработки, написание программ для вычисления изучаемых характеристик, их анализ и визуализация. Автор участвовал в интерпретации и физическом анализе полученных результатов и подготовке текстов публикаций.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Результаты диссертационной работы представлены на 123 страницах и включают в себя 46 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 155 наименований.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, описана актуальность и новизна, а также теоретическая и практическая значимость данной работы, приведен перечень публикаций и конференций, на которых работа была апробирована.

В **Главе 1** дано полное физико-географическое и океанологическое описание исследуемого района. Подробно проанализированы литературные источники, посвященные исследованию течения Агульяс и южной части Атлантического океана. Представлен краткий обзор вихревой динамики района исследований.

В **Главе 2** подробно описываются используемые данные и методы их анализа.

В **Главе 3** всесторонне рассматривается такое явление, как Агульясов перенос, на основе альтиметрии, данных реанализа и данных буев Argo.

В **Главе 4** исследуется меридиональное смещение вихрей Агульяса, а также анализируются теоретические подходы к данному явлению.

**Глава 5** посвящена анализу динамических и кинематических характеристик вихрей Капской котловины. Рассмотрены такие параметры, как относительная и потенциальная завихренность, пространственные размеры вихрей, орбитальная скорость и скорость дрейфа, частота Вяйсяля-Брента, доступная потенциальная и кинетическая энергия вихрей, а также анализируется поведение вихрей при взаимодействии с баротропным потоком.

**Заключение** содержит основные выводы диссертационной работы.

## Благодарности

Автор выражает крайнюю степень признательности и благодарности своему научному руководителю д.г.н. Белоненко Т. В. за помощь на всех этапах работы над диссертацией, к.г.н. Колдунову А.В. за консультирование при проведении расчетов,



а также к. ф-м наук, ведущему сотруднику Института океанологии им. П.П. Ширшова Гневыху В.Г. за внимание к работе, полезные рекомендации и ценные советы при ее выполнении. Автор признателен всем преподавателям кафедры океанологии СПбГУ за поддержку и участие на протяжении всех лет обучения на кафедре.

### Основные научные результаты

1. Показано, что долгоживущие вихри Агульяса, перемещаясь в западном направлении, пересекают Атлантический океан и тем самым переносят свойства вод Индийского океана к берегам Южной Америки. (Малышева и др., 2018, С. 158). 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  **$2.25 \cdot 10^9$  Вт и  $5.36 \cdot 10^5$  кг·с<sup>-1</sup>** соответственно. Теплосодержание и солесодержание в одном вихре Агульясова переноса –  $2.03 \cdot 10^{15}$  Дж и  $4.83 \cdot 10^{11}$  кг соответственно (Malysheva et al, 2020, С. 1587);
2. Показано, что главной особенностью исследуемой области является **смещение частиц вод различного происхождения. Воды Южно-Атлантического круговорота взаимодействуют** с водами Агульясова течения **активнее**, чем считалось ранее. Воды, которые несут **вихри Агульясова переноса**, происходят не только из самого Агульясова течения, но и из **Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения**. Этот эффект может влиять на **формирование двухмодовых** вихревых структур, описанных, но **необъясненных** в других исследованиях (Belonenko et al, 2023, С. 3412-3414);
3. Зональное смещение и, соответственно, зональная составляющая скорости перемещения, доминируют, однако на отдельных участках трека смещение вихря к экватору сравнимо с зональным смещением. **Меридиональное смещение** варьируется в диапазоне **9 – 895 км**. Установлено, что чем **больше скорость** вихря, тем **больше его меридиональное смещение** в единицу времени (Gnevyshev et al, 2021, С. 9, 13);
4. Единственная теория о меридиональном смещении, согласующаяся с эмпирическими наблюдениями, это теория Лайтхилла (1967), но в

модифицированном варианте. Если в формуле, предложенной Лайтхиллом, использовать вместо баротропного первый бароклинный радиус, то тогда мы видим хорошее соответствие направлений перемещения треков вихрей Агульяса в Южной Атлантике с формулой (Gnevyshev et al, 2021, С. 7, 8);

5. Установлено, что в процессе **деформации** вихрей баротропным потоком происходит **уменьшение энергии**: за 7 дней вытягивания вихрей **потенциальная энергия уменьшается в 3 раза** для антициклона и **в 1,5** – для циклона, а **кинетическая энергия** в среднем **уменьшается в 1,3** раза (Малышева и Белоненко, 2023, С. 694).
6. Проанализирована вертикальная структура вихрей на примере двух разнополярных вихрей Капской котловины. Показано, что для циклона аномалии изотерм и изохалин простираются до 1000 м, а для антициклона — до 1200 м. Ядро антициклона распространяется до глубины 800 м. Ядра вихрей отчетливо выделяются на разрезе Частоты Вэйсяля-Брента (ЧВБ). Ядро циклона, которому присуща однородная стратификация, характеризуется максимальными значениями ЧВБ ( $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ), в отличие от ядра антициклона, в котором значения ЧВБ равны нулю, следовательно, стратификация отсутствует. Относительная завихренность также наглядно прослеживается в ядрах вихрей, максимальные положительные значения ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) наблюдаются в области циклона, максимальные отрицательные ( $-2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) — в области антициклона. Представлена оценка потенциальности завихренности (PV) на основе двух подходов: по формуле Эртеля и по формуле Россби. Показано, что в центре антициклона практически отсутствует стратификация, что способствует малым значениям потенциальной завихренности по Эртелю ( $0,6 \cdot 10^{-10} - 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). А в центре циклона большие значения частоты плавучести способствуют большим значениям PV ( $1,8 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Кроме того, в центре антициклона, где отрицательная относительная завихренность велика, PV близка к нулю. Минимальные (отрицательные) значения потенциальной завихренности по Россби достигают  $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и наблюдаются в области ядра антициклона. Максимальные значения  $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  расположены в области ядра циклона. Также наблюдается обмен потенциальной завихренностью между вихрями при их взаимодействии друг с другом (Малышева и др., 2022, С. 484-486, 488, 489).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Установлено, что среднее теплосодержание и солесодержание в одном вихре Агульясова переноса –  $2.03 \times 10^{15}$  Дж и  $4.83 \times 10^{11}$  кг, соответственно. Один вихрь Агульяса переносит в среднем 8.5 Sv, при этом транспорт тепла и соли одним мезомасштабным вихрем Агульясова переноса в среднем составляет  $2.25 \times 10^9$  Вт и  $5.36 \times 10^5$  кг·с<sup>-1</sup>, соответственно.
2. Вихри Агульяса, образующиеся в результате распада рингов течения Агульяс, переносят свойства вод Индийского океана, при этом в Капской котловине происходит трансформация термохалинной структуры вихрей, в которых частицы постепенно замещаются частицами вод течений Южно-Атлантического круговорота, образуя в вихрях двухмодовую структуру вод.
3. На основе спутниковых данных установлено, что при движении антициклонических вихрей Агульяса на запад, происходит их меридиональное смещение к экватору. Оценки меридионального смещения изменяются в диапазоне 9 – 895 км. Возможным физическим механизмом, объясняющим меридиональное смещение вихрей, является узконаправленное угловое излучение длинных волн Россби незональными течениями.
4. При взаимодействии вихрей с течением происходит вытягивание мезомасштабных вихрей в филаменты, при этом кинетическая энергия вихрей уменьшается с  $3 \times 10^{15}$  до  $2,6 \times 10^{15}$  Дж, а доступная потенциальная энергия уменьшается с  $4 \times 10^{18}$  до  $0,1 \times 10^{18}$  Дж.

## ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

### 1.1. Течение Агульяс

**Течение Агульяс** – теплое западное пограничное течение в южной части Индийского океана, являющееся частью направленного на запад Южно-Экваториального течения, омывающее восточный берег Африки между  $27^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  ю.ш. (Gordon, 1985) (рис. 1.1). Течение узкое и быстрое (на поверхности скорость может достигать 200 см/с). 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.

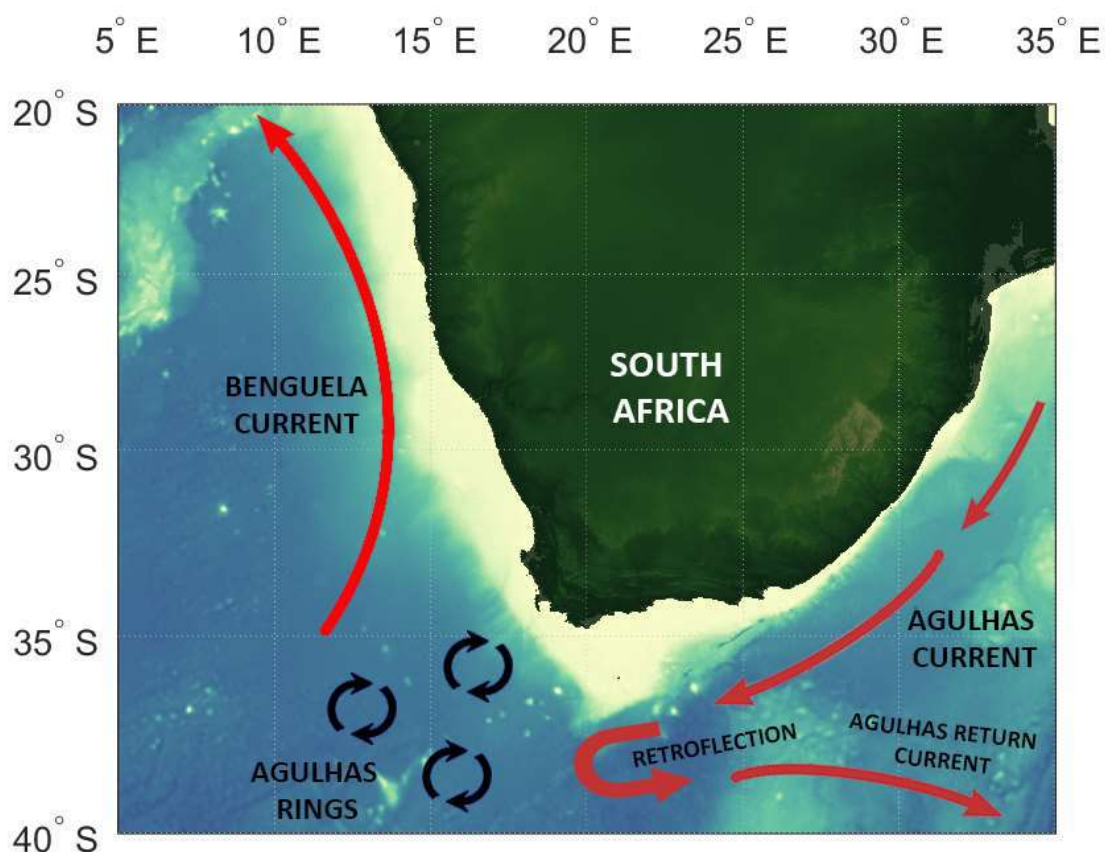


Рисунок 1.1. Общая схема течения Агульяс.

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 ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Несколькими годами позже Toole and Warren (1993) 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  $78 \pm 3$  и  $76 \pm 2$  Sv. Самые свежие оценки принадлежат группе ученых во главе Bryden et al. (2003), которые в 2003 г. вычислили средний объем перемещаемых вод:  $69,7 \pm 4,3$  Sv на основе годовых измерений скоростей течения.

По мере того как течение Агульяс приближается к южному краю материкового шельфа Африки, оно начинает разворачиваться в обратную сторону. Около  $36^\circ$  ю.ш. течение отделяется от континентального шельфа и поворачивается на восток в большой антициклонической петле, названной **Agulhas retroflection** (в русскоязычной научной литературе не существует аналогов данному термину), формируя **Агульясово возвратное течение** (Agulhas Return Current). Ширина Agulhas Return Current около 70 км, а объем перемещаемых вод  $44 \pm 5$  Sv в верхней тысяче метров. Конфигурация течения не остается постоянной, образуемая петля постоянно движется в сторону Южной Атлантики. Достигая некой точки экстремума, петля отрывается и замыкается в кольцо, образуя ринг (Gordon et al., 1987), который продолжает движение в западном направлении. Далее в Капской котловине происходит распад рингов Агульяс на вихри меньшего масштаба. Эти вихри заполнены относительно теплой и соленой водой Индийского океана (Belonenko et al, 2023; Malysheva et al, 2022). Температура этой воды более чем на  $5^\circ\text{C}$  теплее и соленость на 0,3 psu выше, чем воды на поверхности Южной части Атлантического океана равной плотности (Gordon et al., 1985). Вихри сохраняют свои характерные тепловые характеристики до  $5^\circ$  в.д. в западном направлении и до  $46^\circ$  ю.ш. в южном направлении и распространяются в Южной части Атлантического

океана со скоростью 12 см/сек (Lutjeharms and van Ballegooyen, 1988). Этот перенос между Индийским и Атлантическим океанами может оказывать значительное влияние на структуру глобального климата.

## 1.2. Южная часть Атлантического океана

Циркуляция Южной Атлантики характеризуется антициклоническим круговоротом, который состоит из четырех основных ветвей: Бразильское течение, Южно-Атлантическое течение, Бенгельское течение, Южное Экваториальное течение (рис. 1.2). Последние переносят воды из Индийского и Тихого океанов в сторону Северной Атлантики. Как было сказано выше, при перемещении на запад, а именно в Капской котловине, ринги Агульса распадаются на вихри меньшего масштаба и взаимодействуют с окружающими водами. Таким образом, у юго-западного побережья Южной Африки существует котловина, где вихри Агульса взаимодействуют с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения, на которое оказывает влияние в том числе Ангольское течение. Этот процесс является уникальным и не встречается ни в одной другой крупной системе восточных пограничных течений.

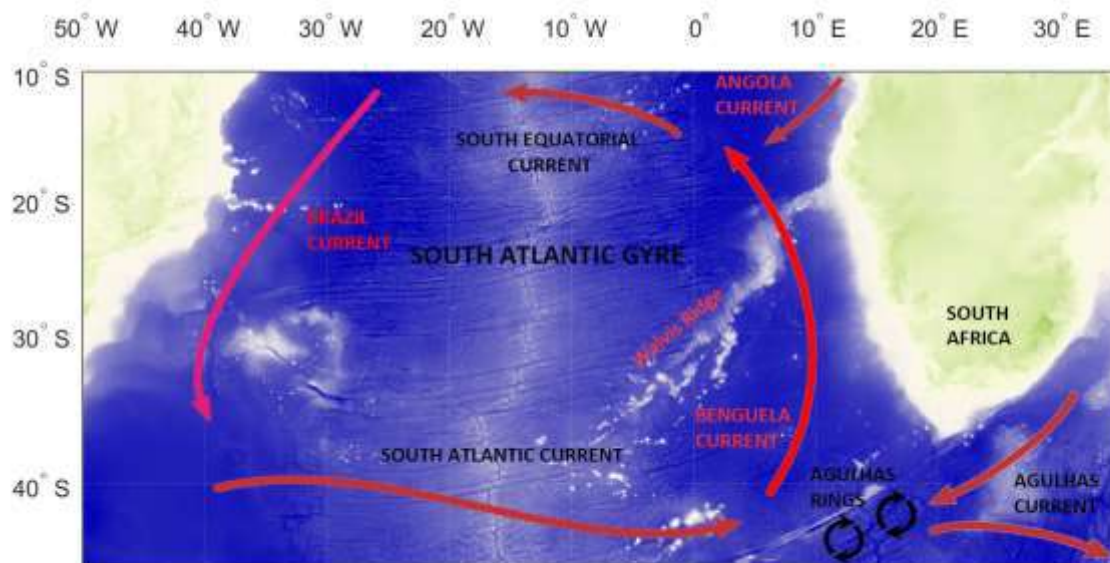


Рисунок 1.2. Общая схема циркуляции в Южной части Атлантического океана.

## ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

### 2.1. Используемые данные

Основным источником данных для данного исследования является реанализ Мирового океана и данные спутниковой альтиметрии. Также использовалась глобальная модель рельефа поверхности Земли ETOPO1. Все расчёты проводились при помощи программной среды MATLAB. Для расчета термодинамических свойств морской воды использовалось уравнение состояния морской воды TEOS-10. Для моделирования циркуляции вод был использован Лагранжев метод, который описывает перенос и перемешивание в исследуемом регионе, вычисляя траектории большого числа искусственных пассивных частиц.

#### 2.1.1. Массив «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH»

Использованы данные массива «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH» (META3.2 DT allsat), доступные на портале AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr>) при поддержке CNES в сотрудничестве с IMEDEA. Для создания этого массива, содержащего мезомасштабные вихри, выделенные методом автоматической идентификации и трекинга, применялся специально разработанный алгоритм идентификации вихрей, основанный на анализе альтиметрических снимков (Pegliasco et al., 2022). Суть работы оригинального алгоритма, применявшегося для создания данного массива, 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 аномалий уровня моря 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. В массиве данных каждому вихрю присвоен идентификационный номер и координаты его траектории. Продукт META3.2

содержит информацию о полярности вихрей, их радиусе и амплитуде, орбитальной скорости и сроке жизни.

### **2.1.2. Данные буев-профилемеров Argo**

Использовались данные дрейфующих буев-профилемеров Argo (<http://www.argo.net>). Важным преимуществом исследований с помощью буев-профилемеров 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-профилемеров Argo измеряются температура и соленость морской воды. Argo позволяют выполнять измерения до глубин 1500 м с периодичностью 1 раз в 5 суток.

### **2.1.3. GLORYS12V1**

Вихреразрешающий реанализ Мирового океана GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis), доступен на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Массив включает в себя такие параметры, как температура, соленость, скорость течений, высота поверхности моря и другие. Реанализ основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. GLORYS12V1 ассимилирует спутниковые и *in situ* данные. Основой реанализа является модель NEMO, где в качестве форсинга используется атмосферный реанализ ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). В уравнениях модели применяется приближение Буссинеска. Поскольку моделирование не дает прямого представления о глобальном среднем стерическом колебании уровня моря, на каждом временном шаге к моделируемому динамическому уровню моря добавляется глобально диагностируемый средний стерический тренд уровня моря для улучшения согласованности с ассимилированными спутниковыми наблюдениями. Различные типы наблюдений ассимилируются с использованием фильтра Калмана (SEEK -



Singular Evolutive Extended Kalman). Аномалии уровня моря (SLA) получены с помощью спутникового альтиметра, температура поверхности моря (SST) - со спутника AVHRR из NOAA, а вертикальные профили температуры и солености (T/S) in situ из базы данных CORA с контролем качества CMEMS. В качестве эталона для ассимиляции альтиметрических данных также использовалась "гибридная" средняя динамическая топография (MDT), основанная на CNES-CLS13 MDT.

Пространственное разрешение данных составляет  $1/12^\circ$  на 50 уровнях за период, когда доступны альтиметрические наблюдения. Временная дискретность – одни сутки.

#### **2.1.4. ETOPO1**

Данные по глубине исследуемого района были взяты из глобальной модели рельефа поверхности Земли ETOPO1 (<https://www.ngdc.noaa.gov>). Модель реализована на сетке с пространственным разрешением  $1/60^\circ$ .

#### **2.1.5. WOA13**

При анализе термохалинных свойств вихрей использовалась обновленная версия Атласа Мирового Океана (WOA13), который представляет собой базу обобщенных климатологических данных. Данные представлены на сетке  $1^\circ$ .

#### **2.1.6. TEOS-10**

Для расчета термодинамических свойств морской воды использовалось международное уравнение состояния морской воды TEOS-10 (<http://www.teos-10.org/>) Рассчитывались такие характеристики вод, как частота Вяйсяля-Брента, плотность.

### 2.1.7. Алгоритм AMEDA

Мы использовали оптимизированный алгоритм AMEDA (Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm) для обнаружения и отслеживания вихрей на основе двумерных полей скоростей. Для идентификации вихрей алгоритм использует гибридный метод, который применяется к данным реанализа GLORYS12V1. Основные преимущества AMEDA заключаются в следующем: алгоритм устойчив к разрешению сетки, он использует минимальное количество настраиваемых параметров, динамические характеристики обнаруженных вихрей оцениваются количественно. Данный метод обеспечивает получение полной динамической эволюции обнаруженных вихрей в течение их жизненного цикла. Это позволяет точно идентифицировать области формирования долгоживущих вихрей, области, где часто происходит деление или слияние вихрей, а также области взаимодействия вихрей с течениями (Le Vu et al., 2018). Используя алгоритм AMEDA, мы произвели идентификацию вихрей, полученных на основе данных реанализа GLORYS12V1.

## 2.2. Методы анализа

### 2.2.1. Метод со-локации

Метод совместного анализа мезомасштабных вихрей и профилей ARGO – так называемый метод со-локации – применялся нами для анализа вертикальной структуры вихрей. Суть этого метода заключается в следующем. Среди всех вихрей Агульясова переноса мы выбирали те, которые удовлетворяли следующим условиям:

- Мезомасштабный вихрь образован в районе «Agulhas Retroflection»;
- 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 Агульясова переноса при совместном анализе мы рассматриваем только те из них, которые постоянно перемещаются на запад вместе с бую Argo. Нам удалось найти шесть вихрей, которые удовлетворяют выбранным условиям в промежуток времени 1993–2017 гг., и в дальнейшем их термохалинные характеристики анализировались совместно с их геометрическими и кинематическими параметрами для получения необходимых оценок. В частности, было найдено географическое положение буя в вихре на момент захвата. Средние параметры вихрей и параметры на момент захвата буя вихрем были получены из массива «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product». Для анализа термохалинной структуры вихрей использовались данные WOA13. Относительно данных среднеклиматических значений рассчитывались аномалии температуры и солености на каждый момент времени в соответствующих точках траектории вихрей. Таким образом, есть возможность наблюдать изменчивость термохалинных характеристик с момента захвата и до конца нахождения буя в вихре, а также возможность сравнить T/S – характеристики вихрей и окружающих вод.

### 2.2.2. Расчет вихревого транспорта

Транспорт тепла и соли, а также теплосодержание и содержание соли в вихрях было рассчитано на основе средних параметров из массива «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product». Следуя подходу, предложенному в работе Chaigneau et al. (2011), оценивалось теплосодержание ( $AT$ ) и содержание соли ( $AS$ ) в объеме вихря  $V$ :

$$AT = \int \rho C_p T' dV, \quad (2.1)$$

$$AS = \int \rho S' dV, \quad (2.2)$$

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

$$HT = \int \rho C_p T' v dS, \quad (2.3)$$

$$ST = \int \rho S' v dS, \quad (2.4)$$

где  $\rho = 1,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ,  $C_p = 4200 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1} (\text{°C})^{-1}$ ,  $T'$  – средняя аномалия температуры по глубине,  $S'$  – средняя аномалия солёности по глубине (Yari et al., 2012). Важно отметить, что полученные оценки являются средними и характеризуют вихревой перенос одним вихрем.

### 2.2.3. Расчет потенциальной завихренности

Основной динамической характеристикой вихрей является потенциальная завихренность ( $PV$ ). Если бы система, в которой перемещаются вихри, была замкнутой, то выполнялся бы закон сохранения потенциальной завихренности этих вихрей. Этот закон является аналогом закона сохранения количества движения в механических процессах. Однако в реальном океане нельзя ожидать изолированности вихревых процессов от всех других, и, как следствие, система не является сколь-нибудь замкнутой, поэтому в процессе эволюции может меняться потенциальная завихренность вихрей наряду с изменениями их термохалинных и кинематических характеристик.

В работе представлены два основных подхода к расчету потенциальной завихренности вихрей: Эртеля и Россби.

#### Расчет потенциальной завихренности $PV$ вихрей по формуле Эртеля

Потенциальная завихренность в подходе Эртеля рассчитывалась по формуле (12) из работы Жмур и др. (Жмур и др., 2021):

$$PV = \frac{\left(-\frac{\partial v}{\partial z}\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} - \left(-\frac{\partial u}{\partial z} + f_h\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho}, \quad (2.5)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $u$  и  $v$  — зональная и меридиональная составляющая скорости течений,  $f = 2\omega \sin \varphi$  — параметр Кориолиса,  $f_h = 2\omega \cos \varphi$  — меридиональная составляющая угловой скорости вращения Земли  $2\Omega = (0, f_h, f)$ ,  $\varphi$  — широта. Используется правая система координат, где ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  — на север,  $z$  — вертикальная ось. Так как вертикальные градиенты скоростей и также  $f_h$  незначительны, расчет потенциальной завихренности проводится по более простой формуле:

$$PV = \frac{(\zeta + f) \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0}, \quad (2.6)$$

где  $\rho_0$  — референтная плотность воды, в расчетах  $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$ ,  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  — относительная завихренность.

### Расчет потенциальной завихренности $\sigma$ вихрей по формуле Россби

Расчет  $\sigma$  в подходе Россби производился по формуле (13) из работы Жмур и др. (Жмур и др., 2021):

$$\sigma = \text{rot}_z \mathbf{V} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \nabla^2 \psi + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right), \quad (2.7)$$

где  $\psi$  — функция тока,  $N$  — частота Вэйсяля–Брента.

Потенциальная завихренность  $\sigma$  по формуле Россби отличается размерностью от  $PV$  по формуле Эргеля.

#### 2.2.4. Лагранжев подход

Моделирование циркуляции вод было выполнено при помощи Лагранжева подхода, суть которого заключается в вычислении траекторий большого количества искусственных пассивных частиц в поле скорости. В настоящее время Лагранжев подход является доступным благодаря развитию численных моделей циркуляции и общедоступности альтиметрических данных. Следовательно, возможно отслеживать происхождение, перенос и перемешивание различных вод при помощи вычисления траекторий искусственных частиц назад во времени от фиксированной даты на основе альтиметрических данных.

Поле Лагранжевых индикаторов представлено на ежедневных Лагранжевых картах региона. Набор последовательных карт позволяет проследить эволюцию циркуляции вод день за днем. Линии с заметными горизонтальными градиентами являются Лагранжевыми фронтами (Prants et al., 2014, 2017), которые разделяют водные массы с различным прошлым. Анализ моделирования производится обратно во времени, что позволяет определить, откуда прибыли частицы, проходящие некую заданную границу. Таким образом, большое количество искусственных пассивных частиц распределяется по области исследования, а их траектории вычисляются путем решения уравнений адвекции:

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t), \frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (2.8)$$

где  $u$  и  $v$  – зональная и меридиональная составляющие угловой скорости,  $\varphi$  и  $\lambda$  – широта и долгота. Интегрируя данное уравнение назад во времени, мы получаем информацию о происхождении вод. Угловые скорости используются потому, что уравнения для них имеют максимально простую форму учитывая сферическую форму Земли. Для получения точных численных результатов используются бикубическая пространственная интерполяция и интерполяция по времени полиномами Лагранжа третьей степени. Лагранжевы траектории вычисляются путем интегрирования уравнения (2.8) с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка с шагом по времени 0,001 суток.

Для каждой частицы длина ее траектории:

$$S = R_E \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{(\lambda'(t))^2 \cos^2 \varphi(t) + (\varphi'(t))^2} dt \quad (2.9)$$

рассчитывается за заданный период (в данном исследовании – 30 дней). Это просто длина кривой, которая является траекторией частицы с начала движения  $(\varphi(t_1), \lambda(t_1))$  и до окончания  $(\varphi(t_2), \lambda(t_2))$ , где  $\varphi'(t)$  и  $\lambda'(t)$  – производные по времени, а  $R_E = 6371$  км – радиус Земли (Будянский и др., 2022).

Для того чтобы определить центры вихрей и отследить их движение и влияние на окружающую среду, мы вычисляем ежедневное положение стационарных точек, в которых скорость равна нулю. Затем производится стандартный анализ устойчивости линеаризованных уравнений адвекции для заданных критических точек эллиптического и гиперболического типа (подробнее см. Prants et al., 2017). Устойчивые эллиптические точки (треугольники на картах) расположены в центрах вихрей, где вращение преобладает над деформацией. Появление вихря проявляется возникновением эллиптической точки, а ее исчезновение соответствует распаду вихря. Гиперболические точки (оранжевые крестики на картах), где деформация преобладает над вращением, расположены преимущественно между вихрями. Любая гиперболическая точка имеет направление, по которому частицы воды приближаются или удаляются. В теории динамических систем такие геометрические структуры известны как устойчивые (притягивающие) и неустойчивые (отталкивающие) многообразия.

## ГЛАВА 3. АГУЛЬЯСОВ ПЕРЕНОС

### 3.1. Термин Агульясов перенос

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; Малышева и др., 2018), влияют на Атлантическую меридиональную термохалинную циркуляцию, поэтому получение численных оценок этих явлений крайне важно.

Согласно литературным источникам, влияние Агульясова переноса на общую циркуляцию в Атлантическом океане происходит благодаря двум основным механизмам: излучение волн Россби и адвекция мезомасштабными вихрями (Bjastoch 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 перемещения 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), Гневывшев 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).

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 транспорта 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 et al., 2007). В работе (Gordon et al., 1990) на основе измерений спутника Geosat и CTD-профилей Агульясов перенос составляет 20–30 Sv. 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. 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.

Таким образом, в данной главе 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 метода со-локации - совместного анализа альтиметрических данных и измерений профиломеров Argo. В данной части работы также анализируется пространственное распределение частиц воды различного происхождения в Капской котловине на основе лагранжева метода, чтобы оценить роль Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения в Агульясовом переносе.

### **3.2. Временная изменчивость числа вихрей Агульясова переноса**

На первом этапе анализировались треки и характеристики вихрей на основе архива “Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product”. Нас интересовали вихри, сформировавшиеся в районе “Agulhas Retroflexion”, которые пересекают Южную

Атлантику. На рис. 3.1 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 Агульясова переноса, зародившихся в районе “Agulhas Retroflection”, которые пересекли определенный меридиан в Южной Атлантике в диапазоне  $35^{\circ}$  з.д.– $10^{\circ}$  в.д. Рис. 3.2 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  $10^{\circ}$  в.д. число вихрей Агульясова переноса в различные годы, как правило, превышает 20, то нулевой меридиан пересекают не более 4 вихрей (в зависимости от года). На рис. 3.2 видно, что Южно-Атлантический хребет (восточнее  $20^{\circ}$  з.д.) пересекает все еще значительное число вихрей Агульясова переноса, однако  $30^{\circ}$  з.д. достигают только два вихря (в 2007 и 2016 гг.), и лишь один зафиксирован на  $34^{\circ}$  з.д. в 2007 г. Это опровергает главные выводы, сделанные в работах (Bjastoch 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. 3.2 также можно выделить годы, когда Агульясов 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.) Агульясов перенос не распространялся далее Южно-Атлантического хребта.

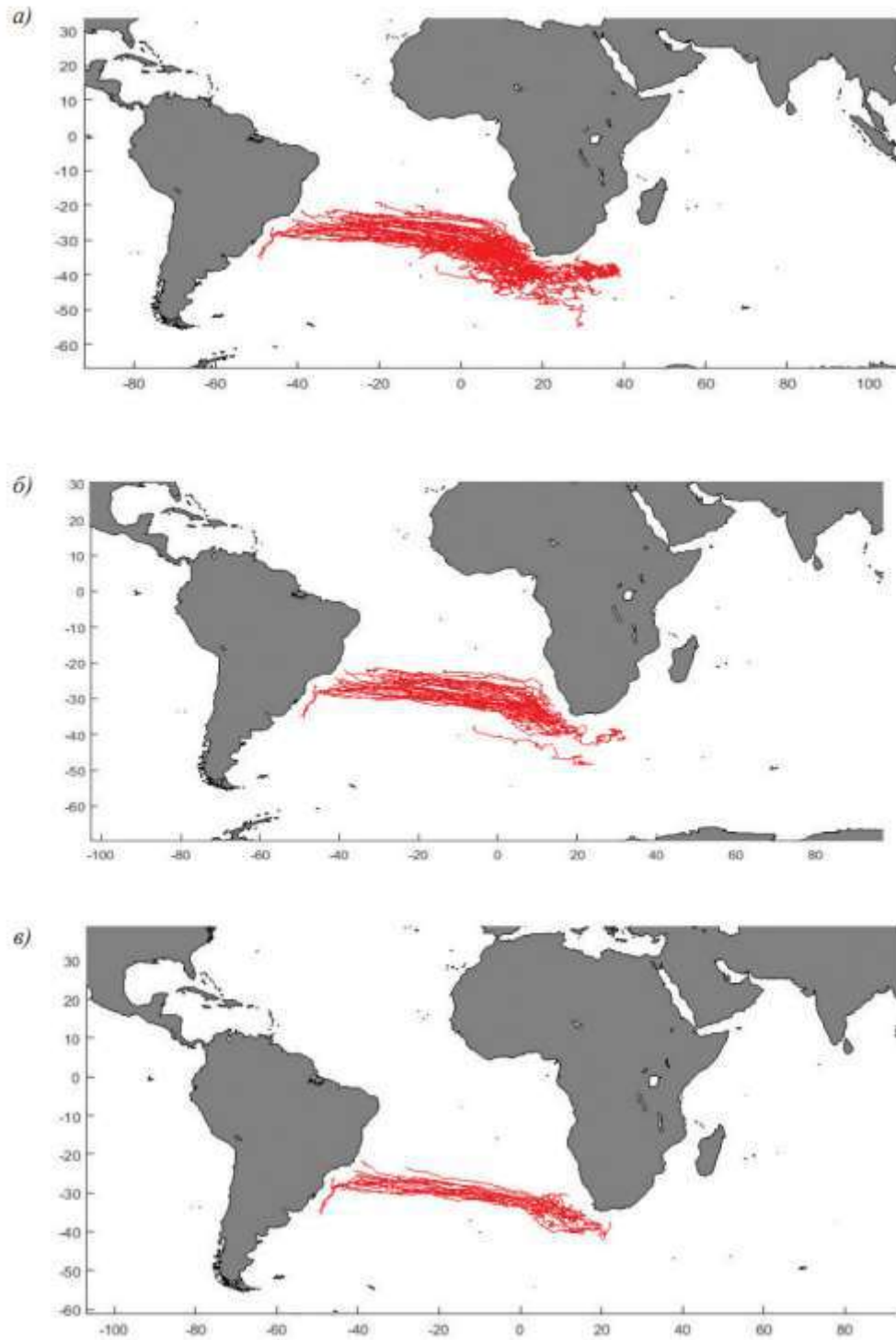


Рисунок 3.1. Треки мезомасштабных вихрей с продолжительностью жизни не менее 1 (а), 2 (б) и 3 (в) года за период 1993–2017 гг.

