

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской Академии наук

На правах рукописи

Удалов Александр Алексеевич

# Свойства и лагранжевы анализ мезомасштабных вихрей в северо-западной части Тихого океана

1.6.17 – Океанология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

чл.-корр. РАН, профессор, д. ф.-м. н.

Пранц Сергей Владимирович

# Оглавление

|  |    |
|--|----|
| <b>Введение</b> . . . . .  | 5  |
| <b>Глава 1. Современные методы детектирования и лагранжева анализа мезомасштабных вихрей: обзор и синтез подходов.</b> . . . . | 26 |
| 1.1. Мезомасштабные вихри как ключевой элемент океанической динамики. . . . .  | 27 |
| 1.2. Современные подходы к идентификации мезомасштабных вихрей.  | 28 |
| 1.2.1. Физические методы . . . . .   | 29 |
| 1.2.2. Геометрические методы . . . . .   | 32 |
| 1.2.3. Лагранжевы методы . . . . .   | 35 |
| 1.2.4. Смешанные методы. Алгоритм AMEDA: теоретические основы и преимущества. . . . .  | 38 |
| 1.3. Методы анализа мезомасштабных вихрей . . . . .  | 46 |
| 1.3.1. Лагранжев анализ океанических течений и вихревых структур . . . . .   | 46 |
| 1.3.2. Характеристики и пространственные распределения . . .   | 55 |
| 1.3.3. Дополнительные методы верификации и анализа . . . . .   | 59 |
| 1.4. Применения комплексного метода анализа вихрей в различных регионах Мирового океана . . . . .                              | 61 |
| 1.5. Выводы к главе 1 . . . . .  | 62 |
| <b>Глава 2. Мезомасштабные вихри Курило-Камчатского желоба: статистика, эволюция и трансграничный перенос вод</b> . . . . .    | 64 |
| 2.1. Физико-географическая характеристика региона Курило-Камчатского желоба . . . . .  | 64 |
| 2.2. Перепись и пространственные распределения вихрей в 1993–2021 гг. . . . .  | 67 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 2.3.   | Содержание вод разного происхождения в вихрях ККЖ . . . . .  | 73  |
| 2.4.   | Синтез характеристик вихрей Курило-Камчатского желоба и их<br>роль в региональной динамике . . . . .       | 79  |
| 2.5.   | Выводы к главе 2 . . . . .   | 80  |
| <b>Глава 3. Мезомасштабные вихри Курильской котловины Охотского моря: перепись, свойства и влияние на внутрибассейновую циркуляцию . . . . .</b> |  |     |
| 3.1.   | Физико-географическая характеристика региона Курильской котловины . . . . .                                | 83  |
| 3.2.   | Перепись и пространственные распределения вихрей в 1993-2021 гг. . . . .                                   | 87  |
| 3.3.   | Состав и происхождение вод в вихрях Курильской котловины . .   | 98  |
| 3.4.   | Сравнение свойств вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского желоба . . . . .                        | 106 |
| 3.5.   | Выводы к главе 3 . . . . .   | 110 |
| <b>Глава 4. Многолетняя статистика, эволюция и роль мезомасштабных вихрей в водообмене северной части Японского моря . .</b>                     |  |     |
| 4.1.   | Физико-географическая и динамическая характеристика региона  | 112 |
| 4.2.   | Вихри Японского моря: статистика, распределение и механизмы формирования . . . . .                         | 116 |
| 4.3.   | Исследование вихрей в северо-западной части Японского моря. Лагранжев анализ и судовые измерения . . . . . | 127 |
| 4.3.1.   | Статистический обзор и кинематические характеристики вихрей . . . . .                                      | 127 |
| 4.3.2.   | Детальный анализ эволюции антициклонического вихря А в 2004 г. . . . .                                     | 132 |
| 4.4.   | Исследование вихрей в северо-восточной части Японского моря .  | 145 |
| 4.4.1.   | Статистика и пространственное распределение . . . . .  | 145 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.4.2. Регулярные вихревые структуры . . . . . | 150        |
| 4.5. Выводы к главе 4 . . . . .                | 151        |
| <b>Заключение . . . . .</b>                    | <b>154</b> |
| <b>Список литературы . . . . .</b>             | <b>158</b> |