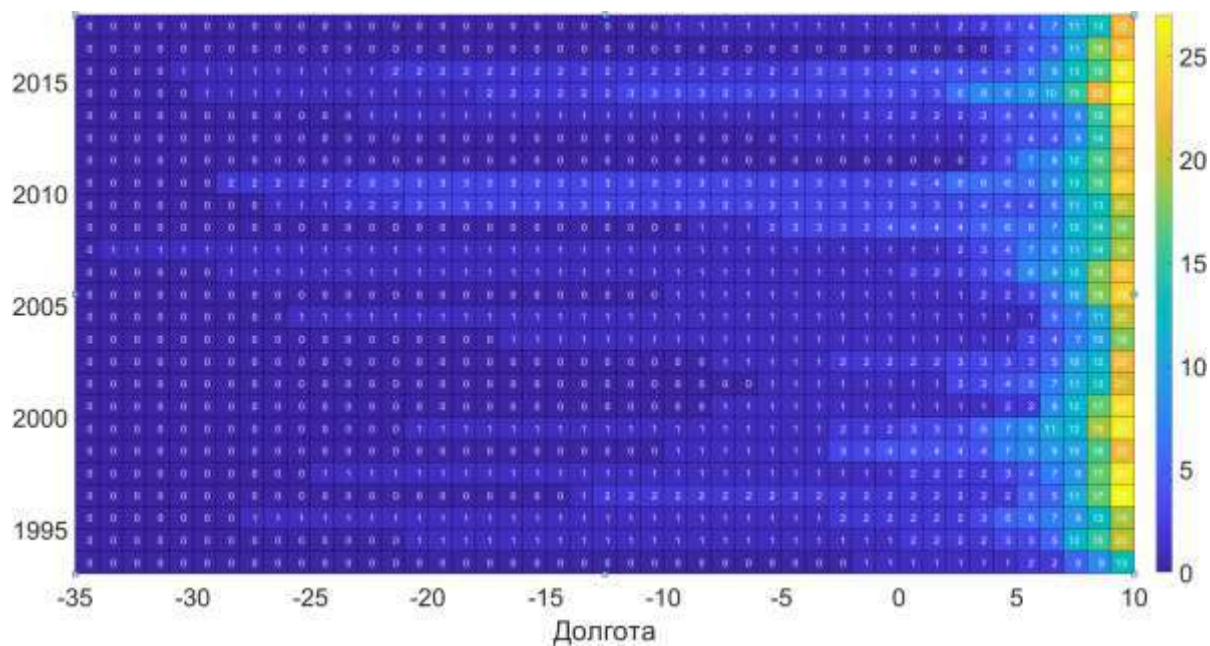


Рисунок 3.2. Статистика вихрей Агульясова переноса в Южной Атлантике: значения показаны на шкале и числами на графике. По оси абсцисс показаны долготы, по оси ординат – время (1993–2017).

### 3.3. Метод со-локации

Для изучения вертикальной структуры мезомасштабных вихрей использовался метод со-локации, который описан в главе 2. 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 термохалинные характеристики этого вихря с его геометрическими и кинематическими параметрами. На рисунке 3.3 показано географическое положение буя на момент его захвата антициклоническим вихрем (положительные значения аномалий уровня моря).

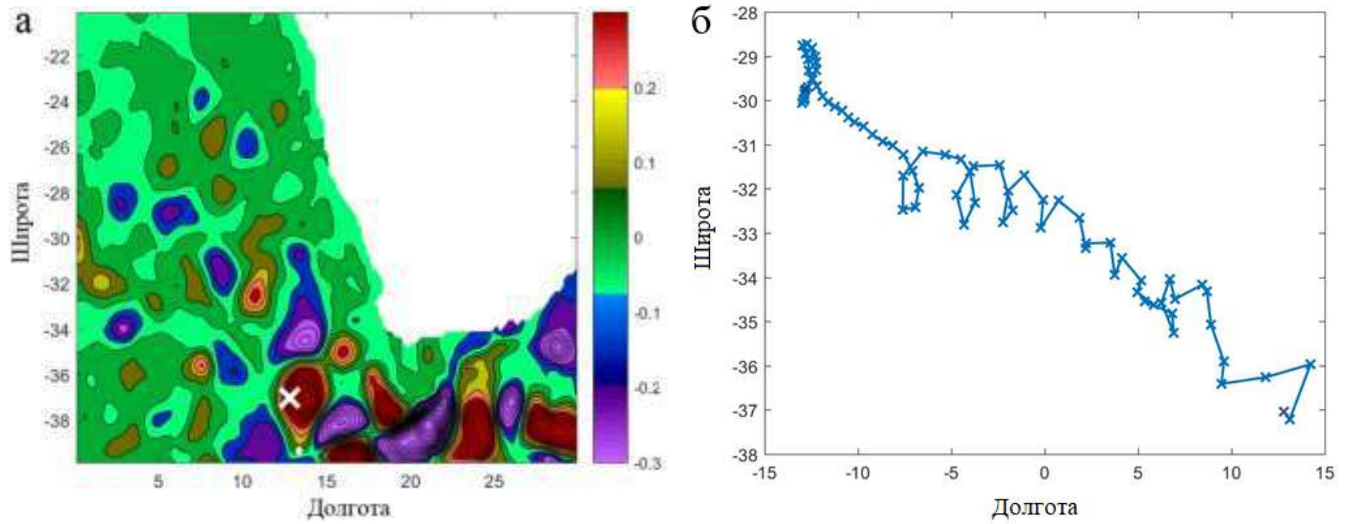


Рисунок 3.3. Аномалии уровня моря (см) по данным спутниковой альтиметрии (а) на дату 06.12.2014. Положение буя № 6901635 показано крестиком; траектория перемещения буя вместе с мезомасштабным вихрем (б). Красным крестиком обозначено начало движения, черным – конец.

В таблице 3.1 указаны параметры вихря, полученные из архива «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product». Отметим, что средние значения амплитуды и скорости перемещения вихря в среднем почти такие же, как и в начальный момент захвата вихря буем, а средняя орбитальная скорость даже 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.

Таблица 3.1. Параметры мезомасштабного вихря Агульясова 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

На рис. 3.4 показан временной ход аномалий солёности 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. 3.4 также видно, что глубина вихря составляет около 1000 м, максимум значений аномалий расположен на глубине 500–700 м, аномалии солёности и температуры на этих глубинах выше среднеклиматических значений на 0,6 и 5°C, соответственно. Ядро вихря, которое располагается на глубине 300–700 м хорошо 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.

Рис. 3.4 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. 3.5 показано сравнение T/S-характеристик вихря Агульясова переноса со средними T/S-характеристиками окружающих вод. 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. Видно, что в вихре температура на 5°C и солёность 0.8–1.0 выше средних фоновых значений вод. Это означает, что рассматриваемый вихрь действительно переносит более теплые и солёные воды в Южную Атлантику и сохраняет отличные от окружающей среды свойства на протяжении длительного времени.

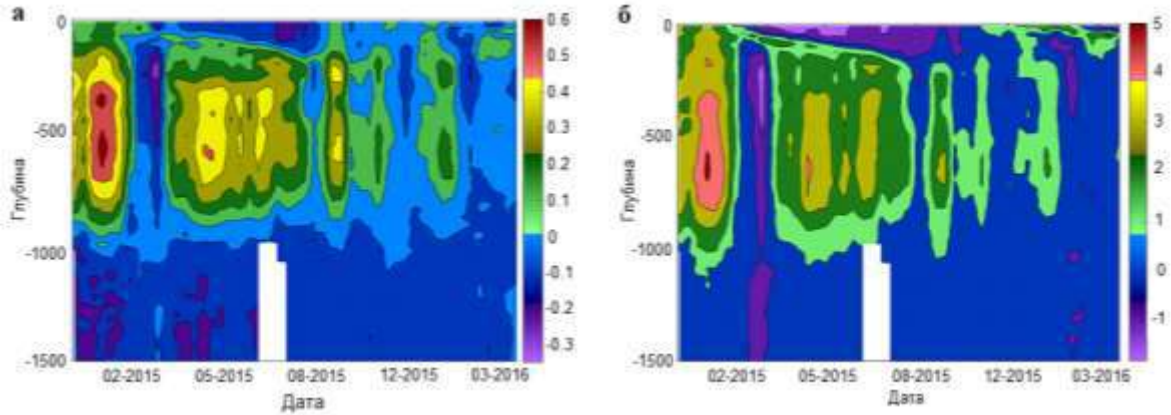


Рисунок 3.4. Временная изменчивость аномалий солености (а) и температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) (б) в вихре по данным буя № 6901635.

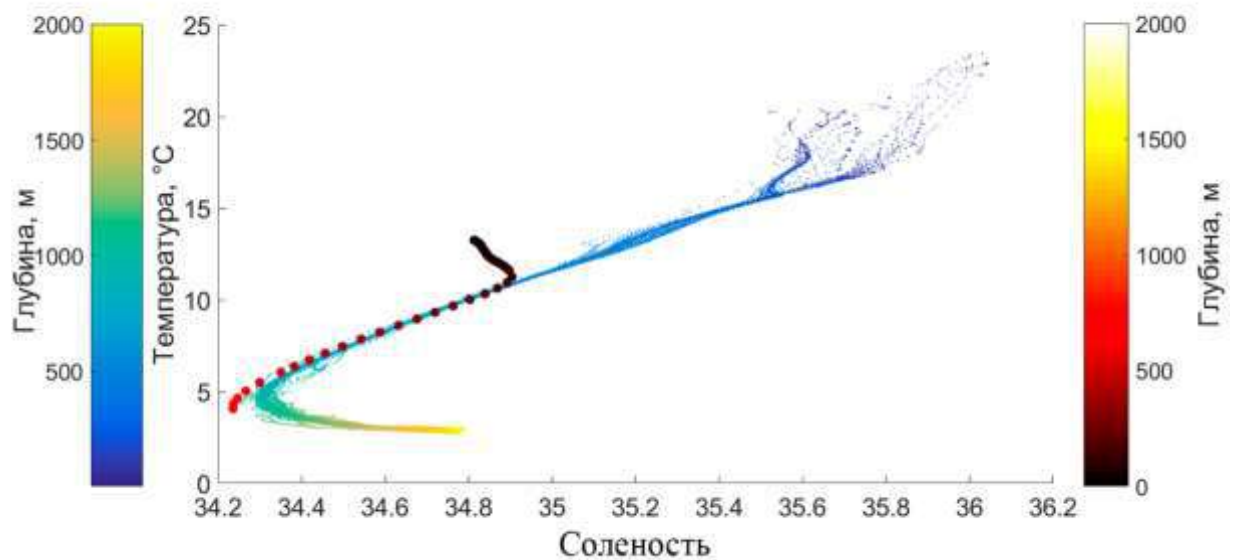


Рисунок 3.5. Сравнение T/S-кривых вихря – профили буя № 6901635 (синий цвет) и окружающих вод (красный цвет). Цветом отмечена глубина точки на профиле с соответствующими характеристиками.

Приведенный выше анализ был проведен для шести выделенных вихрей Агульясова 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 см/с) и следуя подходу, предложенному в работе 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). Расчет теплосодержания и содержания соли в одном вихре Агульясова переноса описан в главе 2. Полученные оценки представлены в таблице 3.2. Отметим, что эти оценки являются средними и характеризуют вихревой перенос одним вихрем. Используя совместно данные таблицы 3.2 и статистику вихрей, представленную на рисунке 3.2, мы 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 таблице 3.2, 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.

Таблица 3.2. 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	$2.03 \times 10^{15}$
Содержание соли, $AS$ , кг	$4.83 \times 10^{11}$
Транспорт тепла, $HT$ , Вт	$2.25 \times 10^9$
Транспорт соли, $ST$ , кг с <sup>-1</sup>	$5.36 \times 10^5$

#### 3.4. Лагранжев анализ Агульясова переноса в зоне смешения трех типов вод

В Капской котловине ринги Агульяса, покинув район формирования, быстро распадаются, образуя вихри меньших масштабов (мезомасштабные вихри) (Duncombe Rae, 1991; Gordon & Haxby, 1990; Lutjeharms & van Ballegooyen, 1988; Olson & Evans, 1986a, 1986b), они и являются основным компонентом Агульясова переноса. В результате разрушения рингов воды Агульяса смешиваются с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения, простирающегося на север вдоль западного побережья Южной Африки (Hutchings et al., 2009). Хотя нет



единого мнения о точном вкладе вод Агульяс в Бенгельское течение, существует корреляция между силой Бенгельского течения и вихревым переносом течения Агульяс (Garzoli & Gordon, 1996). Более того, Matano и Beier (2003) установили, что большая часть энергии Бенгельского течения обеспечивается вихрями Агульяс, т.е. Бенгельское течение можно рассматривать как средство, способствующее переносу вихрей Агульяс в Атлантический океан. Но нельзя отрицать, что на структуру вихрей, образующихся в Капской котловине, также оказывают значительное влияние воды Южно-Атлантического круговорота (рис. 1.2).

Таким образом, у юго-западного побережья Южной Африки существует котловина, где вихри Агульяс взаимодействуют с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения. Guerra et al. (2022) рассмотрели профили температуры и солености с 1993 по 2016 год, проанализировали более 3200 профилей температуры и 2400 профилей солености из исторических баз данных и сравнили их с 52 долгоживущими вихрями Агульяс. Этот анализ показал, что в 88% случаев все профили можно отнести к двум типам вод: тип I, температура  $16,2 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ , соленость  $35,6 \pm 0,1$  и тип II, температура  $12,9 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ , соленость  $35,2 \pm 0,1$ . Мы считаем, что первый тип вод образован теплыми и солеными водами течения Агульяс, которое несет в себе свойства Индийского океана, в то время как второй тип формируется холодными и пресными водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения. Однако оба типа вод были одновременно обнаружены внутри большинства вихрей, образовавшихся в Капской котловине (67%) (Guerra et al., 2022).

Таким образом, не только вихри течения Агульяс, но и вихри, непосредственно образующиеся в Капской котловине, переносят воды Агульяс переноса в Атлантический океан (рис.3.6). Они играют важную роль в межконтинентальном переносе тепла, соли и массы. Взаимодействие вихрей Агульяс с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения является уникальным процессом и не встречается ни в одной другой крупной системе восточных пограничных течений.

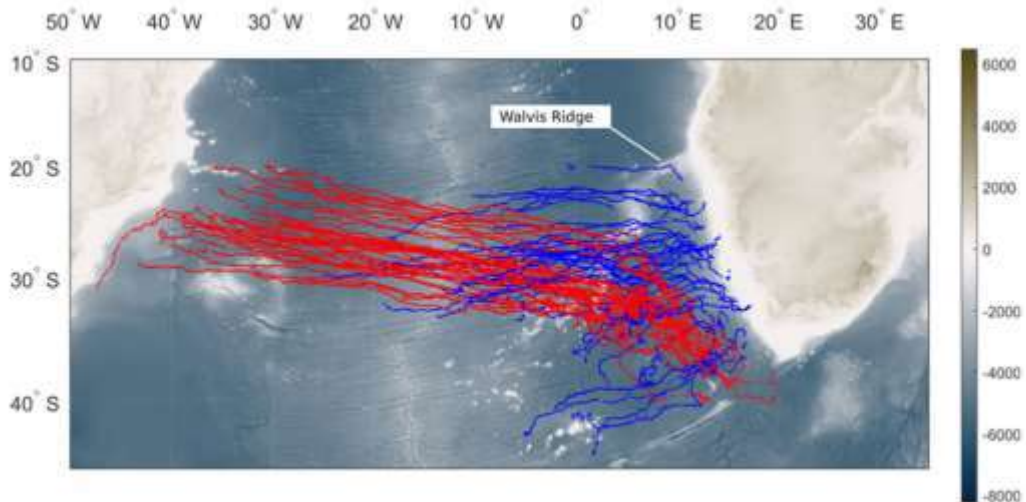


Рисунок 3.6. Треки 40 долгоживущих антициклонов (красный) и 40 долгоживущих циклонов (синий), идентифицированных МЕТА3.2 за 1993-2021 гг. Цветовая шкала показывает глубину (м).

### 3.4.1. Статистический анализ вихрей

На основе данных МЕТА3.2 в исследуемом регионе (20-46° ю.ш., 0-24° в.д.) мы обнаружили 54 496 вихрей течения Агульяс за 1993-2017 гг., из которых 28018 циклонов и 26 478 антициклонов. Оказалось, что только антициклоны являются долгоживущими вихрями течения Агульяс, продолжительность жизни которых превышает год. Треки антициклонов Агульяса с периодом жизни > 2,5 года в Южной Атлантике были проанализированы в работе Гневывшева и др. (2021). Треки 40 долгоживущих отдельных антициклонов и 40 долгоживущих циклонов, идентифицированных методом автоматической идентификации, показаны на рис. 3.6. Видно, что вихри движутся на запад, но траектории антициклонов имеют тенденцию отклоняться к экватору, в то время как циклоны поворачивают на юг. Физические механизмы этого явления обсуждаются Гневывшевым и др. (Gnevyshev et al., 2021).

Мы разделяем рассматриваемую область на три зоны: (I) —34-45° ю.ш., 0-13° в.д.; (II) —34-45° ю.ш., 13-24° в.д.; (III)—20-34° ю.ш., 0-24° в.д. (рис. 3.7), учитывая различные места образования вихрей и обеспечивая статистический анализ для

каждой отдельной зоны. Мы рассматриваем только долгоживущие вихри со временем жизни  $> 60$  дней.

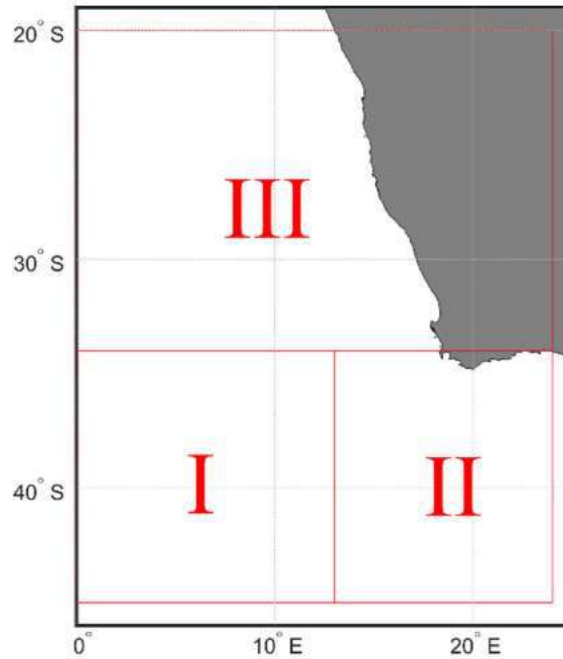


Рисунок 3.7. Рассматриваемые зоны.

Обратите внимание, что вихри в выбранных трех зонах различаются по механизмам их образования. В зоне I, расположенной в юго-западной части региона, вихри генерируются за счет баротропной и бароклинной неустойчивости ветвей Южно-Атлантического круговорота. Места образования и диссипации вихрей ограничены в основном границами района. В зоне II, расположенной в юго-восточной части региона, вихри образуются за счет распада и разрушения рингов Агульяса и относятся к Агульясову переносу. Траектории этих вихрей значительно длиннее, чем траектории вихрей в зоне I и простираются на северо-запад. Наконец, зона III расположена в северо-западной части региона. Траектории генерируемых там вихрей направлены в основном на запад. Эти вихри обладают термохалинными свойствами вод Индийского океана из-за смешения вод с водами Агульясова переноса. На рисунке 3.8 показаны основные характеристики этих групп вихрей. Обратите внимание, что зональное смещение вихрей и, соответственно, зональная составляющая скорости доминируют, чему способствует влияние  $\beta$ -эффекта. Вихри распространяются почти прямолинейно. Под влиянием рельефа, особенно при пересечении Китового хребта, траектории вихрей меняют азимут распространения,

после чего вихри снова распространяются прямолинейно. Мы также отмечаем тенденцию смещения антициклонов к экватору, а циклонов – к полюсу. Данный эффект, показанный на рис. 3.6, более подробно рассмотрен в работе Гневывшева и др. (2021).

Количество антициклонов ( $A_c$ ) и циклонов ( $C_{yc}$ ) в трех зонах за период с 31.05.2009 по 30.05.2020 гг. приведены в таблице 3.3. Далее мы проводим для них статистический анализ.

Таблица 3.3. Количество ( $N$ ) антициклонов ( $A_c$ ) и циклонов ( $C_{yc}$ ) со сроком жизни  $> 60$  дней в зонах I-III с площадями  $S$  и соотношением количества  $N$  к площадям  $S$  (см. рис. 3.7)

Площадь ( $S$ , км <sup>2</sup> ) зон I-III	$N$ ( $A_c$ )	$N \setminus S$ ( $A_c$ ) $\times 10^{-4}$	$N$ ( $C_{yc}$ )	$N \setminus S$ ( $C_{yc}$ ) $\times 10^{-4}$
I ( $1356 \times 10^3$ )	259	1.91003	267	1.96903
II ( $1147.3 \times 10^3$ )	159	1.38586	156	1.35971
III ( $2468.1 \times 10^3$ )	390	1.58016	424	1.71792

Обратите внимание, что в зоне III наблюдается наибольшее количество как отдельных  $A_c$ , так и  $C_{yc}$ . Однако площадь зоны III превышает площади зон I и II. Наибольшее количество вихрей на единицу площади приходится на зону I, где происходит взаимодействие вод Южно- Атлантического круговорота с водами Агульяса.

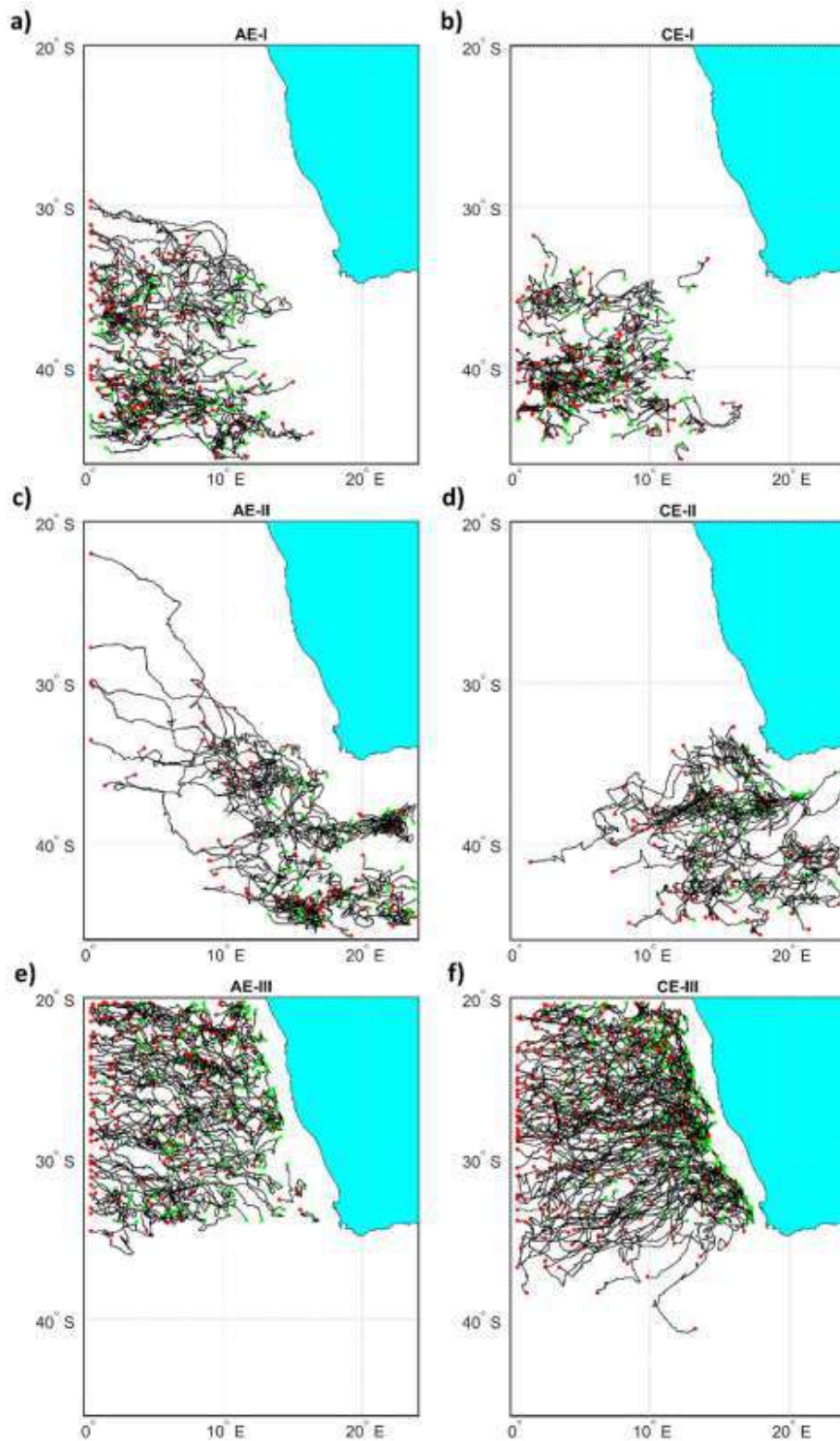


Рисунок 3.8. Траектории отдельных вихрей для зон I (a, b), II (c, d) и III (e, f). Антициклоны показаны слева, а циклоны – справа. Места образования вихрей показаны зелеными точками, а места диссипации вихрей - красными. Учитываются только вихри со сроком жизни более 60 дней.

Поскольку AMEDA позволяет обнаруживать центры вихрей и их характерные контуры, а также динамические особенности, связанные с вихрями, мы можем оценить интегральную площадь ( $\text{км}^2$ ) контуров вихрей. Используя алгоритм AMEDA, мы получаем распределение различных характеристик вихрей, генерируемых в зонах I–III. На рис. 3.9 мы рассматриваем контуры отдельных вихрей с временным шагом используемых данных, т.е. одни сутки данных реанализа GLORYS12V1. Контур - это ежедневное изображение вихря. Если вихрь живет 100 дней, то у нас есть 100 контуров, а если существует 10 вихрей со сроком жизни 100 дней, то у нас есть 1000 контуров. Далее мы оцениваем площадь вихревого контура. Рисунок 3.9 показывает, что интегральная площадь для  $A_c$  намного больше, чем интегральная площадь  $S_{us}$ , несмотря на то, что количество отдельных  $S_{us}$  со сроком жизни более 60 дней превышает количество долгоживущих  $A_c$ . Таким образом, количество контуров  $A_c$  значительно превышает количество контуров  $S_{us}$ , следовательно, интегральная площадь контуров  $A_c$  больше, чем интегральная площадь контуров  $S_{us}$ .

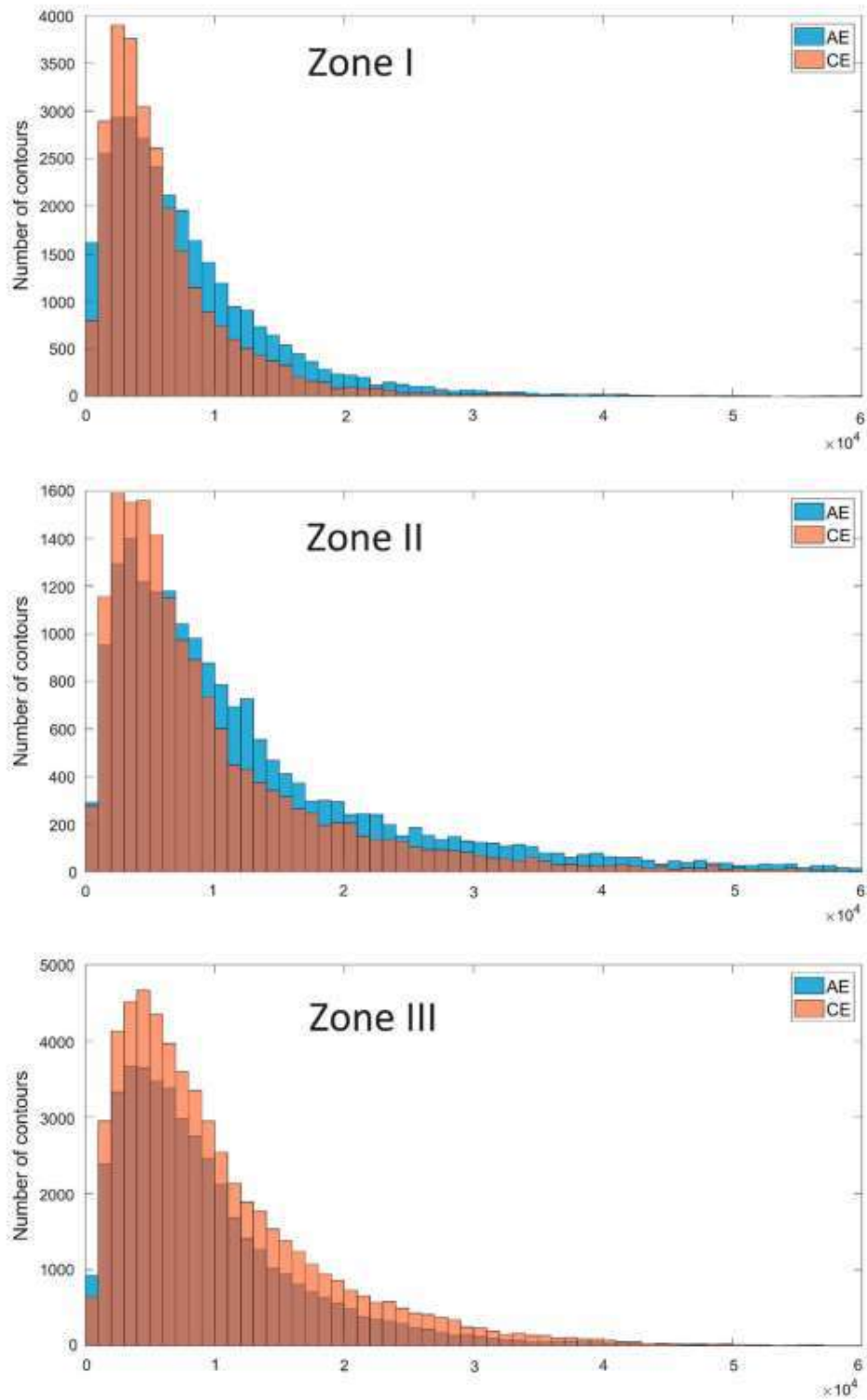


Рисунок 3.9. Распределение интегральной площади ( $\text{km}^2$ ) контуров вихрей для  $A_c$  и  $C_{uc}$  в зонах I–III. Темно-коричневый цвет соответствует наложению светлорычного (для  $C_{uc}$ ) на синий (для  $A_c$ ).

Другие характеристики вихрей в зонах I–III показаны на рисунках 3.10–3.15. Масштабы (диаметры)  $A_c$  в зоне I немного больше, чем у  $C_{uc}$ , но в целом масштабы

$A_c$  и  $C_{uc}$  сопоставимы. Радиусы большинства контуров вихрей составляют 40-50 км (см. рис. 3.10).

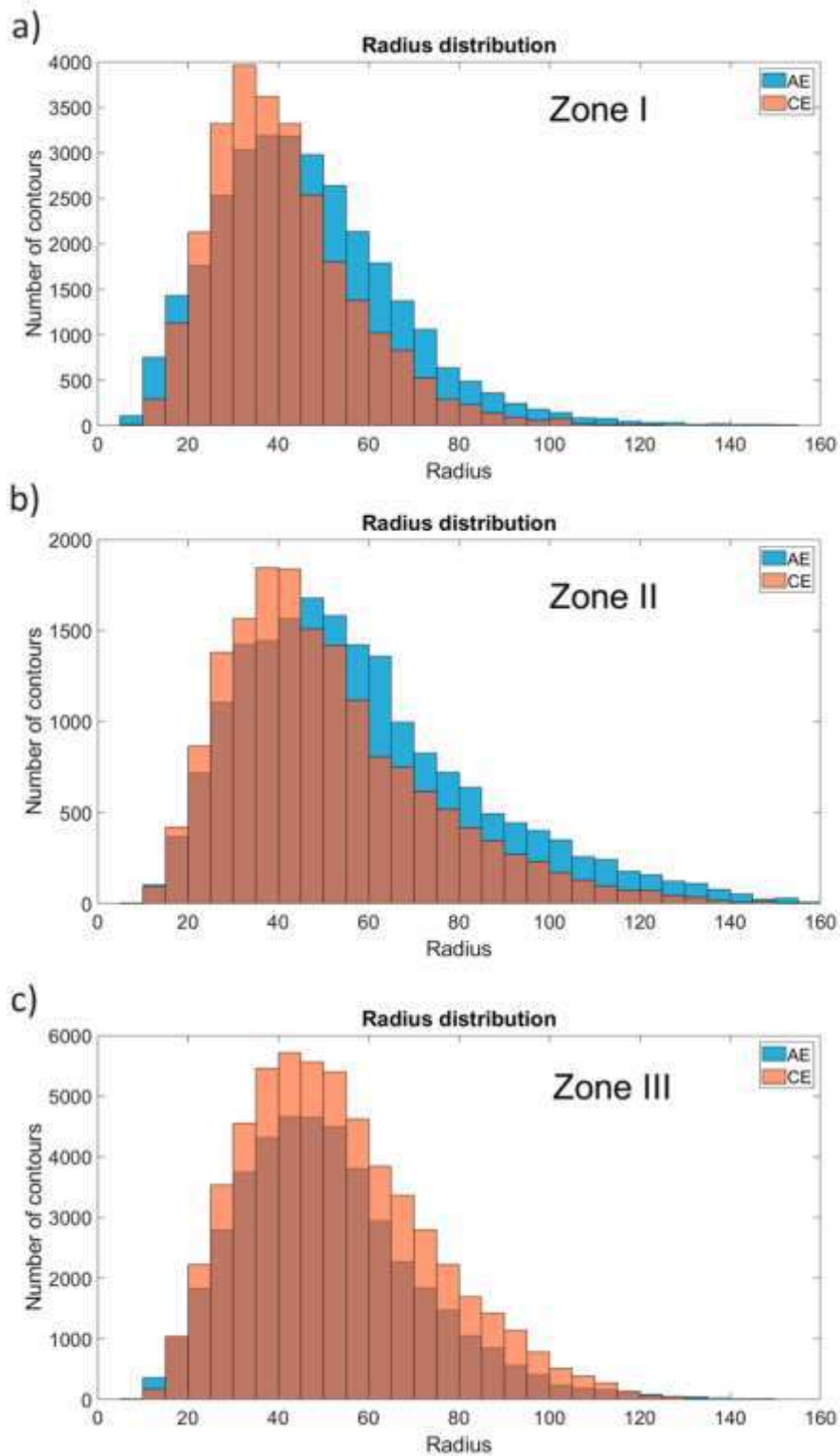


Рисунок 3.10. Распределение радиусов вихрей (км) для  $A_c$  (синий) и  $C_{uc}$  (светло-коричневый).



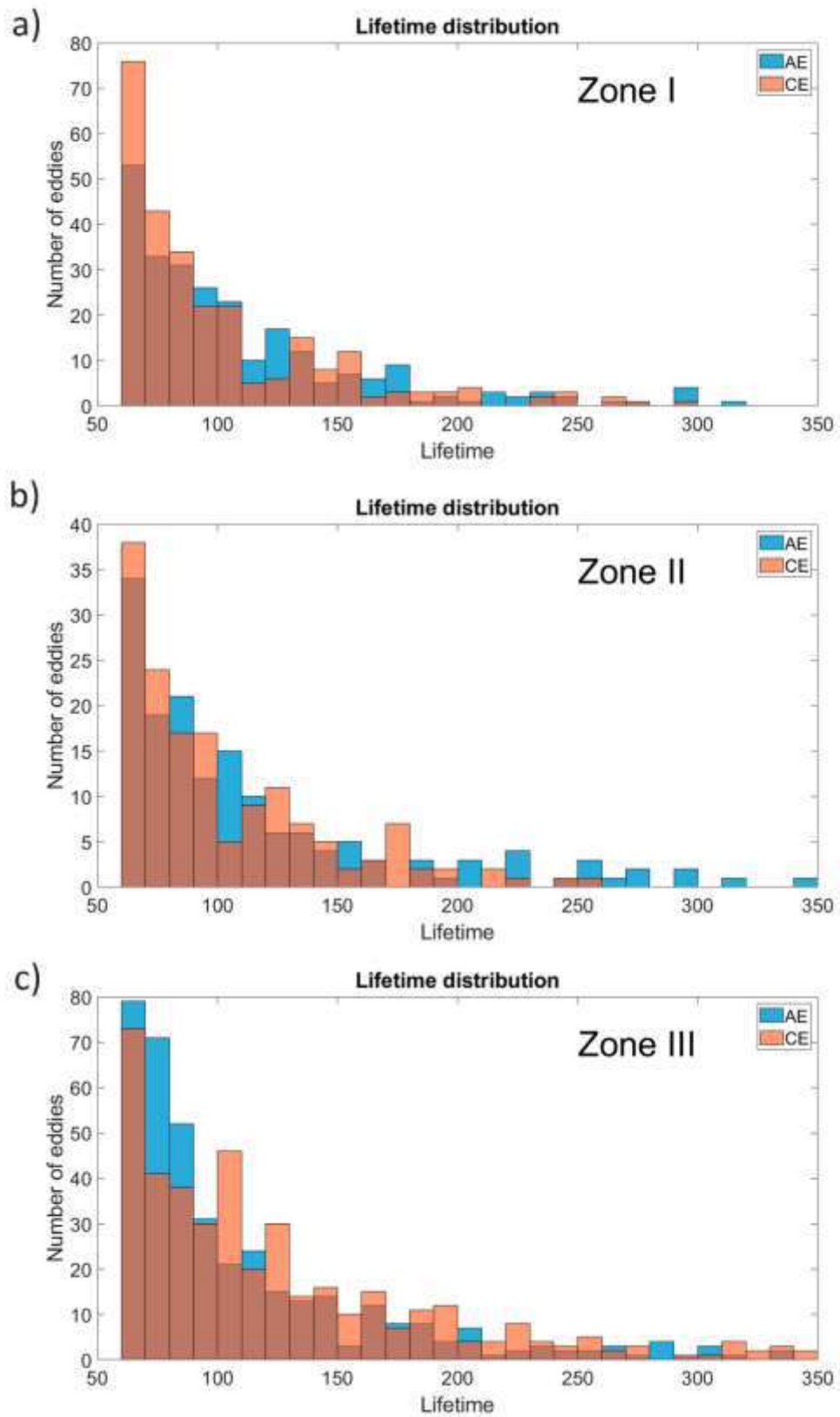


Рисунок 3.11. Распределение времени жизни (дни) для  $A_c$  (синий) и  $S_{uc}$  (светло-коричневый).

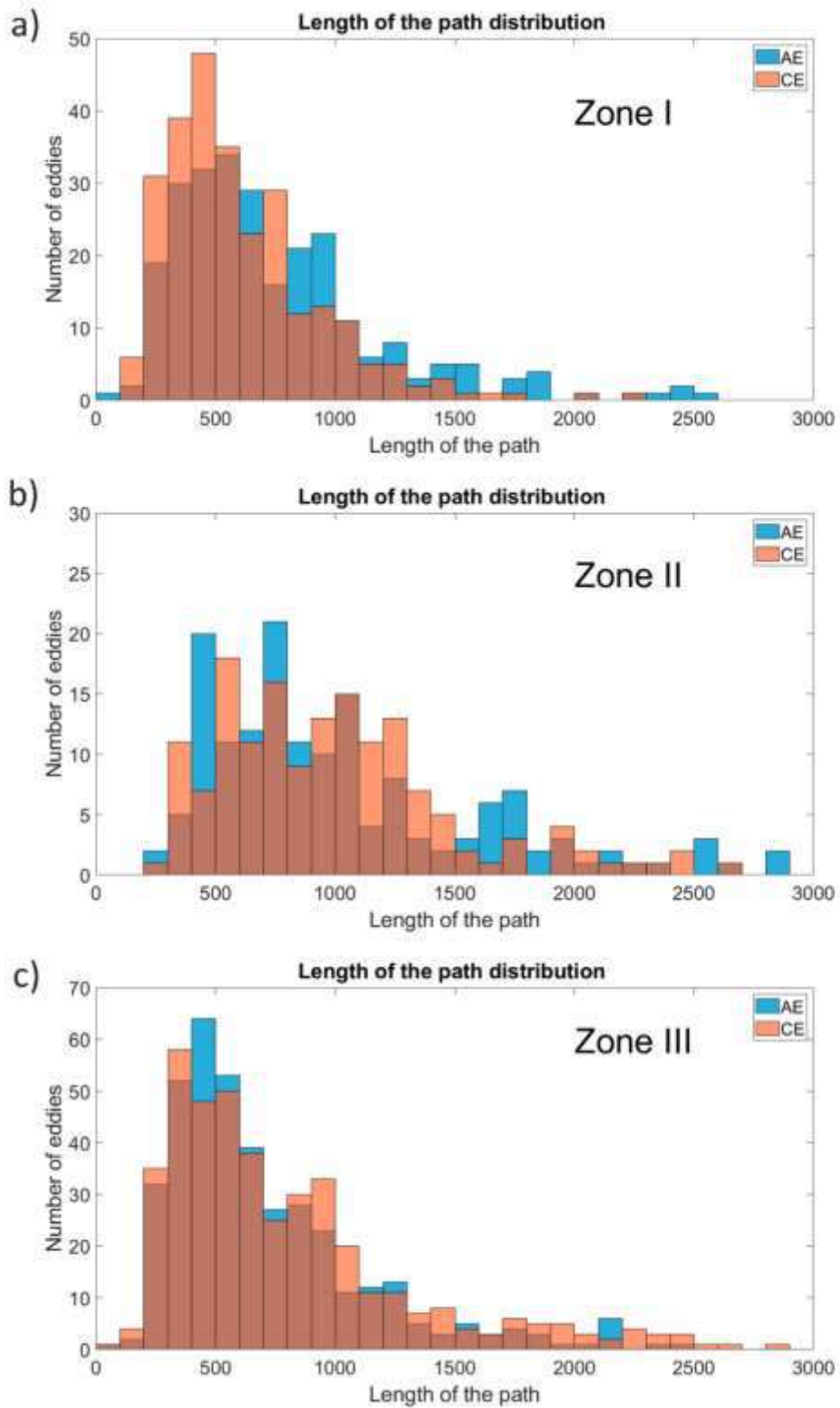


Рисунок 3.12. Распределение длины пути отдельных вихрей (км) для  $A_c$  (синий) и  $C_{uc}$  (светло-коричневый).

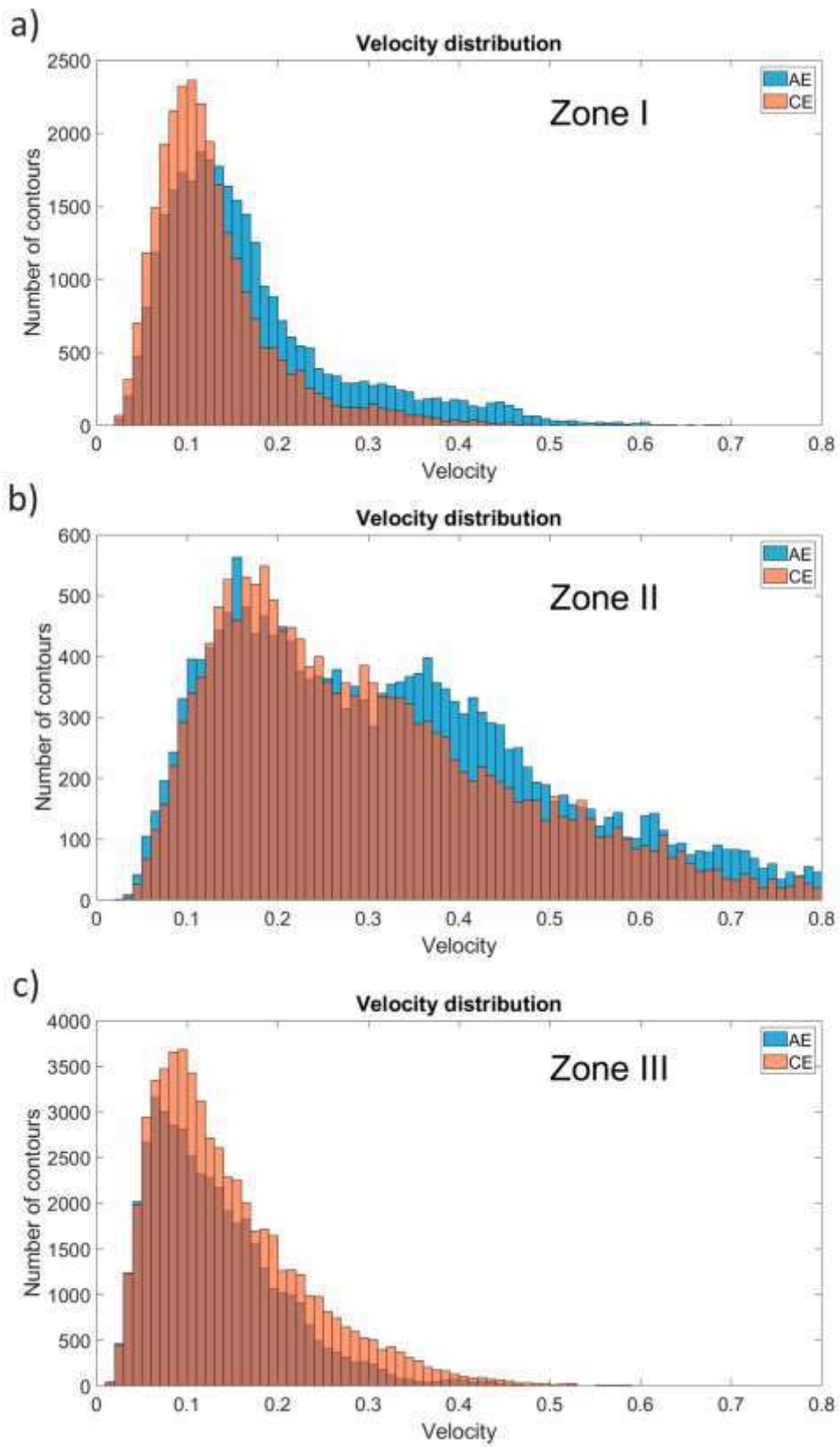


Рисунок 3.13. Распределение орбитальной скорости (м/с) для  $A_c$  (синий) и  $C_{uc}$  (светло-коричневый).

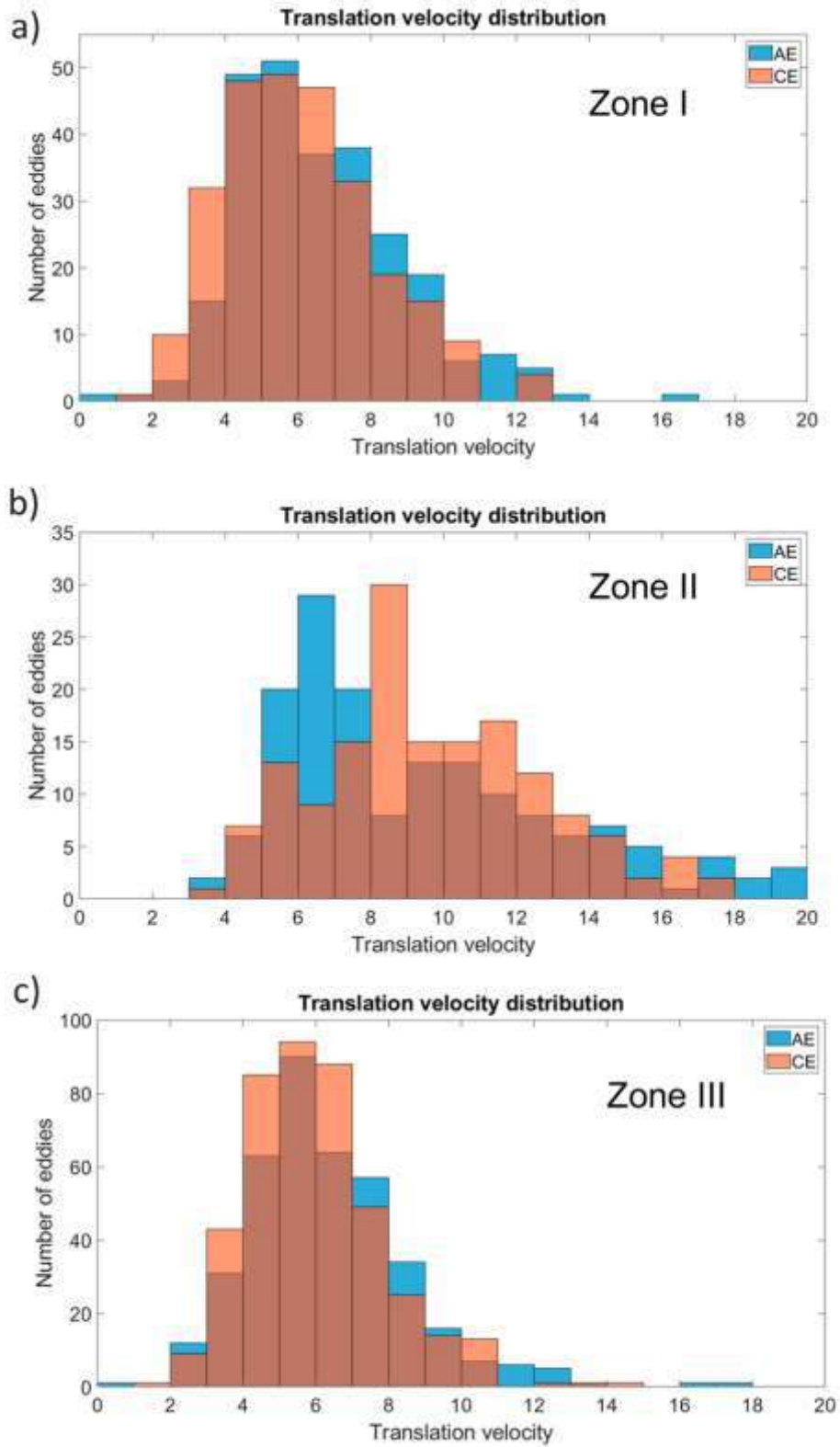


Рисунок 3.14. Распределение скорости дрейфа (км/день) для  $A_c$  (синий) и  $C_{uc}$  (светло-коричневый).

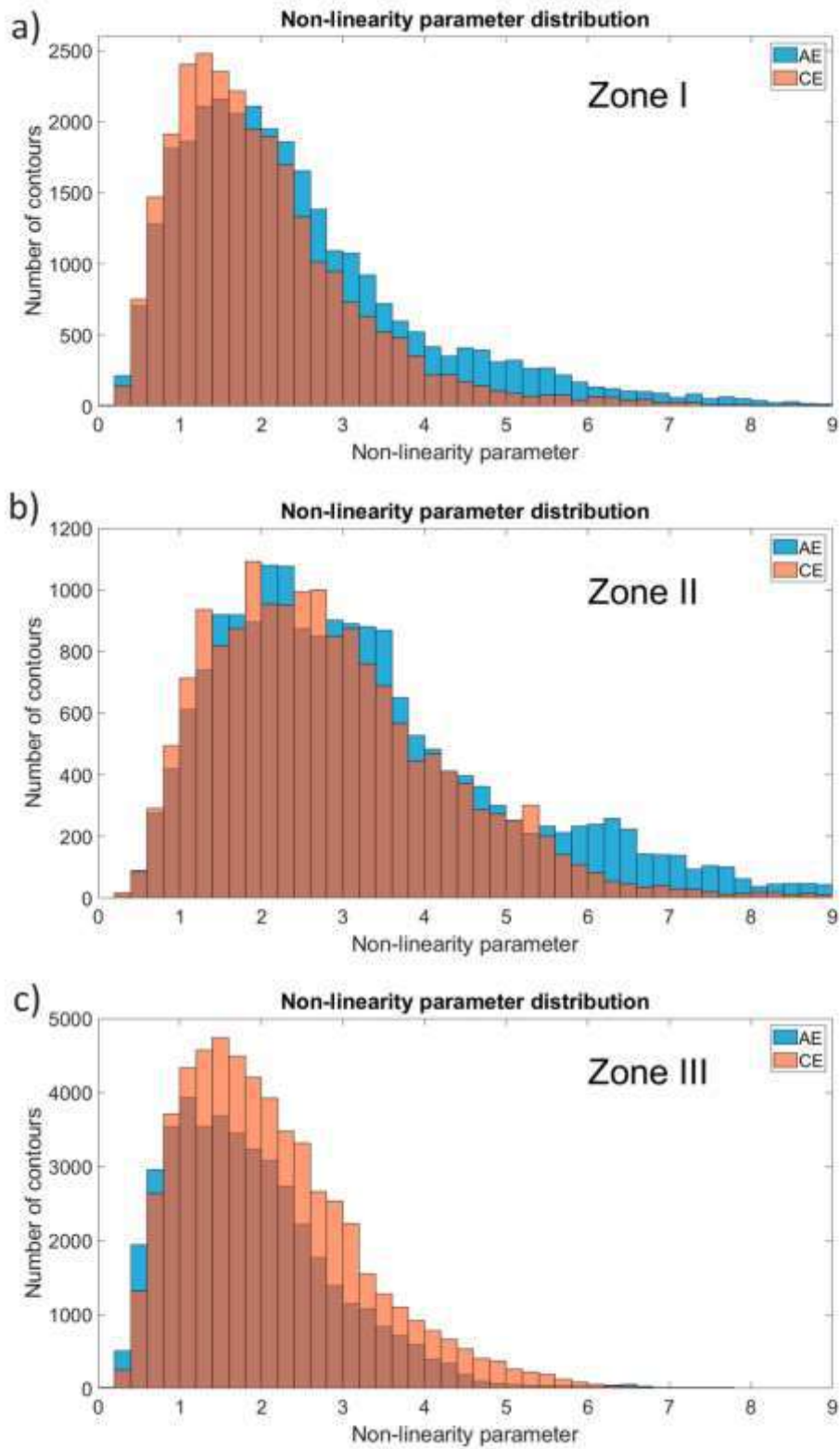


Рисунок 3.15. Распределение параметра нелинейности для  $A_c$  (синий) и  $S_{uc}$  (светло-коричневый).

Распределение времени жизни вихрей подтверждает, что *Ac* являются более долгоживущими, чем *Cuc*. Обратите внимание, что мы рассматривали время жизни вихрей только в пределах рассматриваемых зон. Большинство вихрей, расположенных в этих зонах, имеют продолжительность жизни менее 100 дней. Однако некоторые вихри в зонах II и III имеют продолжительность жизни более 500 дней (рис. 3.11). Соответственно, эти отдельные вихри имеют наибольшую длину пути (рис. 3.12). Средние орбитальные скорости варьируются в основном от 0,05 до 0,5 м/с как для *Ac*, так и для *Cuc*. Однако средние орбитальные скорости выше в зоне II, где образуется много вихрей за счет разрушения крупных рингов Агульяса (рис. 3.13). Скорости дрейфа составляют 3-13 км/сут (3-15 см/с) как для *Ac*, так и для *Cuc*. Скорости дрейфа *Ac* немного больше, чем *Cuc* во всех трех зонах (рис. 3.14). Наконец, распределение параметра нелинейности (отношение орбитальной скорости вихря к скорости его движения) демонстрирует значительную нелинейность вихрей (рис. 3.15).

### 3.4.2. Лагранжев анализ частиц воды

На основе данных реанализа GLORYS12V1, мы проводим лагранжевый анализ частиц воды. Мы рассматриваем регион, ограниченный  $20^{\circ}$ - $46^{\circ}$  ю.ш.,  $0^{\circ}$ - $24^{\circ}$  в.д., который включает Капскую котловину. Для построения лагранжевых карт была выбрана глубина 266 м. Выбор такой глубины позволяет исключить влияние ветра и других поверхностных эффектов, но в то же время эта глубина позволяет идентифицировать ядра мезомасштабных вихрей, расположенных в слое 150-800 м (Малышева и др., 2022; Сандалюк и Белоненко, 2021). Мы проанализировали 7 видов ежедневных Лагранжевых карт за период с мая 2010 года по апрель 2020. Далее мы рассмотрим основные лагранжевы показатели, рассчитанные для рассматриваемого региона. Ниже мы приводим некоторые Лагранжевы карты только для определенных дат.

На рисунке 3.16 показана карта движения частиц (S-карта) на 4.09.2013. Метод Лагранжева моделирования идентифицирует множество циклонов и антициклонов в рассматриваемом регионе на текущую дату. Те вихри, которые характеризуются большими длинами траекторий частиц, выделены черным цветом.



Эти частицы вращаются относительно центров вихрей со значительными орбитальными скоростями. Другими словами, большая длина траектории (и черный цвет точек) соответствует частицам, которые вращаются в вихре или переносятся струйным потоком. Согласно шкале, максимальный насыщенный черный цвет соответствует длине траектории в 700 км. На рисунке 3.16 показана группа вихрей, главным образом антициклонов, которые распространяются от южной оконечности Африки в северо-западном направлении. Это является проявлением Агульясова переноса на представленной S-карте.

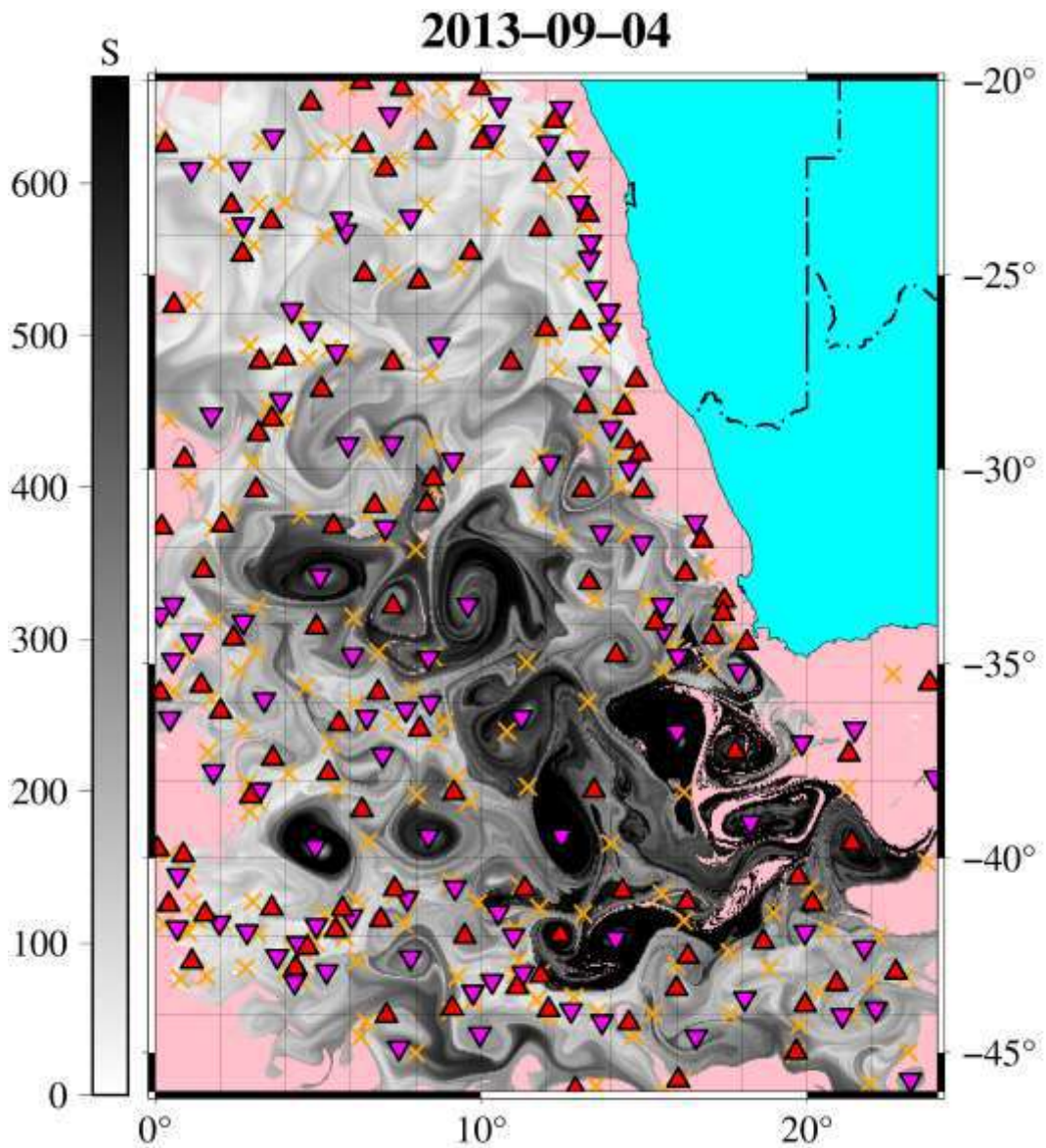


Рисунок 3.16. Карта движения частиц (Лагранжева S-карта) на 4.09.2013 г. на глубине 266 м. Черный цвет соответствует длине траектории, которую прошла каждая точка (частица воды) в км в течение 30 дней от даты, указанной в названии.

Розовый цвет соответствует точкам, принадлежащим к одному из двух типов вод: первые - это те точки, которые касались маски берега (или контура шельфа), а вторые - это те точки, которые в прошлом достигали границ бокса. Треугольники представляют эллиптические точки: красные треугольники представляют центры циклонов, показанные треугольником с вершиной наверху, а малиновые треугольники представляют центры антициклонов, показанные треугольником с вершиной внизу. Оранжевые крестики показывают гиперболические точки, которые являются точками неустойчивости.

На рисунке 3.17 показана карта происхождения вод (О-карта) для рассматриваемого региона. Карта демонстрирует Лагранжевы частицы, которые распределены на глубине 266 м. Зеленый цвет соответствует частицам вод Агульсова переноса. Это группа частиц на западной стороне Африки, распространяющаяся на северо-запад. Это воды течения Агульяс, которые образовались в Индийском океане и затем пересекли границу  $24^\circ$  з.д. Желтый цвет характеризует частицы, которые пересекли  $46^\circ$  ю.ш. за последний год. Эти частицы могут принадлежать водам южной части Южно-Атлантического круговорота, где юго-восточные ветры вызывают течения, движущиеся на восток, которые трудно отделить от северной границы Антарктического циркумполярного течения. Мы видим, что влияние Антарктического циркумполярного течения ограничено южной частью региона. Красный цвет характеризует частицы, которые пересекли нулевой меридиан в течение последних 365 дней. Эти частицы прибыли с запада, и они могут происходить из вод Южно-Атлантического круговорота и влиять как на Агульсов перенос, так и на Бенгельское течение. Синий цвет относится к частицам вод Ангольского течения. На рисунке 3.17 показано, что Ангольское течение влияет только на северную часть региона. На рис. 3.17 также можно увидеть множество белых точек, распределенных по всей области. Они соответствуют частицам, которые за 1 год (обратно во времени) не смогли достичь ни одной из границ региона и береговой линии.



2013-09-13

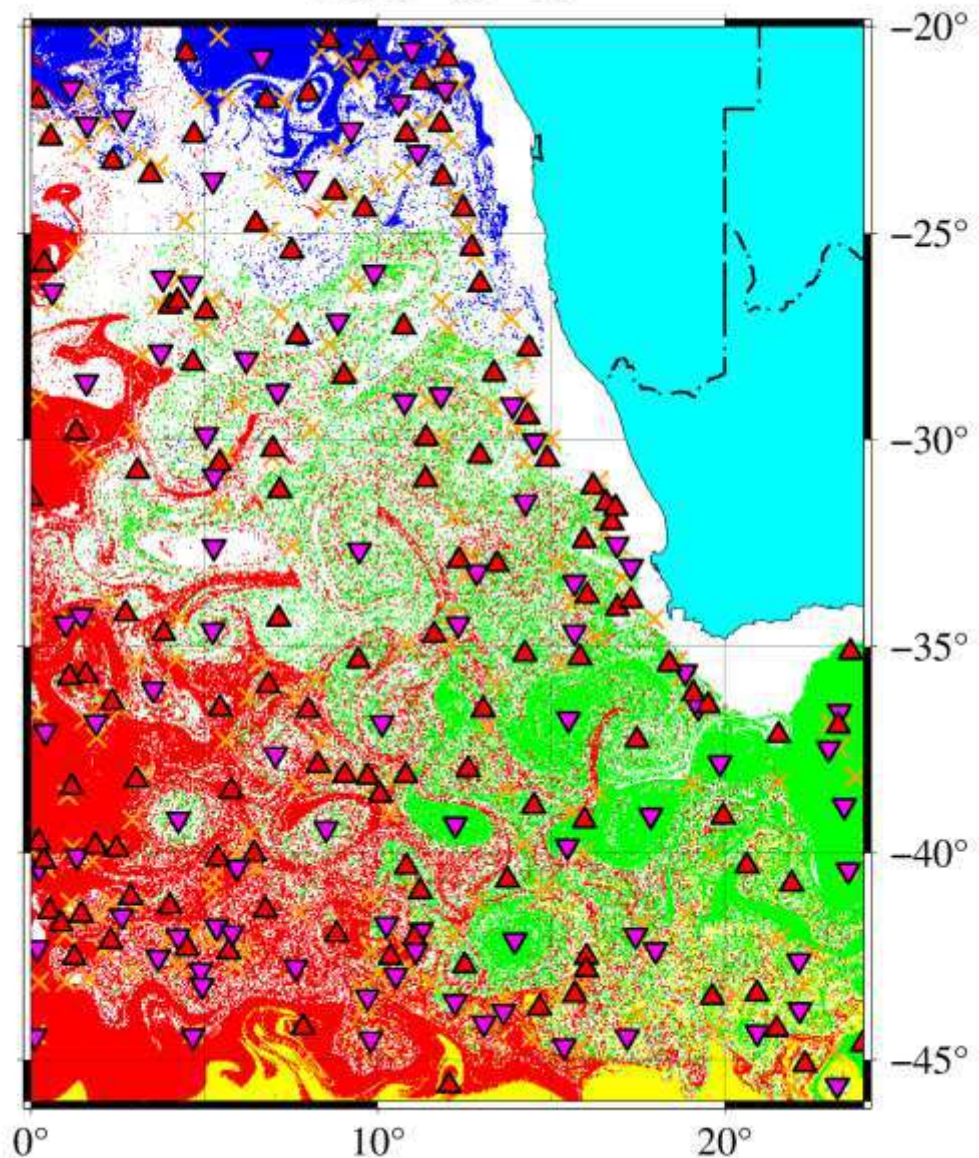


Рисунок 3.17. Карта происхождения водных масс (Лагранжева O-карта) на 13.09.2013 г., на глубине 266 м. Зеленым цветом окрашены частицы, которые пересекли меридиан 20° в.д. в течение 365 дней назад с указанной даты; желтым - частицы, которые пересекли 46° ю.ш. в течение года назад с указанной даты; красным - частицы, которые пересекли меридиан 0; синим - частицы, которые пересекли 20° ю.ш. Белый цвет - это маска шельфа от границ пересечения дна глубиной 266 м и береговой линии на поверхности, а также цвет частиц, которые не пересекли ни одну из границ бокса. Треугольники представляют эллиптические точки: красные треугольники представляют центры циклонов, показанные треугольником с вершиной вверху, а малиновые треугольники представляют центры

антициклонов, показанные треугольником с вершиной вниз. Оранжевые крестики показывают гиперболические точки, которые являются точками неустойчивости.