# Введение

## Актуальность темы исследования

Исследованием Мирового океана человечество занимается уже на протяжении многих веков, начиная с первых океанографических экспедиций, таких как плавание на «Челленджере» (1872–1876), заложившем основы современной океанологии [154]. Хотя со временем находят ответы на старые вопросы, но количество новых загадок в этой области также растет. Задачи океанологии имеют важное значение не только с научной стороны, но и со стороны рационального использования ресурсов и пространства Мирового океана. Ярким примером является влияние вихрей на формирование высокопродуктивных рыбопромысловых зон, как в Курильском бассейне Охотского моря, где они способствуют обогащению вод биогенами [12; 55; 57]. В 2017 году Генеральная Ассамблея ООН провозгласила "Десятилетие наук об океане в интересах устойчивого развития (2021-2030)" [127]. Его цель — мобилизовать научное сообщество для генерации знаний, необходимых для защиты океана и его устойчивого использования. Это служит убедительным подтверждением того, что задачи океанологии являются глобальным приоритетом.

Исследование представленное в этой работе посвящено изучению мезомасштабных вихрей, которые повсеместно образуются в Мировом океане, одновременно занимая порядка трети его площади [21; 36]. Океанические мезомасштабные вихри (размером в диаметре 50-300 км и временем жизни от нескольких недель до нескольких лет) представляют собой ключевой элемент морской гидродинамики, играющий фундаментальную роль в переносе массы, импульса, тепла, соли, питательных веществ и углерода как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях [12; 150; 151]. Эти вихри действуют как эффективные “транспортные машины”, перенося водные массы и их свойства на значительные расстояния, что оказывает существенное влияние на формирование океанской циркуляции, климатических процессов и биологической продуктивности

[10; 39; 151].

До начала периода спутниковой альтиметрии изучение мезомасштабных вихрей было сопряжено со значительными трудностями. Исследование этих динамических структур велось, в основном, с помощью разреженной сети дрейфтеров (буев, свободно дрейфующих с течением) и контактных измерений с научно-исследовательских судов (например, с помощью зондов STD, измеряющих электропроводность, температуру и глубину)[150; 151]. Такие методы предоставляли ценные, но точечные и эпизодические данные. Ученые знали о существовании вихрей, однако не могли оценить их истинную распространенность, непрерывно отслеживать их траектории и жизненные циклы в глобальном масштабе [21; 62; 150; 151]. Открытие и систематическое изучение мезомасштабной вихревой активности, занимающей огромные площади океана, стало возможным лишь с развитием спутниковых технологий.

Использование спутниковой альтиметрии способствовало переходу от локальных исследований Мирового океана к глобальным. Этот подход позволяет проводить непрерывный мониторинг уровня моря с высокой точностью благодаря радиовысотомерам, установленным на искусственных спутниках Земли. Развитие этих технологий началось в 1970-х годах с миссий, таких как SEASAT и GEOS-3, а значительный прорыв был достигнут благодаря программе TOPEX/Poseidon, запущенной в 1992 году [100]. На основе альтиметрических данных на протяжении десятилетий происходит активное изучение мезомасштабных вихрей в океане, которые оказывают существенное влияние на транспорт и перемешивание водных масс [21; 24; 96].

Современный этап спутниковой альтиметрии, охватывающий более 30 лет непрерывных высокоточных измерений, характеризуется накоплением репрезентативных массивов данных, достаточных для проведения надежного статистического анализа. За это время был разработан и апробирован целый ряд автоматизированных алгоритмов для детектирования и отслеживания мезомасштабных вихрей по альтиметрическим картам уровня моря [17; 25; 43; 44;

60; 72; 82; 103]. Это позволило перейти от единичных наблюдений к формированию обширных баз данных и глобальных атласов вихревой активности, детально описывающих статистические свойства вихрей: их пространственное распределение, частоту возникновения, сезонную и межгодовую изменчивость, продолжительность жизни и траектории перемещения [21; 82].