Рисунок 3.18 дополняет О-карту и показывает «возраст» частиц воды. Т-карта показывает период, когда частица пересекает одну из границ области. Согласно шкале, черный цвет характеризует частицы воды, которые пересекли границу региона 1-30 дней назад, серый - 100-200 дней назад, а белый - 200-365 дней назад с указанной даты. Это означает, что воды, выделенные черным цветом, являются «молодыми водами», которые недавно прибыли в регион. Белый же цвет, напротив, указывает на «старые воды». Видно, что большое количество частиц вод за прошедший год не покидали регион. На рисунке 3.18 показано, что «молодые воды», т.е. частицы с коротким временем пребывания в регионе, соответствуют основным элементам циркуляции, которыми являются Агульясов перенос, Антарктическое циркумполярное течение, Бенгельское течение и Ангольское течение. В то же время большое количество частиц в этой области не отличается какой-либо существенной подвижностью, на рис. 3.18 они окрашены белым цветом.

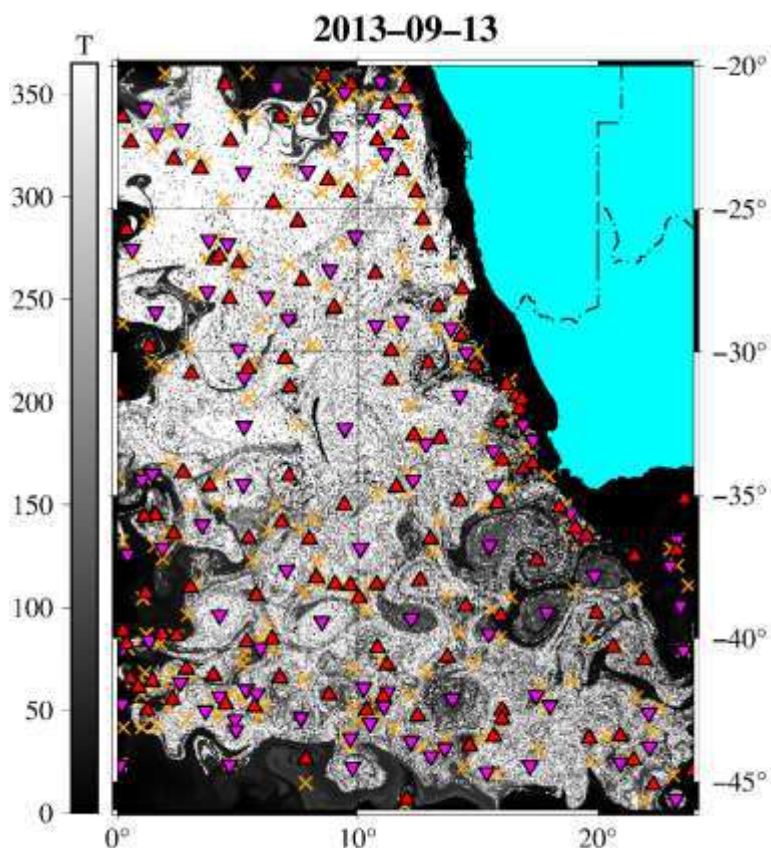


Рисунок 3.18. Карта "возраста" частиц (Лагранжева Т-карта) на 13.09.2013 г. на глубине 266 м. Цветом показан временной интервал между запуском частиц в

указанную дату и моментом, когда достигнута одна из границ области. Другими словами, цветовая шкала показывает время  $T$  достижения соответствующей границы региона в течение года назад с даты, указанной на каждом кадре/карте. Белым цветом окрашены частицы, которые находились в границах данного региона в течение года с указанной даты. Треугольники и крестики такие же, как на предыдущих рисунках.

На рисунках 3.19 и 3.20 показано зональное и меридиональное смещение частиц вод. Эти карты показывают, что основным и наиболее важным элементом циркуляции в рассматриваемом регионе является Агульясов перенос, но на него влияют воды, поступающие с запада. Частицы пересекают западную границу исследуемого региона и в течение года перемещаются на восток на расстояние, превышающее 2700 км, а затем смешиваются с другими частицами. В то же время другие частицы движутся в противоположном направлении на запад, преодолевая расстояние более 1100 км (рис. 3.19). Расстояние, пройденное частицами за год в северном направлении, превышает 2200 км и 1100 км - в южном (рис. 3.20). Таким образом, доминирующим направлением движения частиц, участвующих в перемешивании вод в выделенной области, является северо-восток.

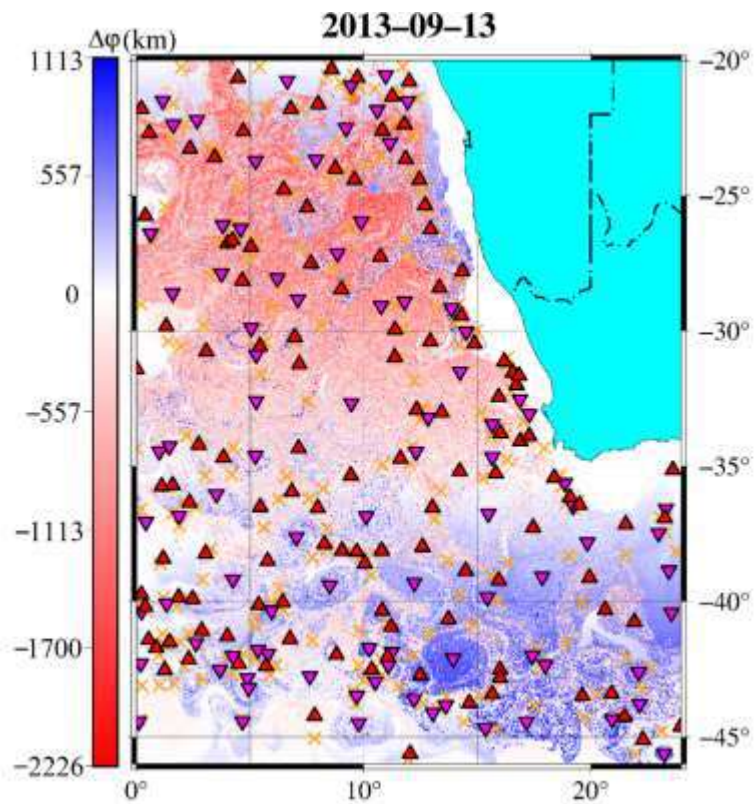


Рисунок 3.19. Зональное смещение частиц на 13.09.2013 г. на глубине 266 м. Шкала показывает зональное смещение (в км), которое представляет собой смещение



частиц воды на восток/запад в течение 365 дней с указанной даты. Красным цветом (отрицательные значения) выделены частицы вод, которые сместились на восток, а синим цветом (положительные значения) – частицы вод, сместившиеся на запад. Треугольники и крестики такие же, как на предыдущих рисунках.

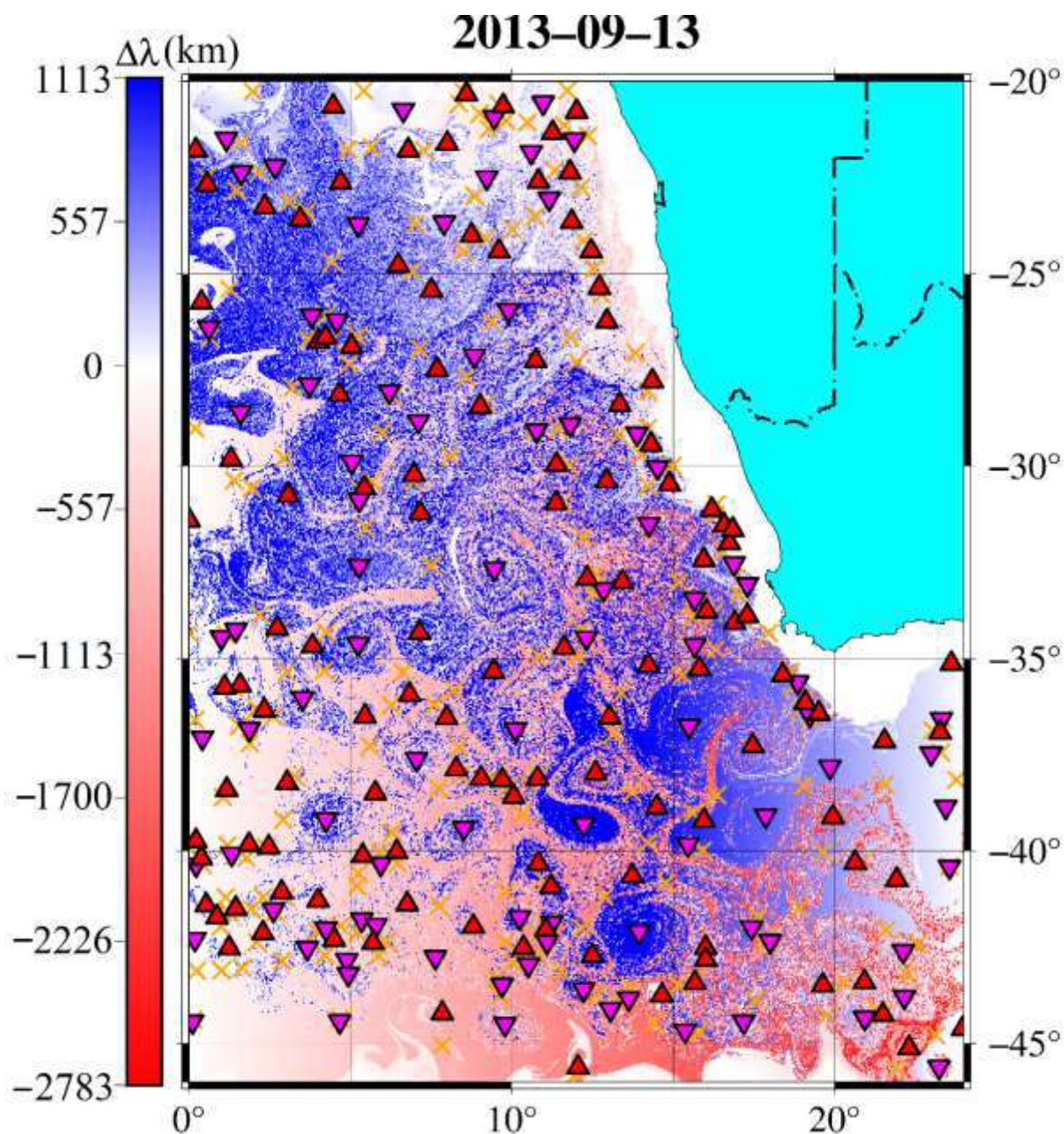


Рисунок 3.20. Меридиональное смещение частиц на 13.09.2013 г. на глубине 266 м. Шкала показывает меридиональное смещение (в км), которое представляет собой смещение частиц вод на север/юг в течение 365 дней с указанной даты. Красным цветом (отрицательные значения) выделены воды, которые сместились на север, а

синим цветом (положительные значения) - воды, сместившиеся на юг. Треугольники и крестики такие же, как на предыдущих рисунках.

Карта конечных широт - U-карта (рис. 3.21) - дополняет карту зонального смещения (рис. 3.19). Шкала указывает широту, на которой частицы воды пересекли нулевой меридиан с запада на восток. На рисунке 3.21 также показано, как далеко распространились частицы воды в восточном направлении. Видно, что частицы, пересекшие нулевой меридиан, распространяются почти зонально. Они проходят значительное расстояние на восток, распространяясь почти до восточной границы бассейна на широте 35-45° ю.ш. Эти частицы не проникают в ядра вихрей, но распространяются по их периферии.

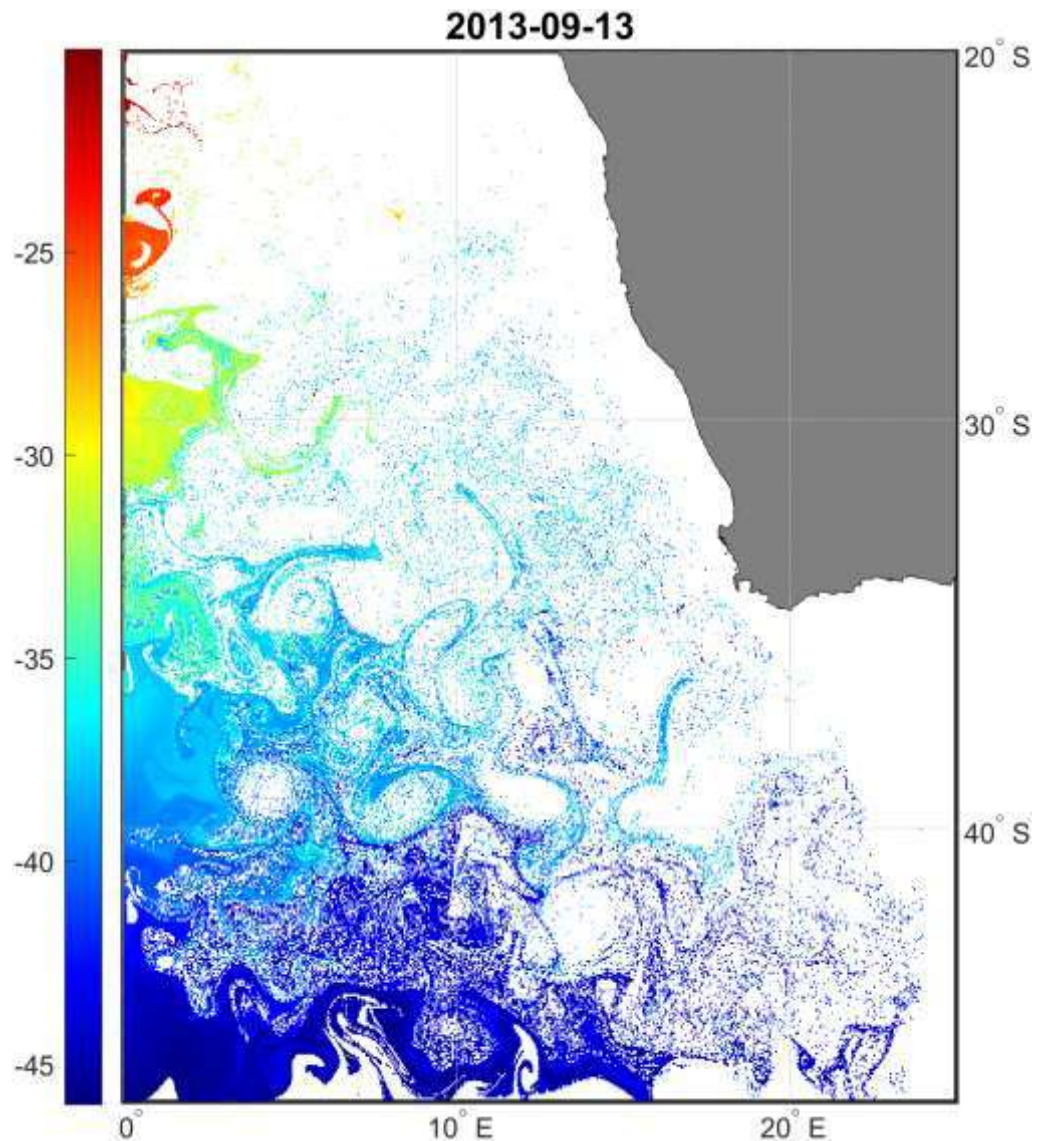


Рисунок 3.21. Карта широты, на которой частицы пересекли нулевой меридиан (Лагранжева U-карта) на 13.09.2013 г. на глубине 266 м. Цветом показано значение

широты, на которой точки (частицы) пересекают меридиан 0 в течение 365 дней с указанной даты.

Таким образом, анализ Лагранжевых карт (рис. 3.16-3.21) показывает, что вихри в исследуемом регионе интенсивно взаимодействуют с окружающими водами. Это означает, что вихри, образовавшиеся в результате разрушения рингов Агульяса, могут изменять свою термохалинную структуру, пока пребывают в Капской котловине. Здесь воды Агульяса смешиваются с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения, а термохалинные свойства вихрей Агульяса меняются, поскольку теплые и соленые воды Индийского океана смешиваются с более свежими и более холодными окружающими водами. Частицы вод Южной-Атлантического круговорота пересекают западную границу региона и перемещаются более чем на 500 км в восточном направлении, смешиваясь с другими частицами. Бенгельское течение на рис. 3.16 – 3.20 проявляется как линия вихрей, расположенная вдоль побережья Западной Африки.

На рисунке 3.22 представлено поле солёности на глубине 266 м. На этом рисунке можно увидеть визуальное проявление Агульясова переноса в виде красных пятен с повышенными значениями солёности воды. Распределение температуры в бассейне (не показано) аналогично распределению солёности. Эти красные пятна простираются от восточной границы бассейна на северо-запад. Расположение этих красных пятен соответствует положению вихрей на рис. 3.16. Эти вихри образуются в результате распада рингов Агульяса на вихри меньших масштабов. Видно, что воды Агульяса распространяются за пределы Китового хребта, практически до северной границы региона. Апвеллинг Бенгельского течения проявляется в прибрежной области. Процесс апвеллинга сопровождается образованием значительного числа мезомасштабных вихрей, как циклонов, так и антициклонов, вдоль границы береговой линии. Важно подчеркнуть, что эти вихри локально стабильны и наблюдаются на всех картах в течение рассматриваемого периода. Однако формирование вихрей из родительских рингов Агульяса происходит уже в Капской котловине (рис. 3.8).



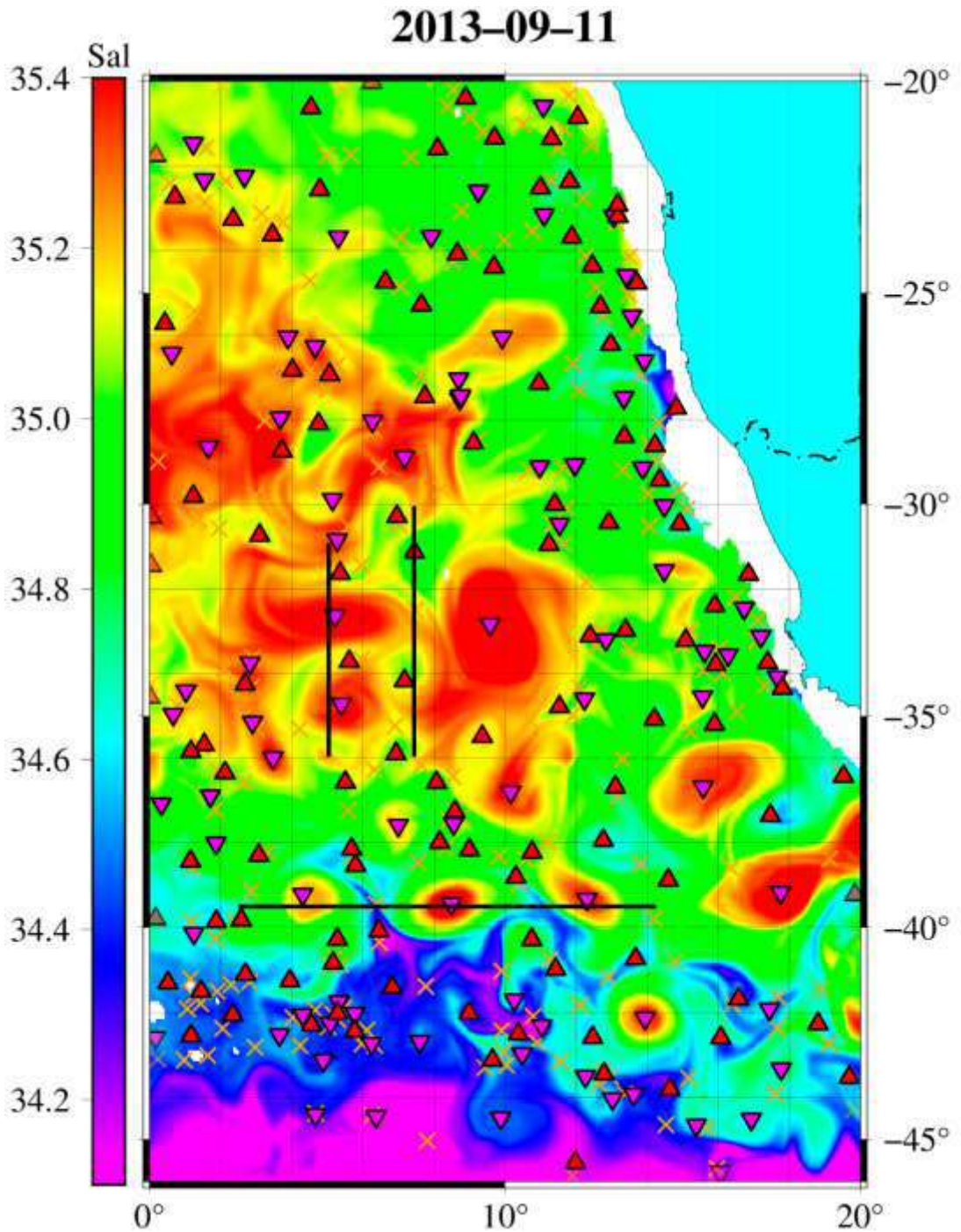


Рисунок 3.22. Поле солёности на 11.09.2013 г. на глубине 266 м. Разрезы, на которых построены вертикальные профили вихрей, обозначены черными линиями. Треугольники и крестики такие же, как на предыдущих рисунках.

Затем мы проанализировали вихри, отмеченные на рис.3.22 черными линиями. Зональный разрез длиной  $39,6^\circ$  ю.ш. проходит через центры трех *Ac* (рис. 3.23). Меридиональный разрез  $5^\circ$  з.д. проходит через центры двух *Ac* (рис. 3.24), а меридиональный разрез  $7,5^\circ$  з.д. проходит через центры двух *Sus* (рис. 3.25).

Обратите внимание, что эти вихри также проявляются на рис. 3.16 (S-карта), рис. 3.17 (O-карта) и рис. 3.18 (T-карта). Это еще раз подчеркивает, что воды в вихрях отличаются от окружающих вод как по происхождению, так и по свойствам. На рисунке 3.17 показано, что два рассматриваемых *Ac* и *Cuc* состоят в основном из частиц, окрашенных в зеленый цвет. Они соответствуют водам, прибывшим из Индийского океана, и принадлежат к Агульясову переносу. На рисунках 3.23 – 3.25 показаны вертикальные поперечные разрезы аномалий температуры и солёности. Аномалии оцениваются относительно средних климатических полей на основе данных GLORYS12V1 за 1993-2021 годы. Видно, что аномалии температуры и солёности в вихрях достигают  $\pm 4^\circ\text{C}$  и  $\pm 0,5\text{--}0,6$  psu соответственно.

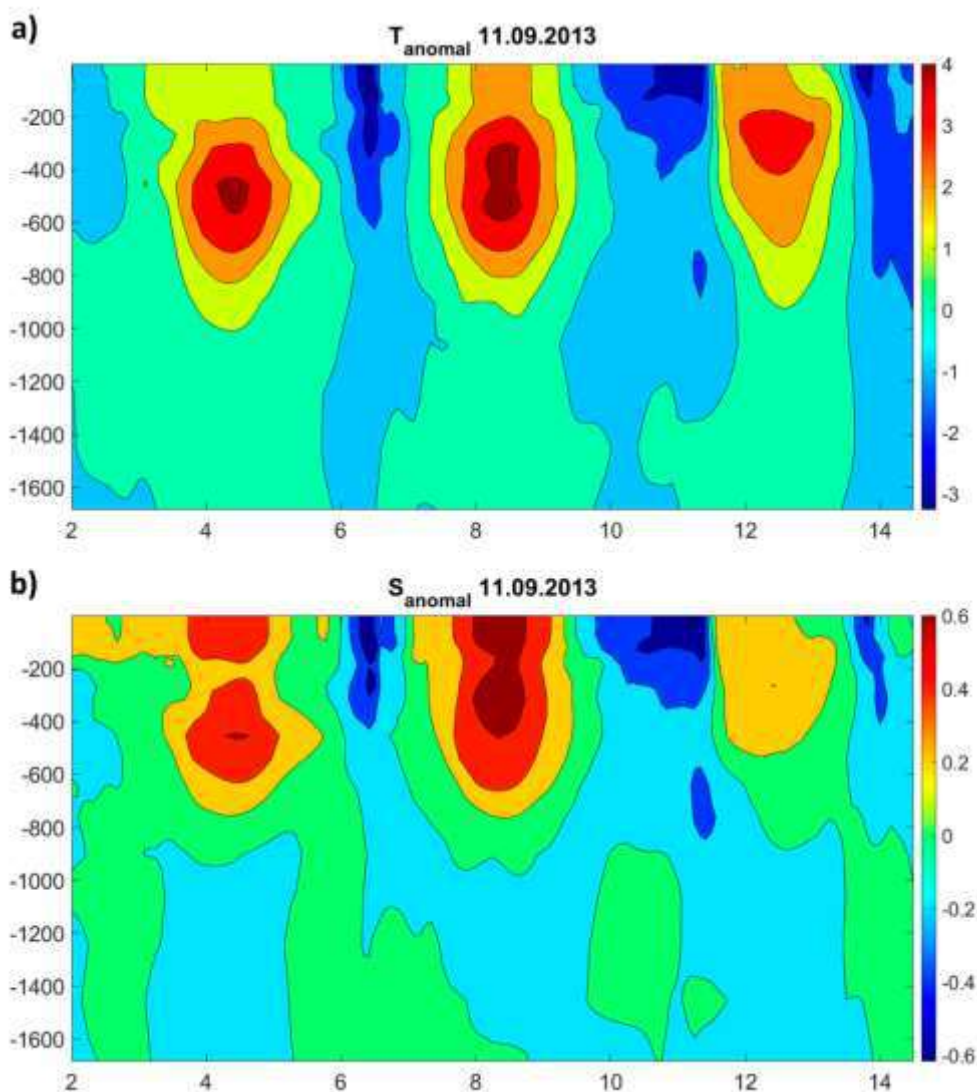


Рисунок 3.23. Зональный вертикальный разрез аномалий температуры ( $^\circ\text{C}$ ) и солёности для трех *Ac* на  $39,6^\circ$  ю.ш. 11.09.2013 г.



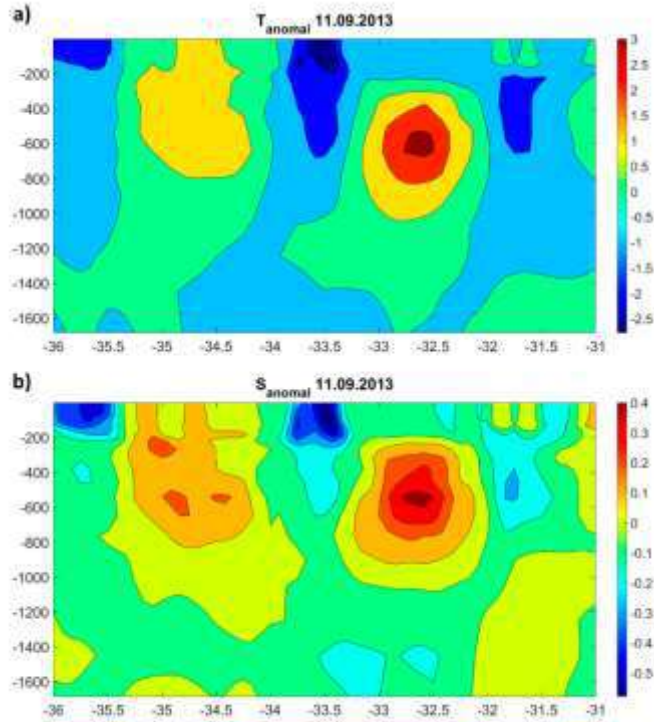


Рисунок 3.24. Меридиональный вертикальный разрез аномалий температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солёности для двух Ас на  $5^{\circ}$  в.д. 11.09.2013 г.

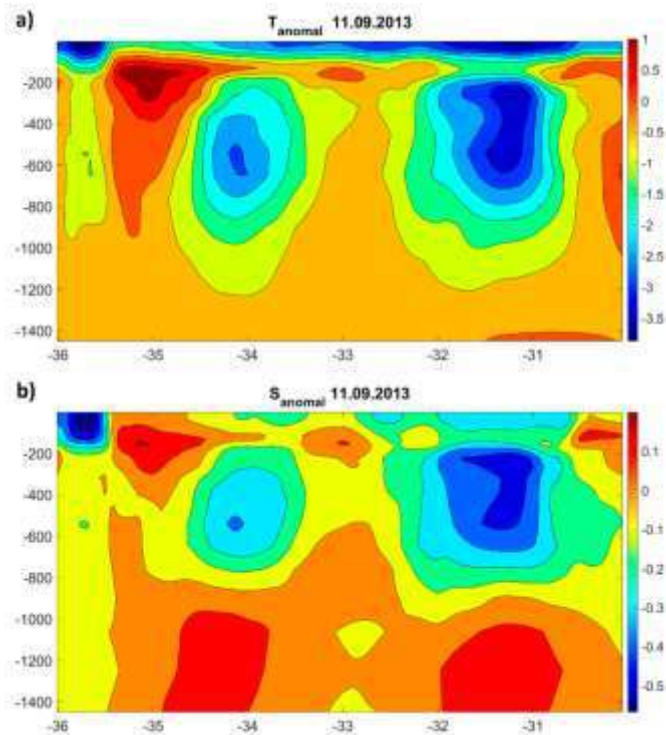


Рисунок 3.25. Меридиональный вертикальный разрез аномалий температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солёности для двух Сус на  $7,5^{\circ}$  в.д. 11.09.2013 г.

#### ГЛАВА 4. МЕРИДИОНАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ ВИХРЕЙ АГУЛЬЯСА

Анализ альтиметрических карт SLA (Sea Level Anomalies) показывает устойчивое распространение на запад мезомасштабных вихрей в Мировом океане (Malysheva et al., 2020), что объясняется существованием планетарных волн Россби. Однако несколько исследователей одновременно заметили, что при переносе вихрей происходит значительное меридиональное смещение, при этом циклоны имеют тенденцию перемещаться к полюсу, а антициклоны к экватору (см., например, Cushman-Roisin, 1994, Early et al., 2011). Chelton (2011) и Morrow (2004) полагают, что это смещение можно объяснить изменением градиента потенциальной завихренности средним потоком с вертикальным сдвигом. Они предполагают, что смещение крупных вихрей к экватору вызывает сферическая геометрия Земли. Другое объяснение - большая нелинейность вихрей. Каменкович и др. (1996) отмечают, что вихри Агульяс нелинейны с числом Россби  $Ro < 0,1$ . Из-за своей нелинейности вихри имеют меридиональный компонент скорости перемещения, поэтому в Южном полушарии антициклонические вихри имеют тенденцию перемещаться на северо-запад, в отличие от циклонов, которые перемещаются на юго-запад. Несмотря на свою важность, проблема влияния нелинейности на движущиеся вихри изучена недостаточно.

Мы полагаем, что оба приведенных выше объяснения меридионального смещения западного распространения вихрей в океане не раскрывают сути явления. Основная цель данной части работы - сравнить существующие теоретические подходы к этому явлению на основе карт альтиметрии Южной Атлантики. Наш главный интерес - меридиональное смещение вихрей Агульяс.

Для анализа смещения вихрей мы рассматриваем только долгоживущие вихри течения Агульяс, продолжительность жизни которых превышает 2,5 года. Оказалось, что только антициклоны удовлетворяют данному критерию, так как все образовавшиеся циклоны диссипируют в течение первого года после своей генерации, то есть циклоны являются гораздо менее устойчивыми по сравнению с антициклонами. Этому факту дано объяснение в работе Незлина (1986) в терминах циклон-антициклонной асимметрии. Он объясняет большую устойчивость антициклонов по сравнению с циклонами тем, что у циклона ротор скорости

параллелен вектору скорости вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен. Это означает, что в уравнении сохранения потенциального вихря скалярная нелинейность может уравновесить дисперсию только в случае антициклона. У циклона же дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы. Таким образом, наблюдаемая циклон-антициклонная асимметрия является прямым следствием скалярной нелинейности и весьма принципиальным дисперсионно-нелинейным свойством вихрей Россби.

Наличие циклон-антициклонной асимметрии в законах сохранения в существенной мере определяет возможность (или невозможность) формирования уединенных вихрей различной полярности. Это означает, что если существует «скалярный» солитон Россби (уединенная волна, в которой дисперсионное расплывание скомпенсировано укрупнением, обусловленным скалярной нелинейностью), то он может быть только антициклоном, т. е. только солитоном возвышения, как и классический солитон Рассела. Согласно Незлину (1986), для исследования вихрей в океане более информативным является волновой подход, так как именно он позволяет просто объяснить такое принципиальное явление, как циклон-антициклонная асимметрия.

Таким образом, согласно Незлину, антициклоны в океане являются вихрями Россби (солитонами Россби), а его свойства (размеры, направление и скорость дрейфа) хорошо предсказываются и описываются на основе волновых представлений, согласно которым этот вихрь — результат взаимного уравновешивания дисперсии и нелинейности. Следовательно, солитон Россби — это объект, проявляющий явный дуализм, и поэтому часто возникающий вопрос: «Это вихрь или волна?», очевидно, ставится не вполне корректно. Такой объект с одинаковым успехом можно называть либо волновым уединенным (т. е. нерасплывающимся) вихрем, либо вихревым солитоном — в зависимости от того, какие его свойства рассматриваются.

Все сказанное дает понимание, почему для исследования долгоживущих вихрей Агульяса мы анализируем только антициклоны. Согласно Незлину (1986), эти антициклоны мы также можем называть вихрями Россби (или солитонами Россби) Южной Атлантики.

Таким образом, основной целью данной части работы является анализ распространяющихся в Южной Атлантике долгоживущих антициклонов.

#### 4.1. Анализ треков вихрей Агульяса

За 1993-2017 гг. метод автоматической идентификации выделяет 54496 вихрей течения Агульяс, из которых 28018 циклонов и 26478 антициклонов. Район исследования представлен на рисунке 4.1. Видно, что скорости течений в центральной части региона невелики и направлены преимущественно на северо-запад.

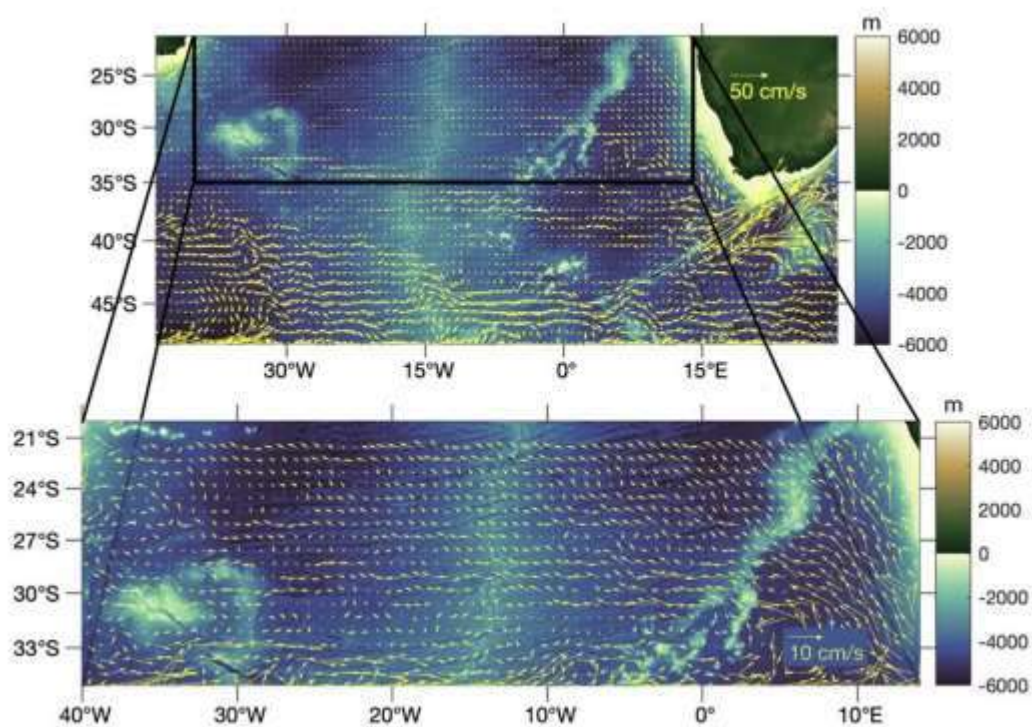


Рисунок 4.1. Район исследования. Цветовая шкала показывает глубину (м). Стрелками показаны векторы скоростей течений, рассчитанные по данным альтиметрии.

Общее количество вихрей, идентифицированных в каждой ячейке  $3,0^\circ \times 3,0^\circ$ , показано на рисунке 4.2а. Видно, что большее количество вихрей имеет топографическую природу и приурочены к основным топографическим образованиям. Однако большинство вихрей имеют непродолжительный период

жизни и быстро диссипируют. В нашей работе для исследования выбирались вихри с продолжительностью жизни от 2,5 лет. За этот промежуток вихрь успевает преодолеть значительное расстояние. На рисунке 4.2b показаны треки 15 вихрей Агульяса, которые мы выбрали для анализа. При дальнейшем изложении номера треков антициклонов соответствуют их номерам в используемом продукте «Mesoscale Eddy Trajectory».

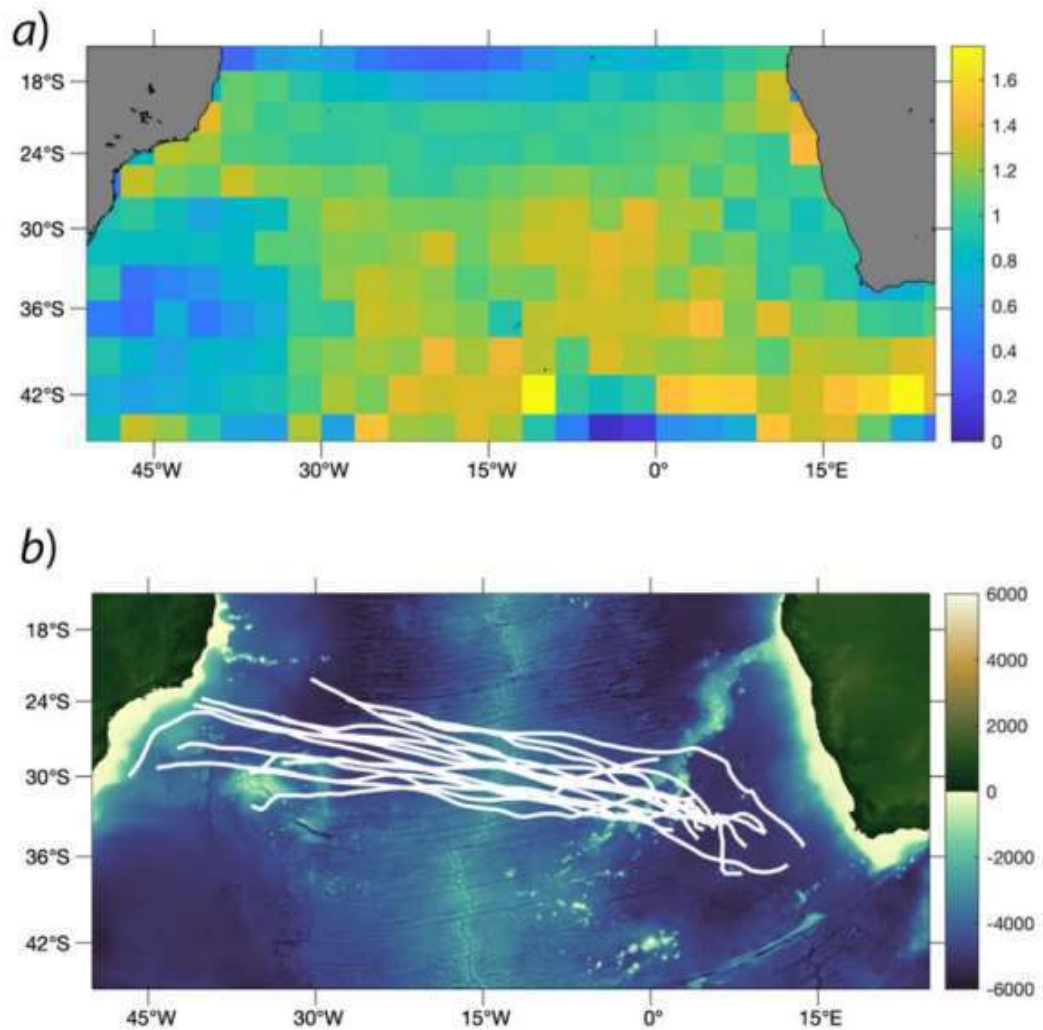


Рисунок 4.2. Среднее (1993 - 2017) ежедневное количество мезомасштабных вихрей, идентифицированных автоматическим методом Челтона и др. (2011) в каждой ячейке  $3.0^\circ \times 3.0^\circ$  (a); треки (показаны белым) долгоживущих антициклонов, пересекающих Южную Атлантику (b).

Каждый трек мы разделили на 3-6 частей, если его направление изменялось при перемещении вихря (табл. 4.1). На каждой из частей трека характеристики

вихрей мы считаем постоянными. В таблице 4.1 даны характеристики этих вихрей. Перемещение вихрей по широте превосходит меридиональное смещение, причем в большинстве случаев значительно, но на отдельных частях трека величины сравнимы, хотя меридиональный сдвиг по-прежнему уступает зональному смещению.

Таблица 4.1. Параметры долгоживущих мезомасштабных вихрей в Южной Атлантике

Номер трека	Средний радиус	Средняя амплитуда	Орбитальная скорость	Скорость дрейфа	Смещение:				Общее время жизни, дни
	$R$ , км	$A$ , см	$V_o$ , см/с	$V_d$ , см/с	$L_x$ , км	$L_y$ , км	$T$ , дни	$S$ , км	
<u>139147.1</u>	86	7	74	5	558	555	220	795	1198
<u>139147.2</u>	87	5	70	4	1173	111	390	1377	
<u>139147.3</u>	95	3	65	4,3	1173	277	293	1247	
<u>139147.4</u>	81	6	65	3,9	1017	218	280	1248	
<u>139147.5</u>	71	3	55	1,2	207	118	15	69	
<u>64204.1</u>	89	5	65	3,3	540	331	190	572	1096
<u>64204.2</u>	122	3	113	5,3	1680	442	380	1812	
<u>64204.3</u>	60	3	75	5,5	1523	192	330	1612	
<u>64204.4</u>	78	3	67	6,5	1108	332	196	1139	
<u>84755.1</u>	72	4	61	7,5	766	221	115	770	1088
84755.2	86	6	73	4,5	466	-221	130	520	
84755.3	74	4	75	8,6	421	9,5	55	421	
84755.4	73	4	62	9,3	933	321	200	966	
84755.5	77	3	81	4,5	1906	221	480	1937	
84755.6	74	4	87	4,6	584	-9,5	108	389	

<u>138285.1</u>	60	10	64	5,6	280	277	70	349	1130
138285.2	60	8	91	2	187	-111	130	216	
138285.3	80	4	65	3	373	332	180	438	
138285.4	77	4	85	3,8	1264	443	380	1288	
138285.5	76	4	84	5,3	1178	442	270	1278	
138285.6	61	3	82	7,2	332	120	100	648	
<u>78168.1</u>	60	18	115	4,3	685	591	210	804	1057
78168.2	79	11	69	6	3606	664	690	3773	
78168.3	70	6	75	7,2	600	-120	80	515	
78168.4	67	6	73	8,7	199	-563	77	596	
<u>61092.1</u>	68	6	76	4,5	721	655	250	994	1045
61092.2	90	4	77	2,7	295	212	150	361	
61092.3	78	4	91	5	2900	212	645	2919	
<u>56389.1</u>	74	10	69	3,3	1124	221	390	1158	954
56389.2	72	7	69	4,7	1400	220	340	1446	
56389.3	65	4	68	5,2	212	111	234	1080	
<u>44929.1</u>	88	9	71	5,5	2230	323	460	2243	948
44929.2	85	8	68	6	2332	212	440	2364	
44929.3	75	7	58	3,6	97	-100	48	155	
<u>83056.1</u>	65	3	85	9,6	267	-120	50	430	936
83056.2	78	4	86	6,3	1353	656	260	1463	
83056.3	74	5	73	5,2	2900	655	626	2915	
<u>62705.1</u>	81	7	79	2,7	460	110	200	481	922
62705.2	94	3	71	5,4	462	101	100	484	
62705.3	162	7	55	4,7	350	-9,5	90	377	
62705.4	95	4	67	3,1	600	212	220	617	
62705.5	86	8	113	3,7	663	101	210	693	

62705.6	70	12	57	3,3	275	-12	102	299	
<u>116552.1</u>	71	4	64	3	115	-102	49	133	922
116552.2	76	11	88	6,4	280	101	51	292	
116552.3	59	11	72	5	483	-100	110	492	
116552.4	75	4	60	3	223	-98	90	240	
116552.5	74	4	56	5,2	2800	664	622	2870	
<u>293011.1</u>	61	5	90	4,5	781	-236	200	794	905
293011.2	88	4	62	5,6	1533	12	305	1533	
293011.3	56	4	66	4,7	1039	-12	250	1058	
293011.4	88	3	52	2,5	100	-9,5	50	111	
293011.5	66	3	75	1,5	92	9,5	100	137	
<u>102254.1</u>	57	7	94	7,1	369	323	60	381	942
102254.2	51	8	126	5,2	140	-9,5	40	185	
102254.3	62	9	78	3,2	500	453	220	641	
102254.4	115	5	86	4,8	2590	533	612	2586	
<u>13155.1</u>	71	11	63	4,5	1546	221	380	1545	902
13155.2	58	6	69	5,5	1619	221	340	1651	
13155.3	47	6	63	4,3	486	110	130	500	
13155.4	58	5	67	4,7	200	-101	52	218	
<u>78132.1</u>	70	6	98	3,1	265	9	105	267	900
78132.2	83	9	108	3,7	1	341	115	346	
78132.3	83	8	139	4,5	1902	895	515	2036	
78132.4	80	8	171	4,8	604	230	165	642	

Из качественного анализа долгосрочной эволюции изолированных вихрей, амплитуды и радиуса вихрей, нельзя однозначно подтвердить вывод о планомерном уменьшении энергии со временем на больших временах. Эта тенденция описана Коротаевым и Федотовым (1994) и Коротаевым (1997), а также в работе Резника



(1994), которые объясняют это уменьшение излучением вихрями волн Россби. Однако перемещение вихрей может быть обусловлено поглощением волн Россби и тем фактом, что существует критическое значение амплитуды вихря, меньше которого нет излучения волн Россби (Коротаев 1997). Наоборот, иногда происходит, казалось бы, необъяснимое кратковременное усиление вихря. Не похоже, что это связано с топографическими причинами (трек 116552, см. рис. 4.3). Скорее всего, усиление обусловлено бароклинным фактором, который не учитывают имеющиеся аналитические модели в силу сложности постановки задачи. Это также подтверждают выводы Early et al. (2011) о том, что, возможно, фактор, который ассоциируют с излучением волн Россби вихрем, возможно, сильно завышен на больших временах при выходе на режим квазистабильного состояния. Guerra et al. (2018) использовали метод автоматической идентификации для обнаружения мезомасштабных вихрей в Южной Атлантике. Они также указали на существование «вихревого коридора». Они отмечают, что хребты представляют собой препятствия для вихревого дрейфа в Атлантике, поскольку вихри обычно отклоняются от траектории и снижают скорость перемещения, когда им удастся пройти через самые глубокие долины. Наше исследование подтвердило изменение углов относительно широты при пересечении хребтов вихрями (рис. 4.4). Однако во многих случаях уменьшение скорости дрейфа во время перемещения вихря не происходит (рис. 4.3).

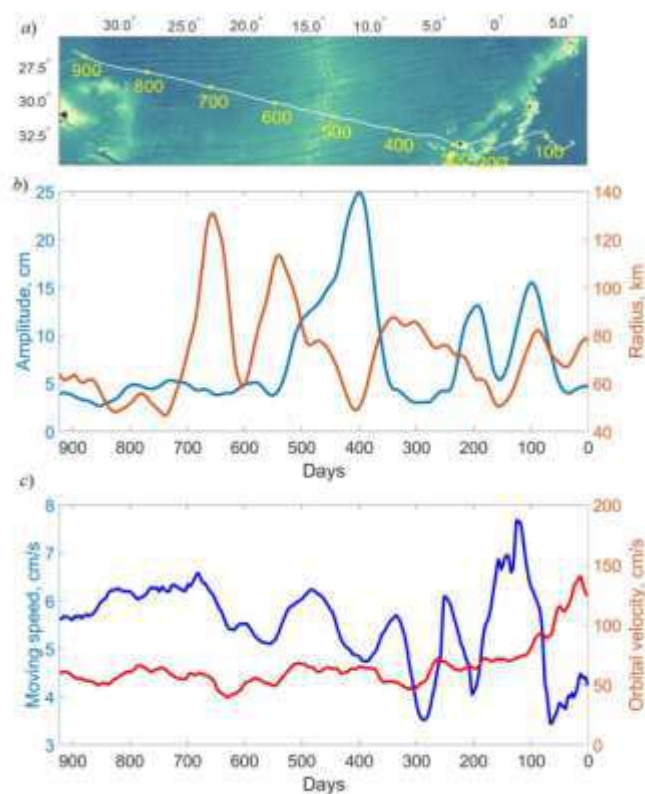


Рисунок 4.3. Трек № 116552 (а); Изменчивость во времени (б): амплитуды и радиуса вихря, (с) скорости движения и орбитальной скорости.

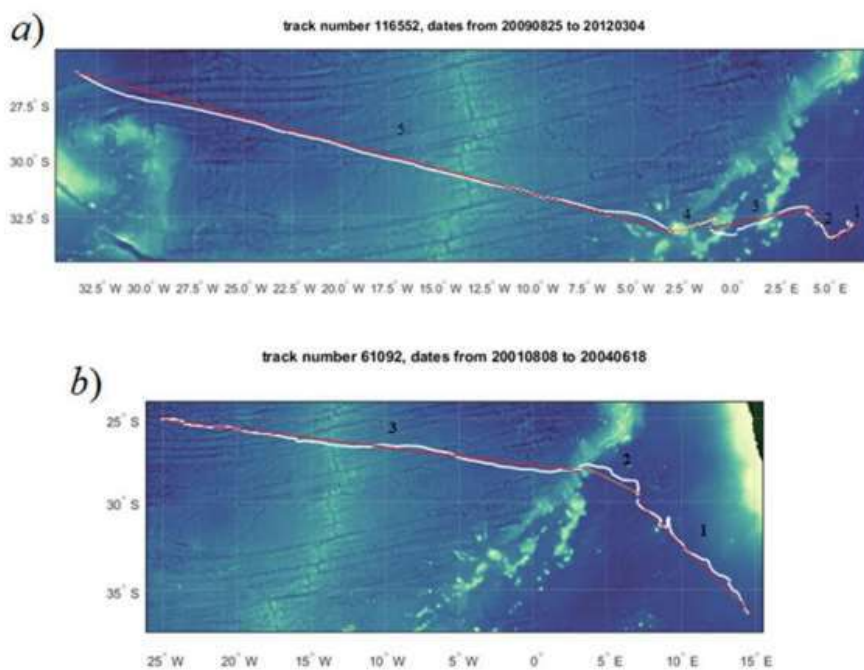


Рисунок 4.4. Треки антициклонов, пересекающих Южную Атлантику: а) 116552 с 25.08.2009 по 04.03.2012; б) 61092 с 08.08.2001 по 18.06.2004.

Согласно теории Коротаева (1997) и Резника (1994), одиночные вихри на больших временах распространяются асимптотически до «широты покоя», где затем исчезают. Такой тип квазипараболического распространения присущ очень сильным гауссовым вихрям. Наблюдаемые долгоживущие вихри Агульяса, скорее всего, такими не являются. Они более слабые и более плавно перемещаются в пространстве. Эволюция таких вихрей скорее подходит под модель вихрей алгебраического пространственного затухания (см. Резник, 1994, формулы (5.9) и (5.11)). Анализ данных из таблицы 4.1 согласуется с работой (Резник, 1994). На основании таблицы 4.1 можно сделать два основных вывода:

- траектории вихрей носят скорее квазилинейный, чем квазипараболический характер;
- вихри меньшего пространственного размера более склонны перемещаться в меридиональном направлении и имеют больший угол наклона к параллели.

Анализ отдельных треков дает следующий интересный результат. В начальный момент времени наблюдаемые треки вихрей Агульяса имеют четко выявленную тенденцию к определенному углу распространения. Имеющиеся математически модели (Коротаев, 1997; Резник, 2010; Early et al., 2011) исходят из того, что в целом движение вихрей является сильно нелинейным на больших временах. Однако, на начальном этапе, при малых временах, вихри являются линейными бэта-круговоротами. В силу анизотропной дисперсии волн Россби, длинные волны Россби бегут на запад, короткие - на восток. На начальном этапе локализованное осесимметричное образование вытягивается в зональном направлении, формируя так называемый бэта-круговорот. Это как бы нулевая стадия развития вихря на  $\beta$ -плоскости. Далее, этот круговорот уже управляется нелинейностью и приводит к чисто меридиональному смещению в зависимости от полярности вихря. Принципиальным моментом аналитических подходов является то, что линейность считается не способной дать меридиональную асимметрию движения (в силу меридиональной симметрии дисперсионного соотношения линейных волн Россби).

#### 4.2. Анализ основных теоретических подходов к меридиональному смещению вихрей

Считается, что линейные волны Россби способны объяснить асимметрию восток-запад, но не север-юг. Однако, на последующей временной стадии именно нелинейность приводит к западному смещению вихрей, которое сопровождается меридиональной анизотропией. Возможно, этот временной период, когда происходит строго меридиональное смещение, является слишком коротким, и мы в таблице 4.1 наблюдаем уже этап так называемой корректировки. Однако, возможно дать и иное объяснение данного факта.

Существующие аналитические модели динамики одиночных вихрей на  $\beta$ -плоскости обладают одним существенным недостатком. Обсуждая и признавая некие резонансные взаимодействия нелинейного вихря и излучаемых, или поглощаемых им, линейных волн Россби, авторы разрывают процесс зарождения вихря и его дальнейшую эволюцию.

Вот что пишет Коротаев (1997): «Интересной проблемой является весь цикл жизни вихря, начинающийся с его рождения из-за неустойчивости потока или других причин. К сожалению, эта проблема слишком сложна, чтобы ее можно было решить сейчас. Вместо этого мы сосредоточимся здесь на проблеме начальных значений. Хотя процесс формирования не рассматривается, проблема начальных значений обеспечивает физическое понимание динамики сильного вихря на  $\beta$ -плоскости». Логично ожидать, что эти причины должны играть существенную роль, по крайней мере, на начальных стадиях эволюции вихря. Причины и способы зарождения вихрей могут быть разными, однако это никак не отражено в существующих моделях.

Мы предлагаем следующую альтернативную версию эволюции начальной стадии зарождения вихрей Агульяса, не отвергая, что сценарии для вихрей в других регионах океана могут быть отличными, и опираясь на утверждение, что последующая динамика вихря, при больших временах, является сильно нелинейной. Первый этап зарождения и эволюции вихря мы предлагаем объяснить стадией узконаправленного излучения длинных волн Россби под совместным влиянием

топографии и крупномасштабного незонального течения. Качественно это можно объяснить следующим образом.

Течение Агульяс, являясь сильным струйным течением, несет с собой слабые захваченные волновые и вихревые возмущения, которые изначально имеют малую амплитуду. При этом орбитальные скорости вихрей не сильно отличаются от поступательной скорости и параметр нелинейности (отношение орбитальной скорости к поступательной) примерно равен единице. Сталкиваясь с сильными топографическими изменениями в виде резкого увеличения глубины, происходит двойной эффект преобразования этих возмущений.

Во-первых, слабые вихревые образования, которые были как бы захвачены сильным струйным течением, сталкиваясь с резким увеличением глубины, в силу закона сохранения потенциальной завихренности, сильно сжимаются в поперечнике, увеличивая свою орбитальную скорость, и, как следствие, становятся сильно нелинейными.

Во-вторых, течение, наоборот в силу закона сохранения массы, сталкиваясь с резким увеличением глубины, сильно замедляется. Следовательно, параметр нелинейности резко увеличивается, как за счет числителя (закручивание вихрей), так и за счет знаменателя (замедление поступательного движения потока). Это, по сути, и есть двойной эффект влияния топографии. Эти два фактора приводят к тому, что изначально захваченные вихри становятся сильно нелинейными, и течение выбрасывает, выталкивает вихрь, как некое инородное образование. В этом смысле, возможно, влияние топографии можно охарактеризовать, как некий сепаратор, отделяющий поступательное движение течения и вихревых образований. Образно влияние топографии можно описать, как выброс в парном фигурном катании. Когда партнер (течение), притормаживая, выбрасывает партнершу (вихрь), и та сильно увеличивает свое вращательное движение, то работает обычный закон сохранения момента количества движения. Сжимаясь к центру своей оси вращения, она (партнерша) уменьшает свой момент инерции, но увеличивает скорость вращения. (Момент импульса равен произведению скорости вращения на момент инерции, и он постоянен. При уменьшении момента инерции автоматически увеличивается скорость вращения). В данном случае, аналогом закона сохранения момента инерции является закон сохранения потенциальной завихренности.

Описанный выше сценарий говорит о том, что в момент зарождения вихрь не только захватывает водную массу, но и приобретает некий поступательный и вращательный момент, которые являются функцией от скорости и направления крупномасштабного течения, топографии в точке формирования вихря и, как будет показано ниже, бароклинных параметров течения в виде первого бароклинного радиуса Россби. Этим и можно объяснить наблюдаемое практически прямолинейное движение долгоживущих вихрей Агульяса.

Если в модели Коротаяева (1997) движение вихря на начальном этапе определяется неким изотропным излучением волн Россби, и за счет этого излучения вихрь приспособливается к враждебному ему окружению, то мы утверждаем обратное. В момент зарождения вихрь не появляется из ниоткуда. Сам вихрь, в момент его зарождения, является следствием узконаправленного углового (под углом к широте) излучения течением. И именно в начальный момент времени вихрь не только захватывает некий объем водной массы, но и приобретает некий начальный поступательный и вращательный момент импульса, которые и определяют все его дальнейшее поведение вплоть до момента исчезновения. Именно такой сценарий нам предлагают полученные эмпирические данные таблицы 4.1.

Важность именно длинноволнового приближения дает в линейной постановке следующую формулу для излучения волн Россби незональным бароклинным течением

$$\Psi = \Psi_0(x, y) + \varepsilon \varphi_1(x, y, z, t), \quad \varepsilon \ll 1, \quad (4.1)$$

где  $\Psi$  - квазигеострофическая функция тока,  $x, y, z$  – оси прямоугольной системы координат,  $t$  – время. При этом  $U(x, y) = -(\Psi_0(y))'_y$  – зональная составляющая скорости фонового течения,  $V(x, y) = (\Psi_0)_x'$  – меридиональная часть. Первое слагаемое – это фоновое стационарное течение, второе слагаемое в уравнении (4.1) – это линейные волны, которые можно искать в виде  $\varphi_1 = \varphi_1(z) \exp(i(kx + ly - \omega t))$ , где  $k, l$  – зональное и меридиональное волновые числа,  $\omega$  – частота,  $\varphi_1(z)$  – амплитуда волн, зависящая от глубины. Эффекты, связанные с нелинейным длинноволновым приближением изложены в работе Gnevyshev et al (2019). Математическая модель, которая объясняет узконаправленное угловое излучение

длинных волн Россби неzonальными течениями была сформулирована Лайтхиллом в его работе 1967 г. (Lighthill, 1967). Он использовал идею для описания резонанса между течением и излучаемыми течением линейными волнами Россби. Формула (26) из его работы:

$$U(k \cos \alpha + l \sin \alpha)(k^2 + l^2) + \beta k = 0, \quad (4.2)$$

где  $\beta$  – меридиональное изменение параметра Кориолиса, и скорость потока равна  $\vec{U} = U(\cos \alpha, \sin \alpha)$ . Если нарисовать индикатрису излучения, соответствующую условию (4.2), то получим излучение волн в чисто западном направлении. Это и есть часть сценария формирования  $\beta$ -круговорота, что снова нас приводит к утверждению: в линейной бездивергентной задаче нельзя получить меридиональной асимметрии.

Для лучшего понимания поясним переход от формулы (26) в работе Лайтхилла (это наша формула (4.2)) к формуле (38) в работе Лайтхилла. Эта формула является условием резонанса между потоком и генерируемым волновым полем. Этот термин связан с именем Кельвина, идеи которого впоследствии были развиты Лайтхиллом. Иногда эту формулу называют условием стационарности волн в системе, связанной с источником с учетом Доплеровского сдвига  $\Omega = \omega - \vec{k} \vec{U} = 0$ .

Далее Лайтхилл оценивает, как влияет на излучение длинных волн Россби учет дивергентности. Считая выкладки тривиальными, она сразу дает ответ в виде классической формулы (38), которая, наверное, является физически самой успешной для представления распространенной идеи о резонансе между движением излучателя и излучаемым им волнами. Аналогичную формулу о резонансе использовал еще Кельвин для построения картины корабельных волн (Lord Kelvin, 1906).

Поясним, как она получается. Для этого мы должны модифицировать уравнение (4.2) следующим образом:

$$U(k \cos \alpha + l \sin \alpha)(k^2 + l^2 + R_d^{-2}) + \beta k = 0, \quad (4.3)$$

где  $R_d$  - бароклиный радиус деформации Россби. В длинноволновом пределе при  $k^2 + l^2 \ll R_d^{-2}$  и с учетом факта, что направление излучения волн (направление нормали) на нулевой частоте будет перпендикулярно квазиплоскому слагаемому вблизи начала координат, мы получим модифицированную формулу – аналог формулы (38) в виде

$$\Theta = \arctan \left( \frac{\sin \alpha}{\frac{\beta \cdot R_d^2}{U} + \cos \alpha} \right), \quad (4.4)$$

где  $\Theta$  – угол направления излучения волн от западного направления и угол  $\alpha$  измеряется с того же (западного) направления. Разница формулы (4.4) с формулой (38) у Лайтхилла состоит в том, что Лайтхилл использовал баротропный радиус. Это означает, что никакого отличия от чисто зонального направления волн с использованием этой формулы мы бы не получили. Лайтхилл пришел к выводу, что как для бездивергентных волн Россби, так и для дивергентных волн Россби, при использовании баротропного радиуса Россби результаты практически совпадают. Однако, если использовать вместо баротропного первый бароклиный радиус, то тогда наблюдается меридиональное смещение волн, и мы видим хорошее соответствие направлений перемещения треков вихрей Агульяса в Южной Атлантике с модифицированной формулой Лайтхилла. Возможно, в 1967 г. еще не был известен первый бароклиный радиус.

О резонансе также говорится и в модели Коротаева (1997) и Резника (2010) на квазистационарном режиме. Но там она используется для описания резонанса между вихрем и волнами Россби, излучаемыми или поглощаемыми вихрем. Вот, например, Коротаев (1997) пишет: «Движущийся вихрь на вращающейся сфере или на бета-плоскости возбуждает волны Россби, как движущийся корабль вызывает волны корабля. Волны Россби наблюдаются в течение всего периода эволюции вихрей, но они очень слабы в течение небольших периодов времени (Резник, 1992)». Нетрудно заметить, что данное условие линейного резонанса гармонирует с нелинейным условием стационарности, если взять чисто зональный случай и от волновых движений перейти к локализованным:



$$p^2 = \frac{\beta}{U} + R_d^{-2}, \quad (4.5)$$

где  $p$  - параметр, который задает пространственные масштабы полей скорости вихря (Резник, 1992). Незональные течения, независимо от угла их распространения, излучают длинные волны Россби практически только в западном направлении. И мы в этом случае снова получаем классический результат линейной задачи, то есть никакой анизотропии в направлении север-юг в линейной постановке получить нельзя. Однако, тот факт, что угол излучения волн Россби практически не зависит от угла направления самого течения, физически выглядит не совсем логичным и может быть объяснен только длинноволновым приближением.

Таким образом, если использовать не баротропный, а первый бароклинный радиус деформации  $R_d$ , мы получаем совершенно иной результат. При этом разброс значений в зависимости от первого бароклинного радиуса в месте излучения будет крайне мал. Именно этот факт мы и кладем в основу идеи об излучении вихрей Агульяса незональным течением с учетом донной топографии и бароклинности течения. Так как скорости течения в местах генерации имеют примерно одно и то же направление, именно поэтому все треки распространяются как бы по одной тропе (рис. 4.2b).

Таким образом, проанализировав основные теоретические подходы (Коротаев, 1997; Резник, 2010; Early et al., 2011), в которых обсуждается меридиональное смещение вихрей, мы приходим к выводу, что ни один до конца не может объяснить этот феномен, так как получаемые оценки смещения не соответствуют теоретическим формулам. Это позволяет сделать вывод о том, что механизмы, ответственные за меридиональное смещение вихрей, должны быть иными. Тем не менее, основываясь на подходе Лайтхилла и используя его модифицированную формулу, мы получали приемлемое сравнение эмпирических и теоретических параметров меридионального смещения движущихся вихрей: при угле наклона трека  $36^\circ$ , получаем по формуле (4.4)  $\Theta = 32-40^\circ$ , а при угле наклона  $64^\circ$  получаем на начальной стадии вихревого движения  $\Theta = 49-58^\circ$ . В расчетах использованы значения радиуса деформации 30-35 км (Chelton et al., 1998), скорости течения = 5-10 см/с,  $\beta = 1,9 \times 10^{-11} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, наблюдаемое меридиональное смещение вихрей в Южной Атлантике может быть следствием

возникающего резонанса между незональным потоком и волновым полем, создаваемым потоком, который проявляется в виде узконаправленного излучения волн Россби. Возможно, предложенная интерпретация не универсальна для всего Мирового океана, но ее верификация для Южной Атлантики показала ее жизнеспособность.

### **4.3. Анализ трансформации волн Россби на незональном течении**

На основе двух разных подходов (ВКБ-приближение и задача Коши) изучается трансформация волн Россби на незональном течении (Гневывшев и др., 2020). Рис. 4.1 демонстрирует, что течения в Южной Атлантике, где расположены треки вихрей, в основном незональны. Таким образом, основной вывод данного исследования применим для треков вихрей Агульяс, распространяющихся на северо-запад. Незональные потоки приводят к разделению такого понятия, как критический слой (Gnevyshev and Shrira, 1989a, b, c, d, 1990). Наряду с классическим представлением о критическом слое, когда волны асимптотически медленно приближаются к критическому слою и собственная частота положительна, существует другой режим распространения волн Россби. В случае незонального течения волновое воздействие (вихрь) испытывает скачкообразный скачок и критический слой пересекается дважды. Duba et al. (2014) назвали этот режим «подныривание». Сначала собственная частота становится равной нулю для конечных значений времени и составляющих волнового числа. В этом случае волновое воздействие действительно испытывает скачкообразный скачок (Duba et al., 2014), а собственная частота становится отрицательной, что соответствует волнам Россби с отрицательной энергией. Только после этого отраженная волна снова асимптотически приближается к критическому слою на длительное время. Следовательно, эффект коротковолновой трансформации волн Россби вблизи так называемого критического слоя существует в двух формах: (1) прилипание, то есть монотонное приближение волновых пакетов к критическому слою на бесконечно долгое время. Знак собственной частоты пакета все время остается неизменным; (2) прилипание после подныривания, когда волновой пакет сначала пересекает свой критический слой с конечным волновым числом. Волна меняет знак собственной

частоты при выходе за критический слой, а затем сохраняет знак при прилегании к этому слою, асимптотически аналогично предыдущему сценарию (Гневых и др., 2020). Последний режим не существует для зональных течений. На рисунке 4.5 показаны примеры этих двух режимов для вихрей, распространяющихся в Южной Атлантике.

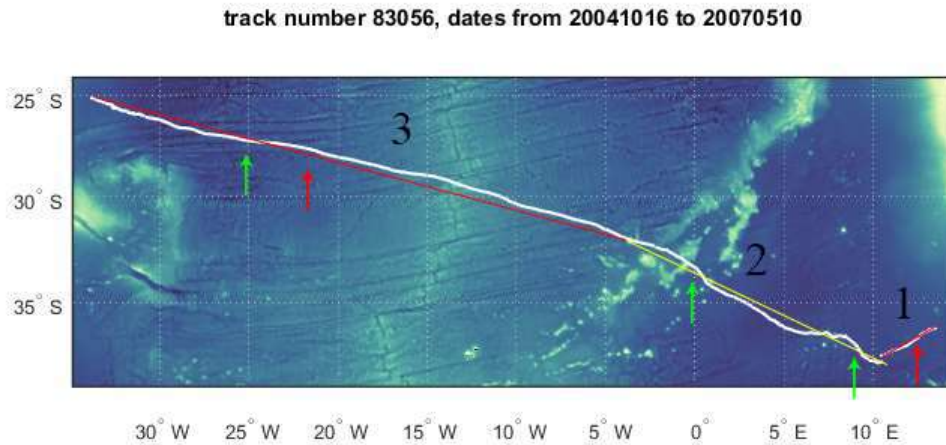


Рисунок 4.5. Два режима распространения волны Россби: прилипание (красная стрелка) и подныривание (зеленая стрелка).

Выводы этой части работы могут быть чрезвычайно полезными и важными при изучении бароклинности волн Россби. Это приведет к разделению спектра вертикальной волны Россби. Такой сценарий ранее не рассматривался, но некоторые связанные идеи (многоуровневые волноводы) для внутренних волн давно известны (см., например, Shrira & Townsend, 2010). Однако применение этих идей к волнам Россби требует развития.

## ГЛАВА 5. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕЙ КАПСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Целью данной части работы является анализ вертикальной структуры и оценка потенциальной завихренности двух долгоживущих вихрей Агульяса – циклона и антициклона, а также анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе вытягивания, расположенных в Капской котловине. Анализ кинематических и динамических характеристик разнополярных вихрей позволит получить адекватное представление о структуре и динамических параметрах мезомасштабной вихревой динамики акватории.

### 5. 1. Динамические характеристики вихрей

Для анализа основных динамических характеристик среди всех вихрей течения Агульяс нам были необходимы вихри, удовлетворяющие следующим условиям:

- вихри образованы течением Агульяс;
- вихри на протяжении всего цикла существования идентифицируются по базе «Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product»;
- вихри имеют различную полярность;
- вихри расположены на минимальном расстоянии друг от друга.

Нам удалось найти несколько пар циклонов и антициклонов Агульяса, которые удовлетворяют выбранным условиям в период с 1993 по 2022 год. Одна пара вихрей особенно привлекла наше внимание, так как антициклон оказался одним из самых долгоживущих вихрей Агульяса и просуществовал почти 3 года. Данная пара вихрей и была выбрана для дальнейшего анализа. Анализировались вертикальная структура и потенциальная завихренность циклона ( $Cyc$ ) и антициклона ( $Ac$ ). На момент встречи (13.12.2012) эти два вихря расположены к западу от африканского побережья на одной широте,  $Cyc$  западнее  $Ac$ , и вихри практически образуют диполь. На рисунке 5.1 представлены аномалии уровня моря, где  $Cyc$  характеризуется

отрицательными аномалиями до  $-0,4$  м, а  $A_c$  – положительными, достигающими  $0,6$  м в его центре. На период наблюдения и в момент встречи (13.12.2012) вихри уже покинули район формирования и начали перемещение в западном направлении.

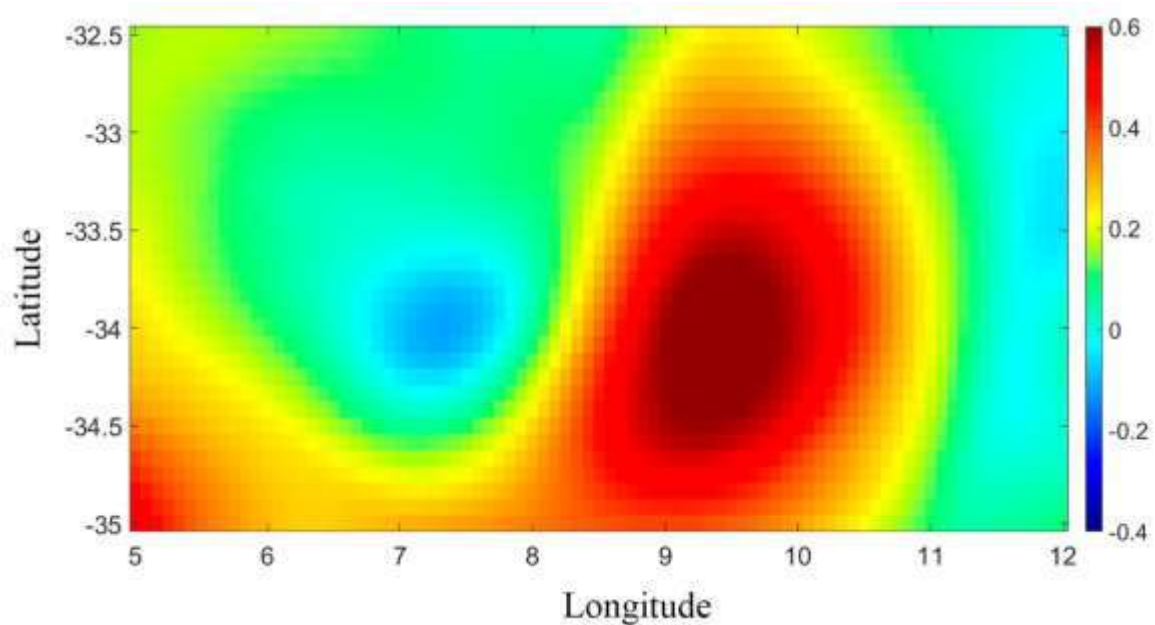


Рисунок 5.1. Аномалии уровня моря (м) по данным GLORYS за 13.12.2012.

На основе массива «Mesoscale Eddies...» сделана оценка средних параметров вихрей и их периодов жизни. Если долгоживущий  $A_c$  существовал 1065 дней: с 30.10.2012 по 29.09.2015, то  $C$  имеет период жизни 123 дня: с 2.12.2012 по 3.04.2013. Видно, что период жизни  $A_c$  на порядок превышает период жизни  $C$ . Причина того, что антициклоны являются более устойчивыми структурами по сравнению с циклонами, кроется в так называемой циклон-антициклонной асимметрии вихрей, которая следует из нелинейных свойств циклонов и антициклонов. У циклона ротор скорости параллелен вектору вертикальной компоненты вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен. Это приводит к тому, что только у антициклона скалярная нелинейность уравнивает дисперсию. У циклона же дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы (Незлин, 1986). Эта особенность, демонстрирующая циклон-антициклонную асимметрию вихрей, доказана как теоретически, так и экспериментально: антициклоны устойчивы и отличаются сравнительно большим временем жизни; циклоны сравнительно быстро распадаются (диспергируют). Эта особенность также характеризует вихри, представленные на рисунке 5.1. Средние

параметры вихрей, полученные по массиву «Mesoscale Eddies...», представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Характеристики вихрей Агульяса

Полярность вихря	Средний радиус вихря	Средняя амплитуда	Средняя орбитальная скорость	Путь	Время перемещения	Средняя скорость перемещения
	R, км	A, см	$V_0$ , см/с	S, км	t, дни	$V_d$ , см/с
Ac	74	5	79	4217	1065	5,8
Cyc	72	6	107	438	123	5,7

Видно, что средние значения орбитальной скорости существенно больше средних значений скорости перемещения вихрей. Такие вихри можно считать осесимметричными (Коротаев, 2020).

На рисунке 5.2 показаны треки движения вихрей на основе массива «Mesoscale Eddies...».

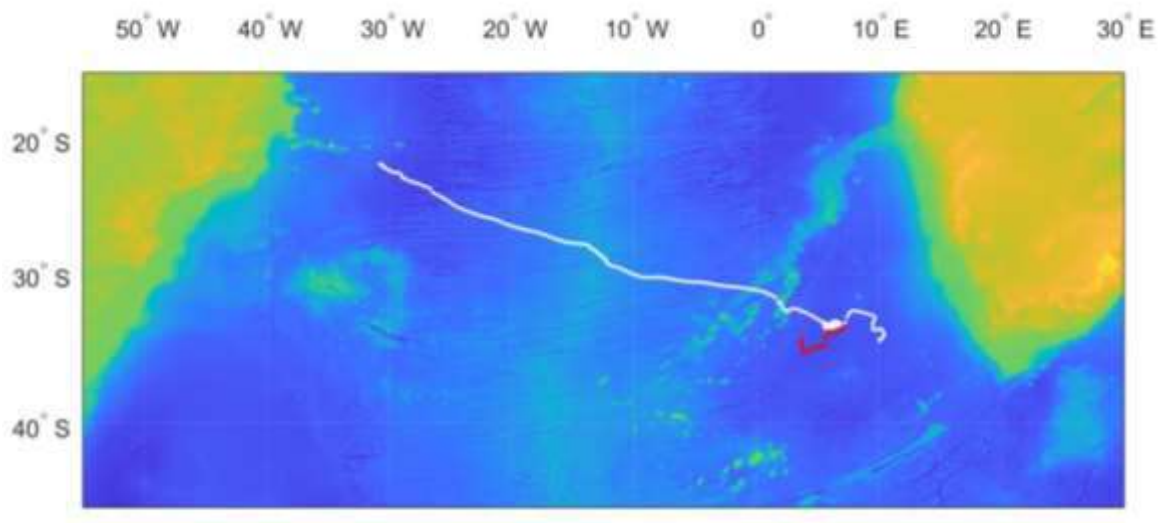


Рисунок 5.2. Треки антициклона (белый цвет) и циклона (красный цвет) с моментов

их генерации до диссипации. Пересечение треков соответствует дате наблюдения 13.12.2012 (см. рис. 5.1).

Отметим, что при доминирующем перемещении вихрей в западном направлении, наблюдается отклонение по меридиану, причем  $A_c$  отклоняется к экватору, а  $C_{yc}$  к полюсу. Теоретическое обоснование этого явления рассмотрено в главе 4. Однако, как показано на рисунке 5.3, для рассматриваемого антициклона данный факт не подтверждается, т.е. не происходит уменьшения скорости движения или радиуса вихря с течением времени. Очевидно, что на перемещение вихрей влияет множество внешних факторов, когда вихри периодически теряют или получают дополнительную энергию.

На рисунке 5.3а видно, что скорость перемещения  $A_c$  изменяется от 3 до 10 см/с. Движение вихря не замедляется в процессе эволюции. Более того, к концу жизненного цикла вихря скорость перемещения достигает максимальных значений — 10 см/с, а затем уменьшается до 0,065 см/с, после чего вихрь диссипирует. Увеличение скоростей перемещения иногда коррелирует с увеличением радиуса вихря, однако эта зависимость наблюдается лишь в отдельные моменты времени. Очевидно, изменчивость параметров  $A_c$ -вихря определяется сложным комплексом различных динамических условий – взаимодействием с фоновыми течениями, изменением термохалинной структуры среды, слиянием с другими вихрями, атмосферными воздействиями и т.д.

Для циклона  $C_{yc}$  (рис. 5.3б) также отмечается увеличение скорости перемещения перед диссипацией вихря. Скорости изменяются в диапазоне от 0,045 до 0,072 см/с. Однако радиус вихря к концу жизненного цикла постепенно уменьшается от 115 до 57 км.

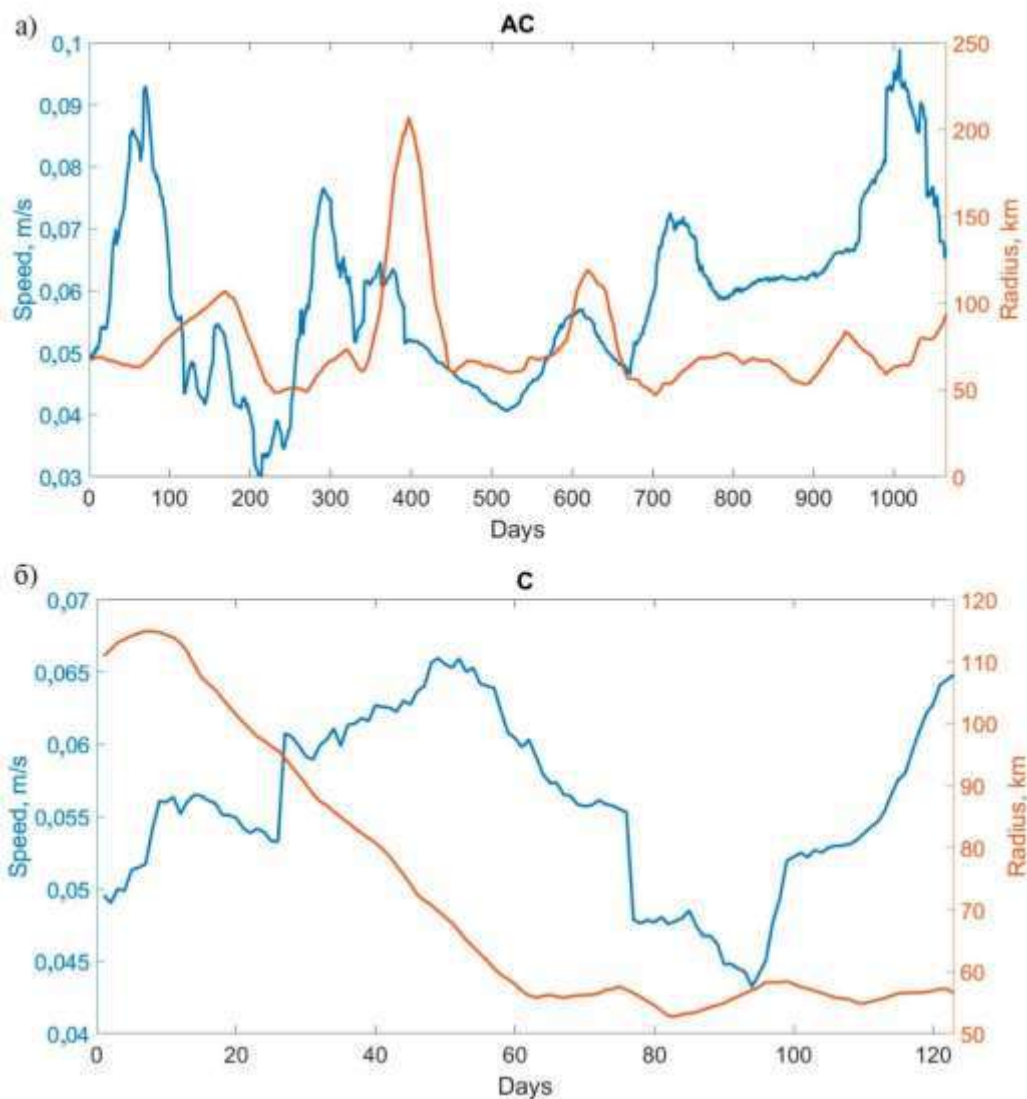


Рисунок 5.3. Изменчивость во времени скорости перемещения (синим) и радиуса (красным) антициклона (а) и циклона (б).

### Относительная завихренность

Одним из основных параметров вихрей является относительная завихренность. Помимо циклона и антициклона, представленных на рисунке 5.1, в поле относительной завихренности выделяются другие динамические структуры (рис. 5.4). Максимальные по модулю значения  $\zeta$  ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ) расположены в восточной части  $S_{\text{ус}}$ , в то время как в его северной части значения близки к нулю или даже отрицательны. Это означает, что завихренность является динамической



характеристикой, в то время как аномалии уровня, представленные на рисунке 5.1, кинематической. Помимо вихрей, в поле завихренности отображаются сдвиговые течения, которые также имеют положительную или отрицательную завихренность. Для  $A_c$  максимальные отрицательные значения  $\zeta$  ( $-2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ) расположены в центре и южной части вихря.

Число Россби  $Ro = \left| \frac{\zeta}{f} \right|$  ( $f$  — параметр Кориолиса) изменяется в диапазоне от 0.03 до 0.05 и является довольно малым, что говорит о большой нелинейности вихрей, что является одной из причин меридионального смещения при их перемещении на запад (Ле Блон, 1981).

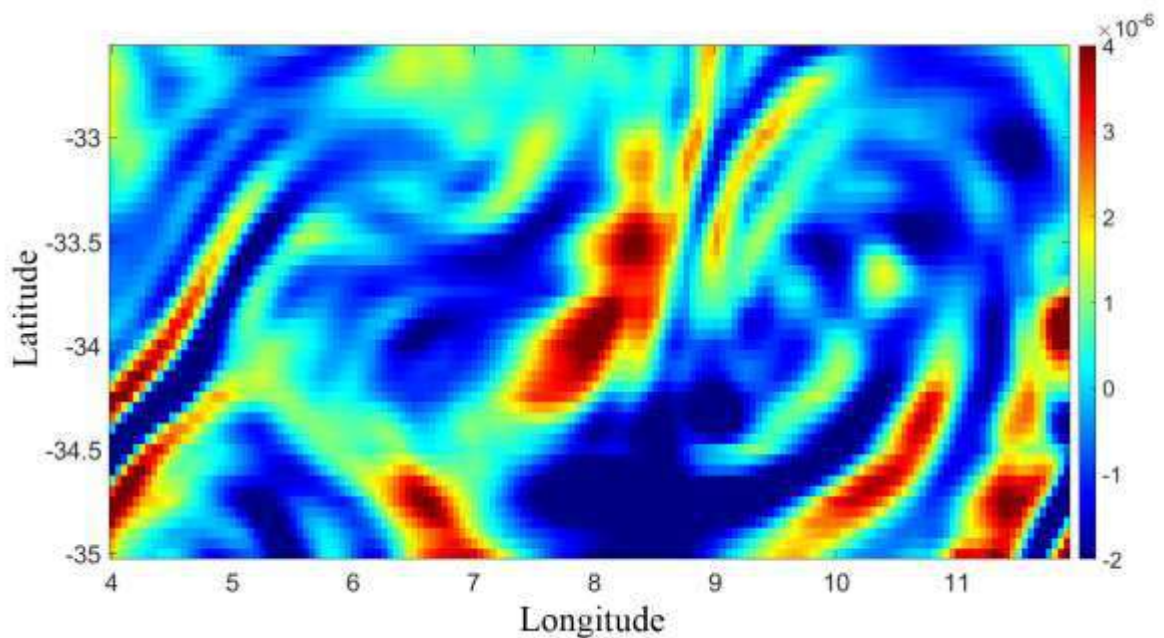


Рисунок 5.4. Пространственное распределение относительной завихренности ( $\text{c}^{-1}$ ) на поверхности на 13.12.2012.

### Потенциальная завихренность вихрей по формуле Эртеля и Россби

На вертикальном разрезе PV по Эртелю (рис. 5.5) хорошо выделяются ядра  $S_{us}$  и  $A_c$ , окруженные изопикнами. В циклоне изопикны сжимаются, а в антициклоне — раздвигаются. Во всей исследуемой области  $PV > 0$ , однако в ядре  $A_c$  имеет нулевые значения, чему способствует отсутствие стратификации. Минимальные значения

( $0,6 \cdot 10^{-10}—0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) расположены на периферии ядра *Ac*, а максимальные ( $1,8 \cdot 10^{-10}—2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) — в области ядра циклона.

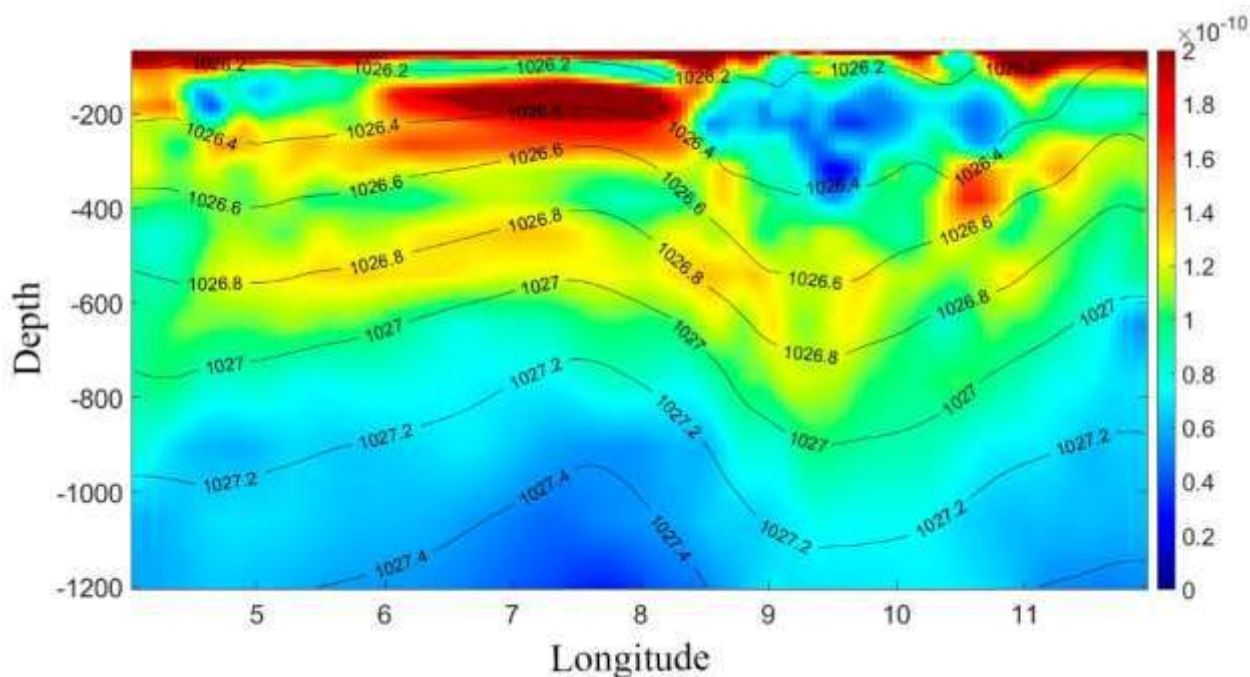


Рисунок 5.5. Оценка  $PV$  по формуле Эртеля ( $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) для 13.12.2012 на разрезе по  $33,5^\circ$  ю.ш. Черными линиями показаны изопикны.

Потенциальная завихренность  $\sigma$  по формуле Россби (рис. 5.6) отличается размерностью от  $PV$  по формуле Эртеля. В отличие от оценок  $PV$ , значения  $\sigma$  в ядре антициклона отрицательны и достигают минимума  $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . В циклоне значения  $\sigma$  положительны в ядре *Cyc* и достигают максимума  $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  на горизонте 200 м. Сравнение рисунков 5.5 и 5.6 показывает, что ядро антициклона на графике потенциальной завихренности по Россби имеет большую вертикальную протяженность, чем по формуле Эртеля. Оно разделяется на две части незначительной областью с положительными значениями  $\sigma$  примерно на глубине 500 м, что обусловлено незначительным подъемом изопикн в этой части ядра. В слое ниже 500 м до 900 м значения  $PV$  снова отрицательны и достигают  $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Ядро циклона с положительными значениями также разделяется на две части: слой до 200 м с положительными значениями. На рисунке 5.6 видно, что циклон и антициклон, взаимодействуя друг с другом, обмениваются потенциальной завихренностью, и области положительных и отрицательных значений  $\sigma$  распространяются на глубины, где расположен циклон.

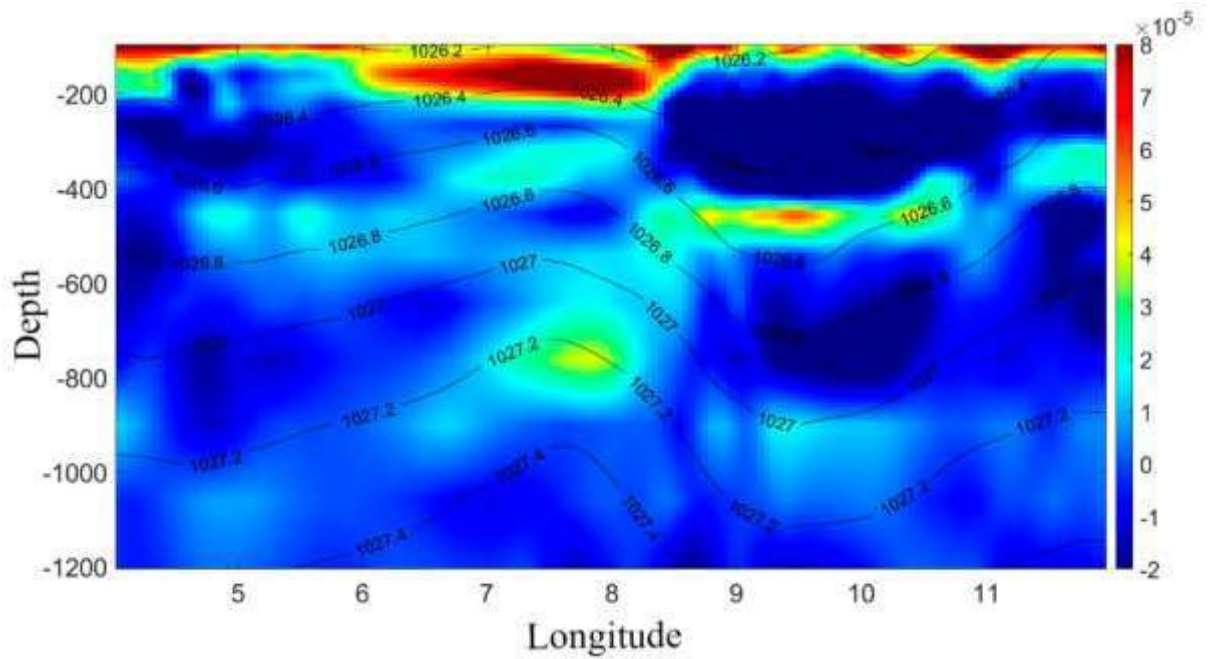


Рисунок 5.6. Оценка PV по формуле Россби ( $\text{с}^{-1}$ ) на 13.12.2012 на разрезе  $33.5^\circ$  ю.ш. Черными линиями показаны изопикны.

## 5.2. Термохалинные характеристики вихрей

Аномалии термохалинных характеристик рассчитывались относительно среднегодовых значений в соответствующих точках (см. вертикальные разрезы по  $33.5^\circ$  ю.ш. на рис. 5.7).

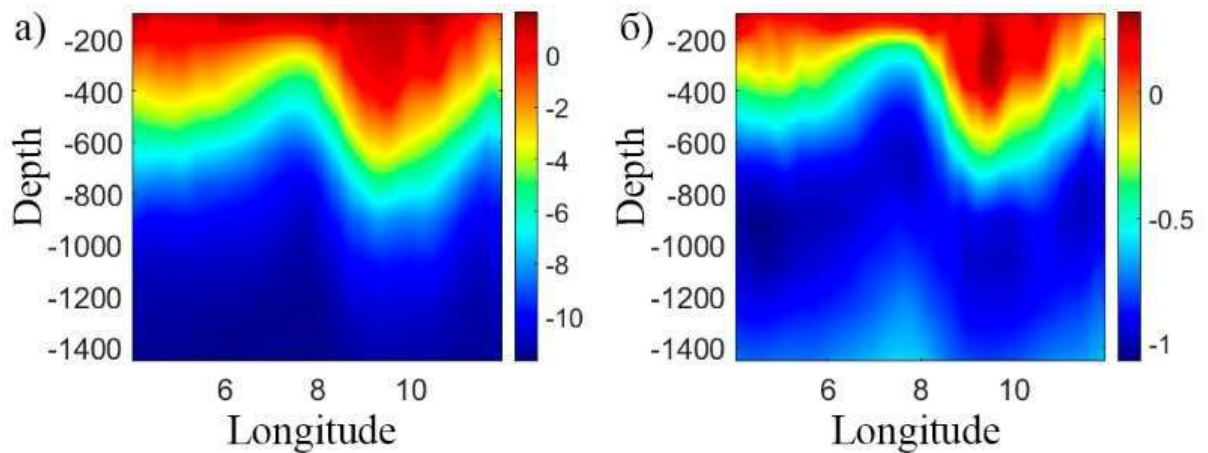


Рисунок 5.7. Аномалии температуры ( $^\circ\text{C}$ ) (а) и солености (psu) (б) на разрезе  $33.5^\circ$  ю.ш. на 13.12.2012.

На вертикальных разрезах температуры и солёности (рис. 5.7) хорошо видны оба вихря. Центр циклона расположен на  $7.5^\circ$  в.д., а антициклона – на  $9^\circ$  в.д. Видно, что оба вихря являются подповерхностными. Аномалии изотерм и изохалин циклона простираются до 1000 м и примерно до 1200 м для антициклона. *Ac* представляет собой подповерхностный вихрь в форме полуэллипсоида с ядром до глубины 800 м с повышенными значениями температуры и солёности. Температура и солёность в ядре антициклона выше средних фоновых значений на  $2^\circ\text{C}$  и 0,3 соответственно. Ядро циклона располагается на глубине около 200 метров, температура и солёность в ядре циклона ниже фоновых значений на  $1^\circ\text{C}$  и 0,2 соответственно.

Частота Вяйсяля–Брента (ЧВБ) рассчитывалась с помощью термодинамического уравнения TEOS-10 (<http://www.teos-10.org/>), реализованного в среде Matlab. Ядра вихрей хорошо выделяются на вертикальном разрезе ЧВБ (рис. 5.8). Максимум ЧВБ наблюдается в области ядра *Sus* и составляет  $4 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ , в то время как в ядре *Ac* стратификация отсутствует, значения ЧВБ нулевые. Ядро циклона с однородной стратификацией расположено примерно на горизонтах 100—200 м, а ядро антициклона на горизонтах 200—400 м. В то же время прогибы изопикн простираются, как минимум, до глубины 1200 м.

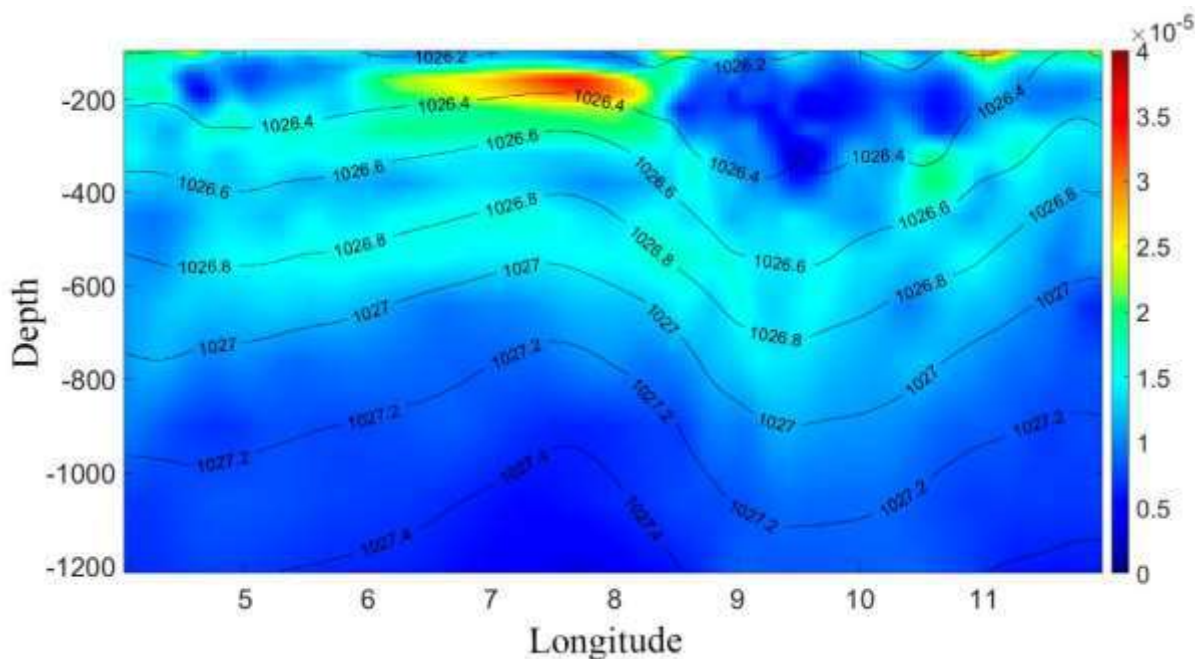


Рисунок 5.8. Частота Вяйсяля–Брента ( $\text{c}^{-1}$ ) на разрезе  $33.5^\circ$  ю.ш. 13.12.2012. Черными линиями показаны изопикны.

### 5.3. Кинематические характеристики вихрей

#### 5.3.1. Взаимодействие вихрей с баротропным потоком

Теоретические исследования показали, что при взаимодействии вихрей с баротропным потоком существует три варианта поведения мезомасштабных вихрей: вращение, нутационные колебания и неограниченное вытягивание (Жмур и др., 2022). Эволюция вихрей путем вытягивания сопровождается потерей кинетической и доступной потенциальной энергии (Жмур, 2023). Вытянутый вихрь в теоретических исследованиях называют вихревой нитью, а при анализе спутниковой или натурной информации — филаментом. Термин «филамент» широко используется в океанологических исследованиях (Жмур и др., 2022).

Механизмы образования филаментов известны и описывались во многих работах: Жмур (Жмур, 2011), Kida (Kida et al., 1981), Жмур и Панкратов (Жмур и др., 1990), Травкин и др. (Травкин и др., 2022). В работе Жмур и др. (Жмур и др., 2022) рассмотрена эволюция мезомасштабного антициклонического вихря, расположенного в Лофотенской котловине, который, будучи изначально круглым в горизонтальном плане, постепенно превратился в филамент. Процесс эволюции авторы наблюдали на последовательных картах, построенных по данным реанализа, в течение трех недель. Авторы отмечают практически линейное уменьшение энергии при вытягивании вихря.

Возникает вопрос: можно ли наблюдать вытягивание вихрей в области Капской котловины, расположенной к юго-западу от Африки, где вихри являются более устойчивыми и долгоживущими? Gnevyshev et al. (2022) в своей работе проанализировали 28018 циклонов и 26478 антициклонов и показали, что антициклоны Агульсова переноса, являясь более долгоживущими, чем циклоны, перемещаются на северо-запад почти прямолинейно и, преодолевая тысячи километров, пересекают Южную Атлантику. Отмечается следующая закономерность: антициклоны при своем движении на запад под действием бета-эффекта отклоняются к экватору, а циклоны — к южному полюсу. Предлагаются различные физические механизмы этого явления, обсуждение их можно найти в работе Gnevyshev et al. (2022).



Жмур и др. (Жмур и др., 2023b; Жмур и др., 2023c) теоретически показали, что в океане существуют области, где запрещено вытягивание вихрей, и где имеется потенциальная возможность к их вытягиванию. При наличии данных о течениях в океане можно на картах построить географические распределения этих областей и рассчитать их площади. Авторы построили такие распределения для различных регионов Мирового океана и показали, что интегральная площадь областей, где вихри могут вытягиваться, превышает площади, где вытягивание вихрей отсутствует.

Анализируя радиолокационные снимки поверхности океана, можно наблюдать множество филаментов. Есть основания предполагать, что часть из них, возможно, образовались в процессе вытягивания мезомасштабных вихрей (см. пример (Жмур и др., 2023b)). Однако задача — проанализировать трансформацию вихрей на основе натуральных наблюдений является практически неразрешимой и упирается в отсутствие соответствующей информации о течениях с необходимым пространственным разрешением данных. Тем не менее в работе (Жмур и др., 2022) рассматривается эволюция вихря путем вытягивания по данным реанализа GLORYS12V1 и проанализировано изменение его кинетической и доступной потенциальной энергии. В данной части работы рассматриваются два новых примера, демонстрирующих вытягивание вихрей. Таким образом, целью данной части работы является анализ эволюции кинетической и доступной потенциальной энергии вихрей в процессе вытягивания, расположенных в Капской котловине.

### **5.3.2. Поведение вихрей Капской котловины при вытягивании**

Последние исследования, связанные с деформацией вихрей при взаимодействии с фоновым течением (например, (Жмур и др., 2022; Жмур и Панкратов, 1990)), показали, что мезомасштабные вихри в определенных случаях могут быть вытянуты в филаменты, и, вытягиваясь, вихри перераспределяют тем самым энергию с мезомасштаба на субмезомасштаб. Как известно мезомасштабные и субмезомасштабные процессы имеют различный пространственный размер. Как критерий оценки масштаба явления используют бароклинный радиус деформации Россби:

$$R_d = \frac{N^*}{f} H, \quad (5.1)$$

где  $f$  — параметр Кориолиса,  $N^*$  — характерное значение частоты Вяйсаля-Брента,  $H$  — вертикальный размер явления. Если горизонтальный размер явления ( $L$ )  $< R_d$ , то явление относится к субмезомасштабу, если  $L > R_d$  — к мезомасштабу. Для описания масштабов также используется число Россби, являющееся отношением сил инерции к силе Кориолиса:

$$R_0 = \frac{U}{fL}, \quad (5.2)$$

где  $U$  — горизонтальная составляющая скорости,  $L$  — горизонтальный размер.

Для больших масштабов  $L$  число Россби мало:  $R_0 < 1$ . Из формулы также следует, что при уменьшении горизонтального размера, число Россби возрастает. Переход явления к субмезомасштабу приводит к большим числам Россби и агеострофическому ускорению.

Для того, чтобы оценить поведение вихрей Капской котловины при вытягивании, были рассчитаны две основные динамические характеристики вихрей: относительная ( $\zeta$ ) и потенциальная по Эртелю ( $PV$ ) завихренности:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (5.3)$$

где  $u$  и  $v$  — зональная и меридиональная составляющие скорости потока, ось координат правая: ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  — на север,  $z$  — вертикальная ось.

$$PV = \frac{(\zeta + f) \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0}, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $\rho_0$  — референтная плотность воды, здесь  $\rho_0 = 1027 \text{ кг/м}^3$ . Для расчета производных использовалась прямая разностная схема. Одним из ключевых свойств потенциальной завихренности является выполнение теоремы о

проницаемости (Жмур и Арутюнян, 2023а): чистый перенос  $PV$  через изопикнические поверхности отсутствует, следовательно, выполняется закон сохранения потенциальной завихренности, который является аналогом закона сохранения количества движения. Но так как системы в океане не замкнуты, потенциальная завихренность изменяется в процессе эволюции вихрей наравне с изменениями других динамических и кинематических характеристик.

Для исследования было построено и проанализировано множество полей потенциальной завихренности по Эртелю на наличие вихрей, способных к вытягиванию. Среди прочих было найдено два вихря различной полярности, располагающихся на наименьшем расстоянии друг от друга и вытягивающихся практически одновременно, что является репрезентативным. На рис. 5.9 и 5.10 показаны два вихря в начальный и конечный момент их эволюции путем вытягивания. Один из вихрей антициклон, другой — циклон. Эти два вихря различной полярности, которые продемонстрировали способность к вытягиванию в филаменты в течение 7 дней, и были выбраны для дальнейшего анализа в качестве примера. Центры вихрей на начальный момент времени расположены на  $9^\circ$  в. д. и  $39.2^\circ$  ю. ш. (антициклон) и на  $12^\circ$  в. д. и  $36.5^\circ$  ю. ш. (циклон). Стоит отметить, что для выбранных вихрей значения числа Россби варьируются в диапазоне от 0,03 до 0,05, что является довольно малым значением, это говорит о большой нелинейности вихрей. На рис. 5.9 и 5.10 видно, что происходит изменение формы этих вихрей: если на начальную дату наблюдений (19.12.2001) вихри имеют форму эллипсов, то в конце периода наблюдений (25.12.2001) вихри вытягиваются так, что длина превосходит ширину в 4,5 раза для антициклона и в 3,5 раза — для циклона.



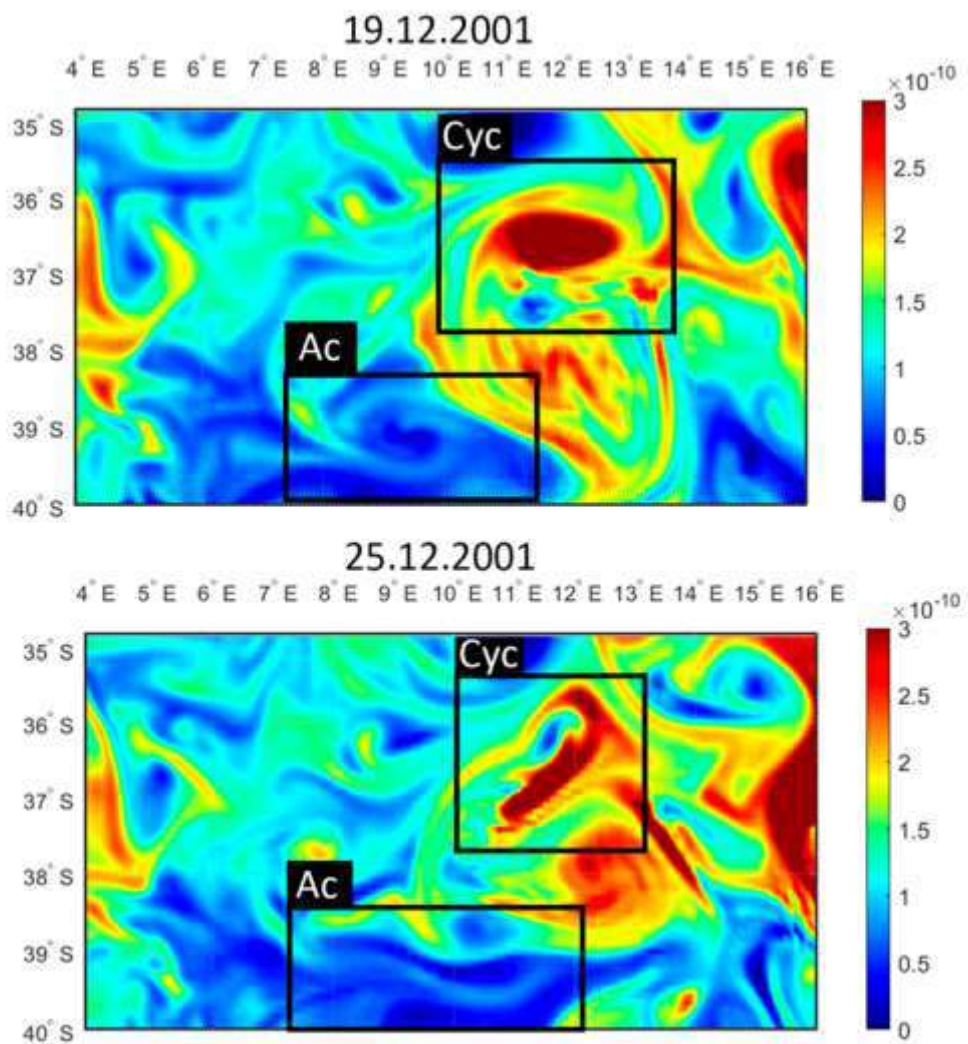


Рисунок 5.9. Потенциальная завихренность по Эртелю ( $\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон (Ac) и циклон (Cyc). Горизонт наблюдений 200 м.

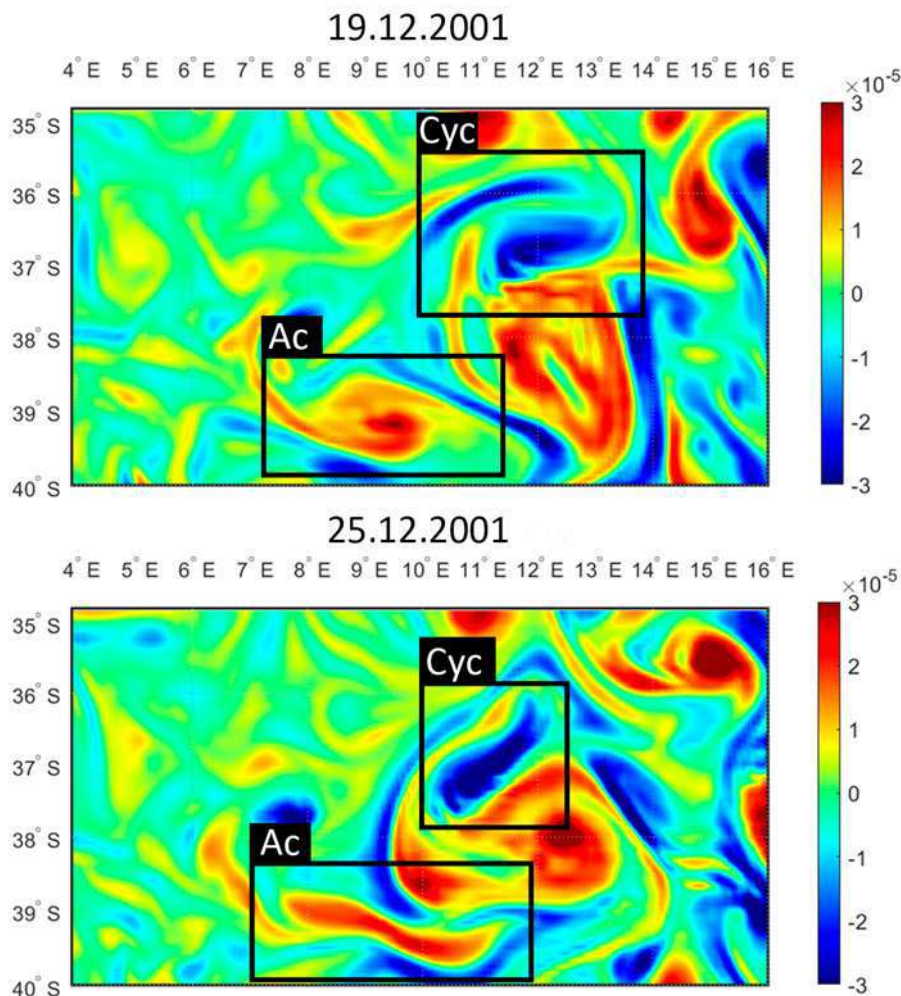


Рисунок 5.10. Относительная завихренность ( $\text{с}^{-1}$ ) в начальный (19.12.2001) и конечный момент (25.12.2001) эволюции изначально круглых в горизонтальном плане вихрей в филаменты. Черными прямоугольниками выделены антициклон *Ac* (положительные значения) и циклон *Cyc* (отрицательные значения относительной завихренности). Горизонт наблюдений 200 м.

В работе Жмур и др. (Жмур и др., 2023с) рассматривается различное поведение мезомасштабных вихрей при их взаимодействии с баротропным потоком. По данным океанического реанализа, используя параметры, которые описывают пространственную изменчивость фонового течения: угловую скорость вращения жидких частиц в фоновом течении ( $\gamma$ ) и коэффициент деформации фонового течения ( $\epsilon$ ), авторы проанализировали зависимость  $\gamma$  от  $\epsilon$  ( $\gamma/\epsilon$ ). По данному соотношению определяются области, где допустимо вытягивание вихрей в филаменты, и где такого

вытягивания не происходит. Применение данной теории к различным регионам Мирового океана представлено в работе (Жмур и др., 2023с).

На рис. 5.11 дано распределение коэффициентов  $\gamma/e$  в области Капской котловины на 25.12.2001, что соответствует конечной дате наблюдения за вихрями, их максимальному вытягиванию. Если соотношение  $|\gamma/e| \leq 1$  справедливо в каком-то районе, то в этом районе разрешено неограниченное вытягивание вихрей. В другом случае при  $|\gamma/e| > 1$  вытягивание запрещено. Если в зоне разрешено неограниченное вытягивание вихрей, то часть имеющихся вихрей вытянутся в филаменты. На рис. 5.11 красный цвет соответствует областям, где вытягивание вихрей в филаменты запрещено, синий цвет — где разрешено неограниченное вытягивание вихрей. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей (см. рис. 5.9 и 5.10). Можно увидеть, что там, где происходит вытягивание антициклонического вихря (центр вихря), область окрашена голубым цветом, то есть вытягивание разрешено. Обе же части, на которые вихрь разделился, напротив окрашены красным, они не вытягиваются. В зоне циклона наблюдается та же ситуация: вытягивающийся центр вихря окрашен в синий, а части вихря, которые в итоге при вытягивании отделяются от материнского вихря, обозначены красным. Таким образом, мы наблюдаем вытягивание вихрей и дальнейшее преобразование их в вихри меньших масштабов. При этом происходит перераспределение энергии с мезомасштаба на субмезомасштаб.

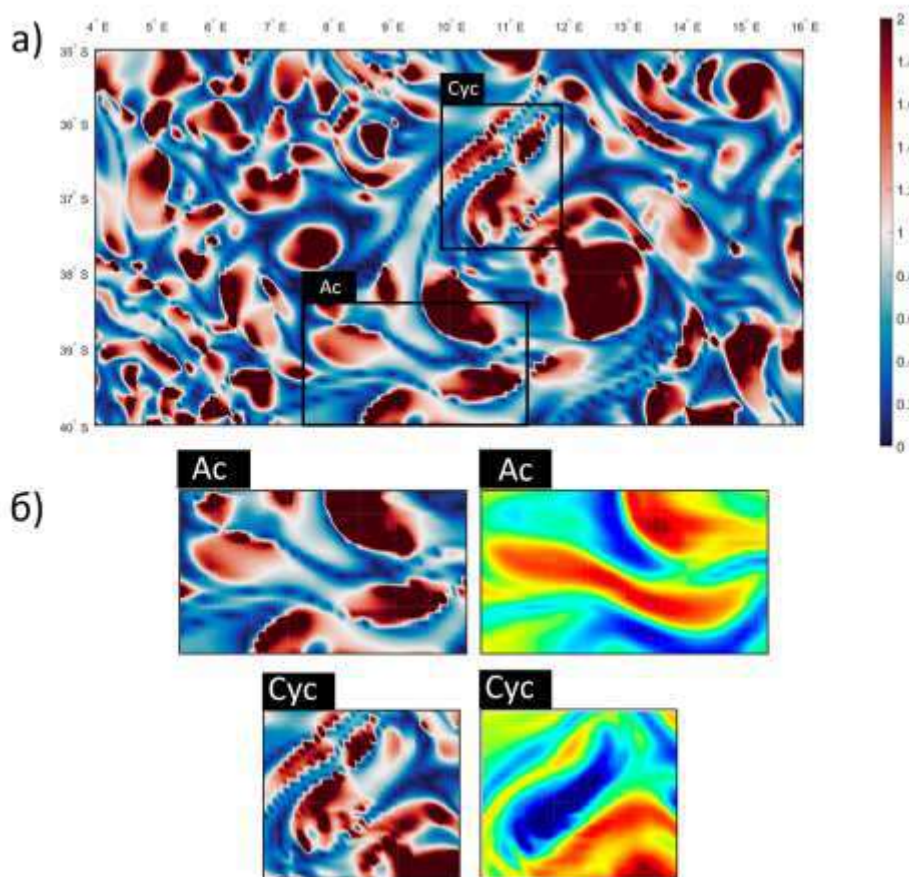


Рисунок 5.11. Распределение коэффициентов  $\gamma/e$  ( $s^{-1}$ ) в районе Капской котловины на 25.12.2001. Горизонт 200 м. Черными прямоугольниками обозначены области расположения выбранных для анализа вихрей. *Ac* — антициклон, *Cyc* — циклон (а); б) — приближенные фрагменты вихрей в поле коэффициентов  $\gamma/e$  (слева) в сравнении с теми же вихрями в поле относительной завихренности (справа).

Основными параметрами, характеризующими вытянутость вихрей, являются безразмерный параметр вытянутости  $\varepsilon = \frac{a}{b} \geq 1$  и эффективный радиус  $r_0 = \sqrt{ab}$ , где  $a$  — большая горизонтальная полуось вихря,  $b$  — малая горизонтальная полуось. На рисунке 5.12 представлен график изменения  $\varepsilon$  и  $r_0$  по мере вытягивания вихрей. На начальный момент времени  $\varepsilon = 1$  для *Ac* и 1,2 для *Cyc*, так как вихри практически круглые. При вытягивании вихрей параметр вытянутости растет, так как длина значительно превосходит ширину, эффективный радиус в свою очередь растет на 17 % для антициклона и на 6 % — для циклона.

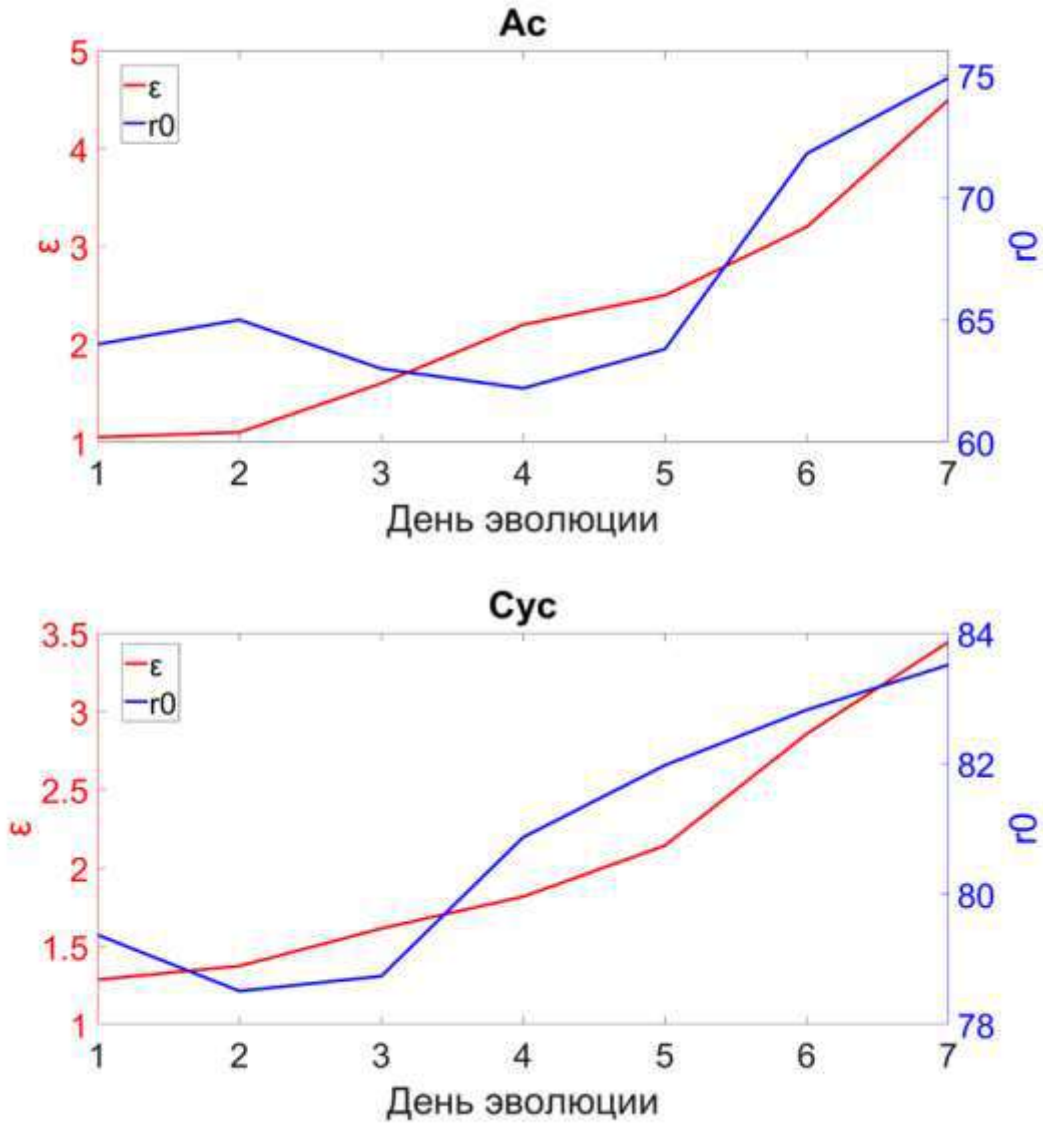


Рисунок 5.12. Безразмерный параметр вытянутости вихрей (горизонтально)  $\epsilon$  (красным) и их эффективный радиус (синим). Антициклон — *Ac*, *Cyc* — циклон. По оси  $x$  показаны дни эволюции вихря от начала наблюдений с 19.12.2001 по 25.12.2001 гг.

На рис. 5.13 представлены графики безразмерного параметра вертикальной сплюснутости ядра вихря  $K = \frac{N c}{f r_0}$ , где  $c$  — вертикальная полуось вихря, и частоты

Вяйсаля-Брента ( $N$ ). Видно, что параметр  $K$  согласован с частотой Вяйсаля-Брента. В течение эволюции вихрей параметры пропорционально растут. Увеличение частоты Вяйсаля-Брента связано с усилением стратификации вод.



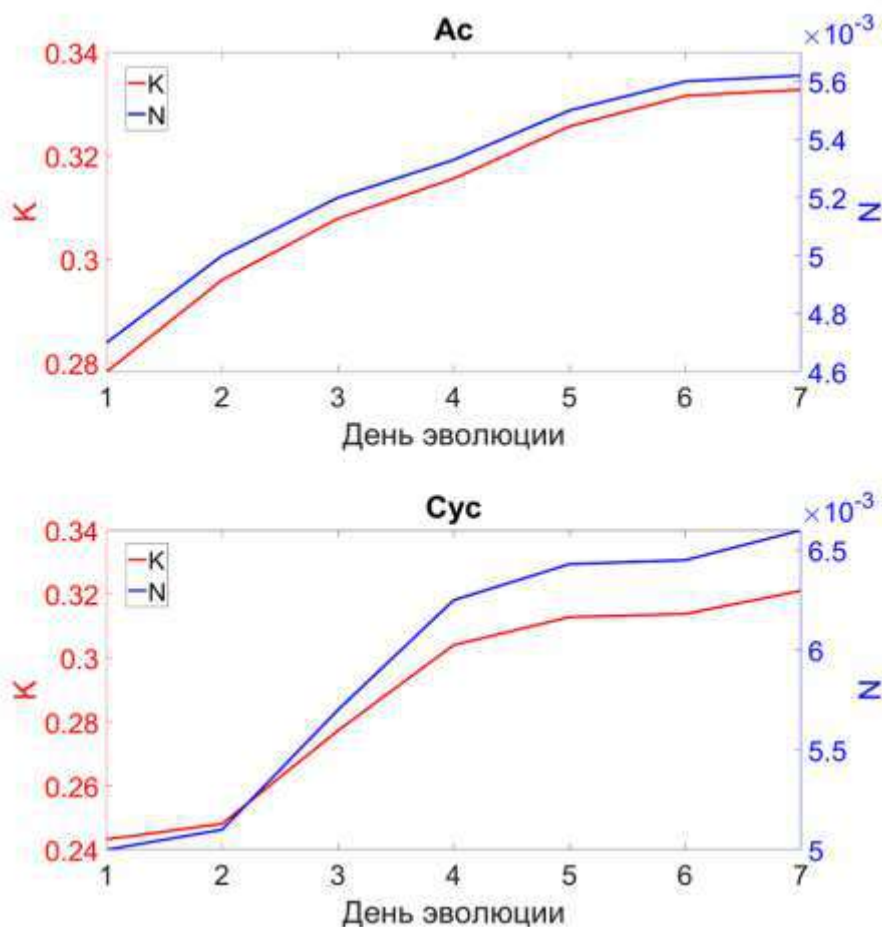


Рисунок 5.13. Безразмерный параметр вертикальной сплюснутости вихревого ядра (K) (красный цвет) и частота Вьясая-Брента (N) (синий цвет) вихрей (антициклон Ac и циклон Cys). По оси x показаны дни эволюции вихря в период с 19.12.2001 по 25.12.2001 гг.

Далее оцениваем потенциальную и кинетическую энергию двух вихрей отдельно. Потенциальная энергия рассчитывалась по формуле:

$$EP = 0,5 \iiint \left[ \frac{g^2}{\rho_0(z)} \frac{\rho^2(x, y, z)}{N^2(x, y, z)} dx dy dz \right], \quad (5.5)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $\rho = (\rho_\Sigma - \rho_0)$  – отклонение текущей плотности  $\rho_\Sigma$  от  $\rho_0$ . Масштабы вихря определяют границы интегрирования, а изолинии нулевой относительной завихренности определяют горизонтальные границы, вертикальные - от 0 до 1000 м.

Для кинетической энергии использовалась формула:

$$EK = 0,5 \iiint [\rho_{\Sigma}(x, y, z)(u^2(x, y, z) + v^2(x, y, z))] dx dy dz. \quad (5.6)$$

На рис. 5.14 видно, что потенциальная энергия антициклонического вихря на 3 порядка больше его кинетической энергии. С течением времени и при вытягивании формы антициклона энергия уменьшается. У циклонического вихря наблюдается та же ситуация: потенциальная энергия уменьшается по мере вытягивания вихря, причем кинетическая энергия на 1 порядок меньше потенциальной. Важно уточнить, что последний день наблюдений не является днем диссипации вихря, а является днем максимального вытягивания формы. Таким образом, с изменением формы циклонического и антициклонического вихря его кинетическая и потенциальная энергия убывает. Максимальные значения энергии соответствуют круглой форме вихрей обеих полярностей, а минимальные — вытянутой форме, что согласуется с теорией (например, Жмур и др., 2022).

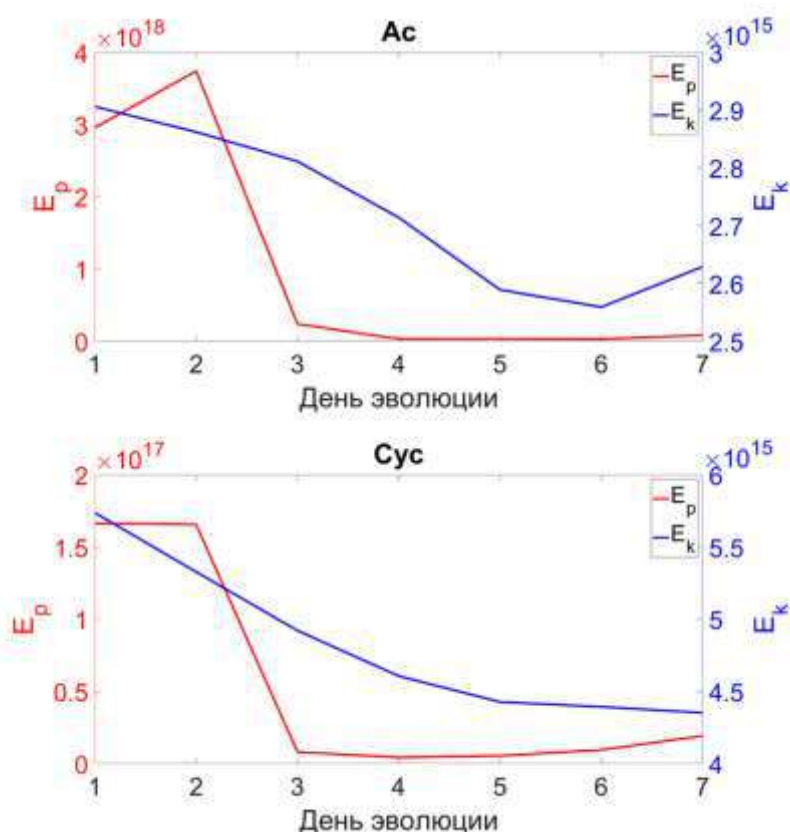


Рисунок 5.14. Доступная потенциальная (красный цвет) и кинетическая (синий цвет) энергия вихрей (Дж). По оси  $x$  показаны дни эволюции вихрей в период с 19.12.2001 по 25.12.2001 гг.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был проведен всесторонний анализ вихревой динамики южной части Атлантического океана. В исследовании представлены количественные оценки, статистический и Лагранжев анализ вихрей Агульясова переноса и Капской котловины. Также были вычислены всевозможные динамические и кинематические параметры вихрей: относительная и потенциальная завихренности, частота Вайсяля-Брента, пространственные размеры, доступная потенциальная и кинетическая энергия, термохалинные характеристики. Предложена альтернативная версия эволюции начальной стадии зарождения вихря Агульяса, которая позволяет объяснить практически прямолинейное перемещение вихрей Агульяса. Перейдем к основным результатам.

1. Проанализирована вертикальная структура вихря Агульясова переноса. На основе данных буев Argo показано, что температура и соленость в водах вихря выше средних значений в Южной Атлантике на  $5^{\circ}\text{C}$  и  $0.8-1$ , соответственно. Установлено, что вихрь, перемещаясь на значительные расстояния в западном направлении, сохраняет свои уникальные термохалинные характеристики в течение длительного времени. Показано, что оценка Агульясова переноса (расход) одним мезомасштабным вихрем в среднем составляет  $8.5 \text{ Sv}$ . Полученная оценка несколько ниже, чем указывается в литературных источниках, однако, подчеркнем: данная оценка относится к одному вихрю. Транспорт тепла и соли одним мезомасштабным вихрем Агульясова переноса составляет  $2.25 \cdot 10^9 \text{ Вт}$  и  $5.36 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$  соответственно. Теплосодержание и солесодержание в одном вихре Агульясова переноса –  $2.03 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$  и  $4.83 \cdot 10^{11} \text{ кг}$ , соответственно.

2. На основе данных реанализа GLORYS12V1 и алгоритма AMEDA был произведен Лагранжев анализ частиц вод. Показано, что главной особенностью исследуемой области является смешение частиц вод различного происхождения. Воды Южно-Атлантического круговорота взаимодействуют с водами Агульясова течения активнее, чем считалось ранее. Данный эффект смешения различных типов вод может повлиять на формирование двухмодовой структуры вихрей, описанной ранее в работе Guerra et al. (2022). Воды, которые несут вихри Агульясова переноса, происходят не только из самого Агульясова течения, но и из Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения. Частицы вод, распространяющиеся с запада и



юго-запада выделенного района, преодолевают сотни километров и заполняют исследуемый регион. Мы показали, что влияние Южно-Атлантического круговорота гораздо значительнее, чем считалось ранее. Частицы вод Южно-Атлантического круговорота распространяются в восточном направлении и преодолевают расстояние, превышающее 2700 км, в то время как в противоположном направлении (на запад) это расстояние составляет менее половины. Большинство вихрей в исследуемом регионе имеют радиус 40-50 км. Мы также показываем, что интегральная площадь антициклонов намного больше, чем интегральная площадь циклонов, несмотря на то, что количество отдельных циклонов со сроком жизни более 60 дней превышает количество долгоживущих антициклонов. Распределение продолжительности жизни вихрей подтверждает, что антициклоны имеют больший срок жизни, чем циклоны. Продолжительность жизни большинства вихрей составляет менее 100 дней. Однако некоторые вихри с наибольшей длиной траектории имеют продолжительность жизни более 500 дней. Мы также показываем, что термохалинные аномалии характеристик вихрей могут достигать  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 0,5\text{--}0,6$  psu. Этот эффект может влиять на формирование двухмодовых вихревых структур, описанных, но необъясненных в других исследованиях.

3. На основе данных массива автоматической идентификации и трекинга вихрей (МЕТА3.2) показано:

- Только антициклоны являются долгоживущими вихрями Агульса. Они перемещаются на северо-запад почти прямолинейно, преодолевая тысячи километров и пересекая Южную Атлантику;
- Характеристики вихрей (амплитуда, радиус, орбитальная скорость и скорость перемещения) значительно изменяются в течение их жизни. Мы не обнаружили явной зависимости от топографии и ослабления вихрей с течением времени. Наоборот, иногда происходит, казалось бы, необъяснимое кратковременное усиление вихря, которое, по-видимому, обусловлено бароклинным фактором. Возможность усиления также подтверждается выводами работы Early et al. (2011), где анализируется излучение волн Россби вихрем;
- Даны оценки зонального и меридионального смещения вихрей Агульса. Зональное смещение и, соответственно, зональная составляющая скорости перемещения, доминируют, однако на отдельных участках трека смещение

вихря к экватору сравнимо с зональным смещением. Меридиональное смещение варьируется в диапазоне 9 – 895 км;

- Мы установили, что чем больше скорость вихря, тем больше его меридиональное смещение в единицу времени;
- Вихри распространяются почти прямолинейно. Под влиянием топографии, особенно при пересечении хребтов, вихри меняют азимут направления, после чего снова распространяются прямолинейно;
- Существующие на сегодняшний день теории о вихрях Россби (Коротаев, 1997; Резник, 2010; Early et al., 2011) не дают адекватного объяснения феномену меридионального смещения вихрей Агульяса. По нашему мнению, основной проблемой неприменимости этих моделей к описанию феномена является игнорирование начальных значений. Хотя процесс формирования нами не рассматривается, проблема начальных значений обеспечивает физическое понимание динамики сильного вихря на  $\beta$ -плоскости. Эти причины должны играть существенную роль, по крайней мере, на начальных стадиях эволюции вихря;
- Единственная теория, которая согласуется с наблюдениями, это теория Лайтхилла (1967). Она позволяет объяснить узконаправленное угловое излучение длинных волн Россби незональными течениями;
- Мы предлагаем альтернативную версию эволюции начальной стадии зарождения вихря Агульяса, не отвергая иных сценариев для вихрей в других регионах Мирового океана. Первый этап зарождения и эволюции вихря мы предлагаем объяснять стадией узконаправленного излучения длинных волн Россби под совместным влиянием топографии и крупномасштабного незонального течения. Последующая динамика вихря, при больших временах, является сильно нелинейной, однако при этом выполняется закон сохранения потенциальной завихренности. В момент зарождения вихрь не только захватывает водную массу, но и приобретает некий поступательный и вращательный момент, которые являются функцией от скорости и направления крупномасштабного течения, топографии в точке формирования вихря. Именно этим можно объяснить практически прямолинейное перемещение вихрей Агульяса на северо-запад.

4. На основе массива данных автоматической идентификации вихрей META3.2 и данных океанического реанализа GLORYS12V1 проанализированы динамические характеристики вихрей Капской котловины. На примере двух разнополярных вихрей течения Агульяс показано, что вихри распространяются на запад, причем антициклон является более устойчивым и почти пересекает Атлантический океан в течение 1065 дней, в то время как циклон диссипирует через 123 суток после начала движения. Соответственно, антициклон прошел расстояние 4217 км, а циклон 438 км. Значения скоростей дрейфа различаются незначительно (5,8 и 5,7 см/с), как и радиусы (74 и 72 км).

Также проанализирована вертикальная структура вихрей. Показано, что для *Суs* аномалии изотерм и изохалин простираются до 1000 м, а для *Ac* — до 1200 м. Ядро *Ac* распространяется до глубины 800 м. Ядра вихрей отчетливо выделяются на разрезе ЧВБ. Ядро циклона, которому присуща однородная стратификация, характеризуется максимальными значениями ЧВБ ( $4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ), в отличие от ядра антициклона, в котором значения ЧВБ равны нулю, следовательно, стратификация отсутствует. Относительная завихренность также наглядно прослеживается в ядрах вихрей, максимальные положительные значения ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) наблюдаются в области циклона, максимальные отрицательные ( $-2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) — в области антициклона. Представлена оценка потенциальности завихренности на основе двух подходов: по формуле Эртеля и по формуле Россби. Показано, что в центре антициклона практически отсутствует стратификация, что способствует малым значениям потенциальной завихренности по Эртелю ( $0,6 \cdot 10^{-10} - 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). А в центре циклона большие значения частоты плавучести способствуют большим значениям *PV* ( $1,8 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Кроме того, в центре антициклона, где отрицательная относительная завихренность велика, *PV* близка к нулю. Минимальные (отрицательные) значения потенциальной завихренности по Россби достигают  $-2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и наблюдаются в области ядра *Ac*. Максимальные значения  $8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  расположены в области ядра *Суs*. Также наблюдается обмен потенциальной завихренностью между вихрями при их взаимодействии друг с другом.

Были исследованы кинематические характеристики вихрей. Рассматриваются мезомасштабные вихри Капской котловины различной полярности, которые в течение 7 дней изменяют свою форму, преобразовываясь в процессе эволюции в филаменты. Установлено, что в процессе деформации вихрей баротропным потоком

происходит изменение горизонтальных полуосей вихрей: большая полуось  $a$  неограниченно увеличивается, а малая  $b$  – значительно уменьшается. Вертикальный же размер вихрей остается неизменным. Вытянувшийся по горизонтали вихрь – филамент – хорошо наблюдается в поле относительной завихренности, так как в вытянутом ядре значения относительной завихренности – максимальны по модулю. За 7 дней эволюции вихри вытянулись так, что продольный масштаб в 4,5 раза превышает поперечный для антициклона и в 3,5 - для циклона. Вытягиваясь в филаменты, вихри теряют энергию: максимальные значения всех видов энергии соответствуют круглой форме вихрей, а минимальные – вытянутой форме. Таким образом, при увеличении параметра вытянутости  $\epsilon$  происходит уменьшение энергии: за 7 дней вытягивания вихрей потенциальная энергия уменьшается в 3 раза для антициклона и в 1,5 – для циклона, а кинетическая энергия в среднем уменьшается в 1,3 раза. Также при деформации вихрей пропорционально частоте Вейселя-Брента растет параметр вертикальной сплюснутости, что связано с усилением стратификации вод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Волны или вихри? // Вестник СПбГУ. 1998. № 21. С. 37–44.
2. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 215 с.
3. 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. № 3 (11). С. 9–18.
4. Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В. Спектральные характеристики волн Россби Северо-западной части Тихого океана // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43–52.
5. Беляков Л.Н., Волков В.А. Мезомасштабные подповерхностные течения в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 1985. № 389. С. 46–51.
6. Борисов А.В., Мамаев И.С. и Соколовский М.А. (ред.) Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 704 с.
7. Гневыхев 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. № 5 (55). С. 39–50. <https://doi.org/10.1134/S0001433819050074>.
8. Жмур В.В. Мезомасштабные вихри океана. Москва: ГЕОС, 2011. 384 с.
9. Жмур В.В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В., Суетин Б.П. Условия трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением // Океанология. 2023а. № 63 (2). С. 200—210. <https://doi.org/10.31857/S0030157423020144>.
10. Жмур В.В., Арутюнян Д.А. Перераспределение энергии при горизонтальном вытягивании океанских вихрей баротропными течениями // Океанология. 2023. № 63 (1). С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0030157423010185>.
11. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П. О вытягивании мезомасштабных вихрей в филаменты и распределении их на поверхности

- океана // Известия вузов. Радиофизика. 2023b. № 66 (2—3).  
[https://doi.org/10.52452/00213462\\_2023\\_66\\_02\\_104](https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_02_104).
12. *Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П.* Прямой и обратный каскад энергии при вытягивании вихрей в океане // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023c. № 508 (2). С. 270–274.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739722602113>.
  13. *Жмур В.В., Новоселова Е.В., Белоненко Т.В.* Потенциальная завихренность в океане: подходы Эртеля и Россби с оценками для Лофотенского вихря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. № 57 (6). С. 721–732.  
<https://doi.org/10.31857/S0002351521050151>.
  14. *Жмур В.В., Панкратов К.К.* Динамика мезомасштабного вихревого образования в поле течения крупного интенсивного вихря // Океанология. 1990. №30 (2). С. 170—178.
  15. *Жмур В.В., Травкин В.С., Белоненко Т.В., Арутюнян Д.А.* Трансформация кинетической и потенциальной энергии при вытягивании мезомасштабного вихря // Морской гидрофизический журнал. 2022. № 38 (5). С. 466–480.  
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-5-466-480>.
  16. *Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане, Л: Гидрометеиздат, 1982. 512 с.
  17. *Коротаев Г.К.* Структура и кинематика синоптических вихрей в океане: теория и современные наблюдения // Морской гидрофизический журнал. 2020. № 36 (6). С. 757–780. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-757-780>.
  18. *Кошляков М. Н., Белокопытов В. Н.* Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований // Морской гидрофизический журнал. 2020. № 36 (6). С. 613–627. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-613-627>
  19. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане в 2-х томах. М.: Мир, 1981. 846 с.
  20. *Леонов Ю.П.* Влияние топографии на вихри Агульясского течения: автореферат диссертации кандидата физико-математических наук. Институт океанологии имени П. П. Ширшова. 1995.
  21. *Мальшева А.А., Белоненко Т.В., Яковлева Д.А.* Характеристики двух вихрей различной полярности в течении Агульяс // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 478—493. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-68-478-493>
  22. *Мальшева А.А., Белоненко Т.В.* Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в Капской котловине //

- Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 684–699.  
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-684-698>
23. *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.
  24. *Мальшева А.А., Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В.* Оценка Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Арго // Исследование Земли из Космоса. 2020. № 2. С. 24—34.  
<https://doi.org/10.31857/S0205961420020049>.
  25. *Монин А.С., Жихарев Г. М.* Океанские вихри // УФН. 1990. № 160 (5). С. 1–47.  
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0160.199005a.0001>
  26. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
  27. *Незлин М.В.* Солитоны Россби // Успехи физических наук. 1986. № 150 (1). С. 1–58.
  28. *Педлоски Д.* Геофизическая гидродинамика: в 2-х томах. Москва: Мир, 1984. 820 с.
  29. *Резник Г. М.* Динамика локализованных вихрей на бета-плоскости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. № 46 (6). С. 846-860.
  30. *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. № 15 (5). С. 179–190. . <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-179-190>.
  31. *Травкин В.С., Жмур В.В., Белоненко Т.В.* Вклад мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины в ее энергетику // Российский журнал наук о Земле. 2022. № 22. ES4002. <https://doi.org/10.2205/2022ES000802>.
  32. *Федоров К.Н.* (ред.) Сборник статей «Внутритермоклинные вихри в океане». М: Академия наук СССР, 1986. 142 с.
  33. *Шакина Н.П.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л: Гидрометеоиздат, 1990. 312 с.
  34. *Arhan M., Mercier H., Lutjeharms J. R. E.* The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean // J. Geophys. Res. 1999. № 104. P. 20987–21005.  
<https://doi.org/10.1029/1998jc900047>

35. *Beal L.M., and Bryden H.L.* The velocity and vorticity structure of the Agulhas Current at 32°S // *J. Geophys. Res.* 1999. № 104 (C3). P. 5151–5176. <https://doi.org/10.1029/1998JC900056>
36. *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. № 104 (C4). P. 7897–7906. <https://doi.org/10.1029/1998JC900127>.
37. *Belonenko T.V., Zinchenko V.A., Gordeeva S.M., Raj R.P.* Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2020. № 20. P. ES6011. <https://doi.org/10.2205/2020ES000720>.
38. *Belonenko T.V., Budyansky M. V., Malysheva A. A., Udalov A. A.* Observing the Agulhas Leakage Source in the Water Mixing Area // *Pure Appl. Geophys.* 2023. № 180. P. 3401–3421. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03331-w>
39. *Benilov E.S.* Stability of a Two-Layer Quasigeostrophic Vortex over Axisymmetric Localized Topography // *Journal of Physical Oceanography.* 2005. № 35 (1). P. 123–130. <https://doi.org/10.1175/JPO-2660.1>.
40. *Biastoch A., Boning C.W., Lutjeharms J.R.E.* Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation // *Nature.* 2008. № 456. P. 489–492. <https://doi.org/10.1038/nature07426>.
41. *Biastoch A., Böning C.W., Schwarzkopf F.U., Lutjeharms J. R. E.* Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of southern hemisphere westerlies // *Nature.* 2009. № 462 (7272). P. 495–498. <https://doi.org/10.1038/nature08519>
42. *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. № 79. P. 1–8. <https://doi.org/10.1029/98EO00001>
43. *Boebel O., Rossby T., Lutjeharms J.R.E., Zenk, Walter and Barron C.* Path and variability of the Agulhas Return Current // *Deep Sea Research. Part II.* 2003. № 50. P.35—56. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00377-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00377-6).
44. *Bryden H.L., Beal L.M., Duncan L.M.* Structure and transport of the Agulhas Current and its temporal variability // *J. Oceanography.* 2005. № 61. P. 479–492. <https://doi.org/10.1007/s10872-005-0057-8>.
45. *Budyansky M.V., Prants S.V., Uleysky M.Y.* Odyssey of Aleutian eddies // *Ocean Dynamics.* 2022. № 72. P. 455–476. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01508-w>.



46. *Bunker A.F.* Surface energy fluxes of the South Atlantic Ocean // *Mon. Weather Rev.* 1988. № 116. P. 809–823. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<0809:SEFOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<0809:SEFOTS>2.0.CO;2)
47. *Byrne D.A., Gordon A.L., Haxby W.F.* Agulhas eddies: A synoptic view using geosat ERM data // *J. Phys. Oceanogr.* 1995. № 25, P. 902–917. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<0902:AEASVU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<0902:AEASVU>2.0.CO;2)
48. *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. № 109. P.6835–6839. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115545109>
49. *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. № 122 (9). P.7049–7065. <https://doi.org/10.1002/2017JC012969>
50. *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>.
51. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography.* 2011. № 91 (2). P. 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>.
52. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A.* Global observations of large oceanic eddies // *Geophys. Res. Lett.* 2007. № 34. L15606. <https://doi.org/10.1029/2007GL030812>.
53. *Cheng Yu., Putrasahan D., Beal L., Kirtman B.* Quantifying Agulhas leakage in a high-resolution climate model // *Journal of Climate.* 2016. № 29 (19). P. 6881–6892. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0568.1>.
54. *Curry J.A., and Webster P. J.* *Thermodynamics of Atmospheres and Oceans.* Academic Press, 1999. 467p.
55. *Cushman-Roisin B.* *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics.* N. J.: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1994. 313 p.
56. *Danabasoglu G., McWilliams J. C., Gent P. R.* The role of mesoscale tracer transports in the global ocean circulation // *Science.* 1994. № 264 (5162). P. 1123–1126. <https://doi.org/10.1126/science.264.5162.1123>

57. *de Ruijter W. P. M., Ridderinkhof H., Lutjeharms J. R. E., Schouten M. W.* Direct observations of the flow in the Mozambique channel // *Geophysical Research Letters*. 2002. № 29 (10). P. 140-1–140-3. <https://doi.org/10.1029/2001GL013714>.
58. *De Steur L., Van Leeuwen P. J., Drijfhout S. S.* Tracer leakage from modeled Agulhas rings // *Journal of Physical Oceanography*. 2004. № 34(6). P. 1387–1399. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034%3c1387:TLFMAR%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034%3c1387:TLFMAR%3e2.0.CO;2).
59. *Dencausse G., Arhan M., Speich S.* Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Res. Papers*. 2010. № 57 (11). P. 1406–1421. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.07.008>
60. *Dijkstra H. A. and de Ruijter W. P. M.* On the Physics of the Agulhas Current: Steady Retroflection Regimes // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. № 31. P.2971–2985. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2971:OTPOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2971:OTPOTA>2.0.CO;2)
61. *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. № 112. C05043. <https://doi.org/10.1029/2006JC003952>.
62. *Doglioli A. M., Veneziani M., Blanke B., Speich S., Griffa A.* Lagrangian analysis of the Indian-Atlantic interocean exchange in a regional model // *Geophysical Research Letters*. 2006. № 33. L14611. <https://doi.org/10.1029/2006GL026498>.
63. *Dong C., McWilliams J. C., Liu Y., Chen D.* Global heat and salt transports by eddy movement // *Nat. Commun.* 2014. № 5. P. 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms4294>
64. *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. № 31 (16). L16312. <https://doi.org/10.1029/2004GL020644>.
65. *Donohue E.A., Firing E., Beal L.* Comparison of the three velocity sections of the Agulhas Current and the Agulhas Undercurrent // *Journal of Geophysical Research*. 2000. № 105 (C12). P.28585 – 28593. <https://doi.org/10.1029/1999JC000201>.
66. *Drijfhout S. S., de Vries P.* Impact of eddy-induced transport on the Lagrangian structure of the upper branch of the thermohaline circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. № 33 (10). P. 2141–2155. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033%3c2141:IOETOT%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033%3c2141:IOETOT%3e2.0.CO;2).
67. *Duba C.T., Doyle T.B., McKenzie J.F.* Rossby wave patterns in zonal and meridional winds // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2014. № 108 (3). P. 237–257. <https://doi.org/10.1080/03091929.2013.867604>.

68. *Duncombe Rae C. M.* Agulhas retroflection rings in the South Atlantic Ocean: An overview // *South African Journal of Marine Science*. 1991. № 11 (1). P. 327–344. <https://doi.org/10.2989/025776191784287574>.
69. *Duncombe Rae C. M., Garzoli S. L., Gordon A. L.* The eddy field of the southeast Atlantic Ocean: A statistical census from the Benguela sources and transports project. *Journal of Geophysical Research*, 1996. № 101(11). P. 949–964. <https://doi.org/10.1029/95JC03360>.
70. *Durgadoo J. V., Ruhs S., Biastoch A., Boning C. W. B.* Indian Ocean sources of Agulhas leakage // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. № 122. P. 3481–3499. <https://doi.org/10.1002/2016JC012676>.
71. *Early J. J., Samelson R. M., Chelton D. B.* The Evolution and Propagation of Quasigeostrophic Ocean Eddies // *J. Phys. Oceanogr.* 2011. № 41. P. 1535–1555. <https://doi.org/10.1175/2011JPO4601.1>.
72. *Garzoli S. L., Gordon A. L.* Origins and variability of the Benguela current // *Journal of Geophysical Research*. 1996. № 101 (C1). P. 897–906. <https://doi.org/10.1029/95JC03221>.
73. *Garzoli S. L., Richardson P. L., Duncombe Rae C. M., Fratantoni D. M., Goñi G. J., Roubicek A. J.* Three Agulhas rings observed during the Benguela Current experiment // *J. Geophys. Res.* 1999. № 104. P. 20971–20986. <https://doi.org/10.1029/1999JC900060>
74. *Garzoli S.L., Goni G.J.* Combining altimeter observations and oceanographic data for ocean circulation and climate studies // *Elsevier Oceanographic Series*. 2000. № 63. P. 79–95. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(00\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(00)80006-9).
75. *Gill A.E.* *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 1982. 662p.
76. *Giulivi C.F., Gordon A.L.* Isopycnal displacements within the Cape Basin thermocline as revealed by the hydrographic data archive // *Deep Sea Res. Part I*. 2006. № 53. P. 1285–1300. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.05.011>.
77. *Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A.V.* On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. № 21. ES5003. <https://doi.org/10.2205/2021ES000773>
78. *Gnevyshev V.G., Badulin S.I., Belonenko T.V.* Rossby waves on non-zonal currents: structural stability of critical layer effects // *Pure Appl. Geophys.* 2020. № 177. P. 5585–5598. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02567-0>.

79. *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. № 55 (5). P. 412–422. <https://doi.org/10.1134/S0001433819050074>.
80. *Gnevyshev V.G., Shrira V.I.* Dynamics of Rossby wave packets in the vicinity of the zonal critical layer taking into account viscosity // *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Atmos. Okeana.* 1989a. № 25 (10). P. 1064–1074.
81. *Gnevyshev V.G., Shrira V.I.* Kinematics of rossby waves on non-uniform meridional current // *Okeanologiya.* 1989b. № 29 (4). P. 543–548.
82. *Gnevyshev V.G., Shrira V.I.* On the evaluation of barotropic-baroclinic instability parameters of the zonal flows in beta-plane // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 1989c. № 306 (2). P. 305–309.
83. *Gnevyshev V.G., Shrira V.I.* On the evaluation of barotropic-baroclinic instability parameters of zonal flows on a beta-plane // *J Fluid Mech.* 1990. № 221. P. 161–181. <https://doi.org/10.1017/S0022112090003524>.
84. *Gnevyshev V.G., Shrira V.I.* Transformation of monochromatic Rossby waves in the critical layer of the zonal current // *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz Atmos Okeana.* 1989d. № 25 (8). P. 852–862.
85. *Goni G. J., Garzoli S. L., Roubicek A. J., Olson D. B., Brown O. B.* Agulhas ring dynamics from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data // *Journal of Marine Research.* 1997. № 55(5). P. 861–883. <https://doi.org/10.1357/0022240973224175>.
86. *Gordon A. L.* Indian—Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflection // *Science.* 1985. № 227. P. 1030—1033. <https://doi.org/10.1126/science.227.4690.1030>.
87. *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. № 97 (C5). P. 7223—7240. <https://doi.org/10.1029/92JC00485>.
88. *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. № 5 (C3). P. 3117—3125. <https://doi.org/10.1029/JC095iC03p03117>.

89. *Gordon A.L., Lutjeharms J.R.E., Grundlingh M.L.* Stratification and circulation at the Agulhas retroflection // *Deep Sea Res. Part A.* 1987. № 34. P. 565–599. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90006-9).
90. *Guerra L. A. A., Mill G. N., Paiva A. M.* Observing the spread of Agulhas leakage into the Western South Atlantic by tracking mode waters within ocean rings // *Frontiers in Marine Science.* 2022. № 9. 958733. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.958733>.
91. *Guerra L. A. A., Paiva A. M., Chassignet E. P.* On the translation of Agulhas rings to the western South Atlantic Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2018. № 139. P. 104—113. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.08.005>.
92. *Hall C., Lutjeharms J.R.E.* Cyclonic eddies identified in the Cape Basin of the South Atlantic Ocean // *Journal of Marine Systems.* 2011. № 85. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.10.003>.
93. *Hall M. M, Bryden H. L.* Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport // *Deep Sea Res.* 1982. № 29. P. 339 – 359. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(82\)90099-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(82)90099-1)
94. *Haynes P., McIntyre M.* On the conservation and impermeability theorems for potential vorticity // *J. Atmos. Sci.* 1990. № 47 (16). P. 2021—2031. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2021:OTCAIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2021:OTCAIT>2.0.CO;2).
95. *Haynes P., McIntyre M.* On the evolution of vorticity and potential vorticity in the presence of diabatic heating and frictional or other forces // *J. Atmos. Sci.* 1987. № 44 (5). P. 828—841.
96. *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. <https://doi.org/10.1175/JCLI4154.1>
97. *Hutchings L., van der Lingen C. D., Shannon L. J., Crawford R. J. M., Verheye H. M. S., Bartholomae C. H., van der Plas A. K., Louw D., Kreiner A., Ostrowski M., Fidel Q., Barlow R. G., Lamont T., Coetzee J., Shillington F., Veitch J., Currie J. C., Monteiro P. M. S.* The Benguela Current: An ecosystem of four components // *Progress in Oceanography.* 2009. № 83 (1–4). P. 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.046>.

98. *Jayne S. R., Marotzke J.* The Oceanic Eddy Heat Transport // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. № 32. P. 3328 – 3345. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<3328:TOEHT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<3328:TOEHT>2.0.CO;2)
99. *Kamenkovich V. M., Leonov Y. P., Nechaev D. A., Byrne D. A., Gordon A. L.* On the influence of bottom topography on the Agulhas eddy. *Journal of Physical Oceanography.* 1996. № 26 (6). P. 892–912. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026%3c0892: OTIOBT%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026%3c0892: OTIOBT%3e2.0.CO;2).
100. *Kida S.* Motion of an Elliptic Vortex in a Uniform Shear Flow // *Journal of the Physical Society of Japan.* 1981. № 50 (10). P. 3517-3520. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.50.3517>.
101. *Korotaev G., Fedotov A.* Dynamics of an isolated barotropic eddy on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics.* 1994. № 264. P. 277–301. <https://doi.org/10.1017/S0022112094000662>.
102. *Korotaev G.K., Dorofeev V. L., Fedotov A.B.* Dynamics of an intensive isolated barotropic eddy in the presence of background vorticity // *Physical Oceanography.* 1997. № 8 (1). P. 1–8. <https://doi.org/10.1007/BF02522560>.
103. *Laxenaire R., Speich S., Alexandre S.* Evolution of the thermohaline structure of one Agulhas Ring reconstructed from satellite altimetry and Argo floats // *J. Geophys. Res: Oceans.* 2019. № 124. <https://doi.org/10.1029/2019JC015210>
104. *Laxenaire R., Speich S., Stegner A.* Agulhas ring heat content and transport in the South Atlantic estimated by combining satellite altimetry and Argo profiling floats data // *J. Geophys. Res: Oceans* 2020. № 125 (e2019JC015511). <https://doi.org/10.1029/2019JC015511>
105. *Lighthill M. J.* On waves generated in dispersive systems by travelling forcing effects, with applications to the dynamics of rotating fluids // *Journal of Fluid Mechanics.* 1967. № 27 (04). P. 725—752. <https://doi.org/10.1017/S0022112067002563>.
106. *Lord Kelvin.* Deep Sea Ship-Waves // *Proc. R. Soc. Edinburgh.* 1906. № 25 (2). P. 1060—1084. <https://doi.org/10.1017/S0370164600016771>.
107. *Lutjeharms J. R. E.* Three decades of research on the greater Agulhas Current // *Ocean Science.* 2007. №3. P. 129—147. <https://doi.org/10.5194/os-3-129-2007>.
108. *Lutjeharms J. R. E.* The Agulhas Current. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 329 p.

109. *Lutjeharms J. R. E., & van Ballegooyen R. C.* The retroflection of the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. № 18. P. 1570–1583. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018%3c1570:TROTAC%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018%3c1570:TROTAC%3e2.0.CO;2).
110. *Lutjeharms J. R. E., Valentine H.R.* Eddies at the SubTropical Convergence south of Africa // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. № 18. P. 761—774.
111. *Lutjeharms J.R.E., Gordon A.L.* Shedding of an Agulhas Ring observed at sea // *Nature* 1987. № 325 (6100). P. 138–140. <https://doi.org/10.1038/325138a0>
112. *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.
113. *Malysheva A. A., Kubryakov A. A., Koldunov A. V., Belonenko, T. V.* Estimating Agulhas leakage by means of satellite altimetry and argo data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. № 56. P. 1581–1589. <https://doi.org/10.1134/S0001433820120476>.
114. *Malysheva A. A., Belonenko, T. V., Budyansky M. V.* Lagrangian Method for Studying Agulhas Leakage in the Water Mixing Area // *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023)*. 2023. P. 111–117.
115. *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>.
116. *Matano R. P., Beier E. J.* A kinematic analysis of the Indian/Atlantic inter-ocean exchange // *Deep-Sea Research II*. 2003. № 50. P. 229–250. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00395-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00395-8).
117. *McDonagh E.L., Heywood K.J., Meredith M.P.* On the structure, paths, and fluxes associated with Agulhas Rings // *J. Geophysical Research: Oceans* 1999. № 104 (C9). P. 21007–21020. <https://doi.org/10.1029/1998JC900131>
118. *Morrow R., Birol F., Griffin D., Sudre J.* Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies // *Geophys. Res. Lett.* 2004. № 31. L24311. <https://doi.org/10.1029/2004GL020974>.
119. *Munk W.* *Achievements in Physical Oceanography. 50 Years of Ocean Discovery.* Washington, DC: National Academic Press. 2000, 300 p.
120. *Nencioli F., Dall’Olmo G., Quartly G.D.* Agulhas ring transport efficiency from combined satellite altimetry and argo profiles // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2018. № 123. P. 5874–5888. <https://doi.org/10.1029/2018JC013909>

121. *Nezlin M. V.* Rossby solitons (Experimental investigations and laboratory model of natural vortices of the Jovian Great Red Spot type) // *Sov. Phys. Usp.* 1986. № 29. P. 807-849.
122. *Nof D.* Strange encounters of eddies with walls // *J. Mar. Res.* 1999. № 57. P. 739–761.
123. *Olson D.B., Evans R.H.* Rings of the Agulhas current // *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers.* 1986. № 33 (1). P. 27–42. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(86\)90106-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(86)90106-8).
124. *Pedlosky J.* Geophysical fluid dynamics. New York: Springer-Verlag, 1987. 710 p.
125. *Pegliasco C., Delepouille A., Mason E., Morrow R., Faugère Y., Dibarboure G.* META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // *Earth Syst. Sci. Data.* 2022. № 14. P. 1087–1107. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1087-2022>.
126. *Prants S. V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* Lagrangian oceanography: Large-scale transport and mixing in the ocean. Springer-Verlag, 2017. 273 p.
127. *Prants S.V., Budyansky M.V., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Uleysky, M.Y.* Observation and Lagrangian analysis of quasistationary Kamchatka trench eddies // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2020. № 125 (6). e2020JC016187. <https://doi.org/10.1029/2020jc016187>.
128. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* How eddies gain, retain, and release water: A case study of a Hokkaido anticyclone // *Geophysical Research Letters.* 2018. № 123 (3). P. 2081–2096. <https://doi.org/10.1002/2017jc013610>.
129. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions // *Deep Sea Research Part i: Oceanographic Research Papers.* 2014. № 90. P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.04.012>.
130. *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 Research Part II.* 2003. № 50. P. 281–298. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00385-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00385-5).
131. *Reznik G. M., Dewar W. K.* An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the  $\beta$ -plane // *Journal of Fluid Mechanics.* 1994. № 69. P. 301–321. <https://doi.org/10.1017/S0022112094001576>.
132. *Reznik G.M.* Dynamics of singular vortices on a beta-plane // *Journal of Fluid Mechanics.* 1992. № 240. P. 405-432. <https://doi.org/10.1017/S0022112092000144>.



133. *Reznik G.M., Dewar W.K.* An analytical theory of distributed axisymmetric barotropic vortices on the  $\beta$ -plane // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994a. № 269. P. 301-321. <https://doi.org/10.1017/S0022112094001576>.
134. *Reznik G.M., Kizner Z.* SINGULAR VORTICES IN REGULAR FLOWS // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2010. № 24 (1-4). P. 65–75. <https://doi.org/10.1007/s00162-009-0150-5>.
135. *Reznik G.M., Tsybaneva T.B.* The effect of topography and stratification on planetary waves in the ocean // *Okeanologiya*. 1994b. № 34 (1) P. 1–9.
136. *Richardson P.L.* Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters // *Deep-Sea Res. Part I*. 2007. № 54 (8). P. 1361–1389. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.04.010>.
137. *Ruijter W.P.M., van Leeuwen P. J., Lutjeharms J. R. E.* Generation and evolution of Natal Pulses, solitary meanders in the Agulhas Current // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. № 29 (12). P. 3043–3055. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<3043:GAEONP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<3043:GAEONP>2.0.CO;2).
138. *Sandalyuk N. V., Belonenko T. V.* Three-Dimensional Structure of the mesoscale eddies in the Agulhas Current region from hydrological and altimetry data // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. № 21. ES4005. <https://doi.org/10.2205/2021ES000764>.
139. *Schmid C., Boebel O., Zenk W., Lutjeharms J. R. E., Garzoli S. L., Richardson P. L., Barron C.* Early evolution of an Agulhas Ring // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2003. № 50 (1). P. 141–166. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00382-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00382-X).
140. *Schmitz W. J.* On the interbasin-scale thermohaline circulation // *Reviews of Geophysics*. 1995. № 33 (2). P. 151–173. <https://doi.org/10.1029/95RG00879>.
141. *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. № 105 (C9). P. 21913–21925. <https://doi.org/10.1029/1999JC000046>.
142. *Shrira V.I., Townsend W.A.* Inertia-gravity waves beyond the inertial latitude. Part 1. Inviscid singular focusing // *J. Fluid Mech*. 2010. № 664. P. 478–509. <https://doi.org/10.1017/S0022112010003812>.
143. *Stewart R.H.* Introduction To Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University, 2006. 352 p.

144. *Stocker T. F.* Climate changes: from the past to the future — a review // *Int. J. Earth Sci.* 1999. № 88. P. 365–374. <https://doi.org/10.1007/s005310050271>.
145. *Stommel H.* The Gulf Stream. A physical and Dynamical Description. Univ. of California, 1965. 248 p.
146. *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. № 102 (C3). P.5513-5530. <https://doi.org/10.1029/96JC03455>
147. *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. № 50 (1). P. 251-280. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00396-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00396-X)
148. *van Sebille E., van Leeuwen 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 Modelling.* 2009. № 29. P. 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.05.005>.
149. *van Sebille E., van Leeuwen P.J.* Fast Northward Energy Transfer in the Atlantic due to Agulhas Rings // *J. Physical Oceanography.* 2007. № 37. P. 2305–2315. <https://doi.org/10.1175/JPO3108.1>.
150. *Walker N.D., Mey R.D.* Ocean/atmosphere heat fluxes within the Agulhas Retroflection region // *J. Geophysical Research: Oceans.* 1988. № 93. P. 15473–15483. <https://doi.org/10.1029/JC093iC12p15473>
151. *Wang Y., Olascoaga M. J., Beron-Vera F. J.* Coherent water transport across the South Atlantic // *Geophysical Res. Lett.* 2015. № 42 (10). P. 4072–4079. <https://doi.org/10.1002/2015GL064089>
152. *Weijer W., Sebille E.* Impact of Agulhas Leakage on the Atlantic Overturning Circulation in the CCSM4 // *J. Climate.* 2014. № 27. P. 101–110. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00714.1>.
153. *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. № 17 (12). P. 2088–2095. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.162>.
154. *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. № 117. C09009. <https://doi.org/10.1029/2012JC007936>.

155. *ys B., Stegner A., Arsouze T.* Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2018. № 35 (4). P. 739–762. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0010.1>