Особую роль в исследовании вихрей играют лагранжевы методы, которые позволяют перейти от эйлерова описания полей скоростей к отслеживанию перемещений и трансформаций конкретных водных масс. В отличие от чисто статистического подхода, лагранжев анализ, включая построение карт происхождения вод (O-карт) и расчет траекторий виртуальных частиц, позволяет количественно оценить происхождение водных масс внутри вихря, его когерентность и способность к переносу тепла, соли, биогенов и загрязняющих веществ на значительные расстояния [44; 97]. Этот подход является ключевым для понимания роли вихрей в формировании гидрологической структуры и продуктивности морей. В частности, применение алгоритма AMEDA (Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm) [60] в сочетании с лагранжевым моделированием позволяет не только детектировать вихри, но и анализировать их жизненный цикл, включая такие сложные динамические процессы, как слияние и разделение вихрей, что крайне важно для оценки их реального вклада в перемешивание вод.

Однако накопленная информация выявила неоднородность и региональную специфику вихревых полей [21]. Если глобальная статистика заложила основу для понимания общей роли вихрей в океане, то фокус современных исследований сместился в сторону детального изучения их поведения и воздействия в конкретных акваториях, где процессы определяются сложным взаимодействием циркуляции, топографии дна, речного стока и атмосферных форсингов [64].

Таким образом, Японское и Охотское моря, а также прилегающая часть Тихого океана представляют собой идеальные природные лаборатории для изучения мезомасштабной изменчивости. Актуальность их детального исследова-

ния подчеркивается следующими факторами:

1. Наличием ярко выраженных фронтальных зон, таких как Субполярный фронт в Японском море, который разделяет субтропические и субарктические водные массы и является областью интенсивной генерации вихрей за счет бароклинной неустойчивости [88; 94; 161].
2. Сложной топографией (глубоководные котловины, шельфы, подводные горы и хребты), которая определяет особенности генерации, эволюции и диссипации вихрей, включая такие уникальные явления, как топографические вихри. В Охотском море и прилегающей акватории Курило-Камчатского желоба интенсивная вихревая активность обусловлена взаимодействием основных потоков с резкими перепадами глубин. Курило-Камчатский желоб является зоной преимущественной локализации долгоживущих вихрей: антициклоны и циклоны предпочтительно дрейфуют вдоль его оси, при этом желоб препятствует пересечению вихрями своего крутого склона из-за эффекта отражения вихрей ступенчатой топографией [16; 138]. Квазистационарные антициклонические вихри Камчатского желоба формируются в Камчатских заливах и надолго задерживаются над западным склоном желоба [92]. В Курильской котловине Охотского моря, где глубины превышают 3000 м, доминирование антициклонической завихренности связано с особенностями баротропной и бароклинной неустойчивости под воздействием приливного перемешивания у Курильских проливов [75]. Топографические волны, захваченные желобом, также модулируют дрейф вихрей [145; 162].
3. Влиянием вихрей на перенос тепла и биогенов, что критически важно для формирования продуктивных рыбопромысловых зон Дальнего Востока и регионального климата, а также для вентиляции промежуточных вод северной части Тихого океана [106; 119].

Несмотря на признанную важность вихрей в регионе, комплексных работ, объединяющих многолетнюю статистику вихревой активности, анализ их кинематических характеристик и лагранжевое моделирование переноса водных масс именно для Японского и Охотского морей в едином исследовании, до сих пор не проводилось. Существующие работы, как правило, сосредоточены либо на отдельных субрегионах, либо на одном из аспектов их изучения.

Таким образом, несмотря на общий прогресс в изучении мезомасштабных вихрей, комплексный лагранжевый анализ их свойств, кинематики и роли в переносе водных масс в данном конкретном районе до сих пор остается актуальной научной задачей. Ее решение методами, апробированными в настоящем исследовании (автоматическое детектирование вихрей по алгоритму AMEDA и последующий лагранжевый анализ), позволит не только лучше понять механизмы функционирования климатической системы Северо-Западной Пацифики, но и впервые дать количественную оценку вклада вихрей в формирование гидрологической структуры, перенос тепла и биогенов, а также выявить долгопериодные тренды в вихревой активности этих ключевых для России регионов.

**Цели и задачи диссертационной работы:** Целью диссертационной работы является комплексное исследование свойств, динамики и роли мезомасштабных вихрей в Японском и Охотском морях и прилегающей части Тихого океана на основе многолетних спутниковых альтиметрических данных с применением методов автоматического детектирования и лагранжевого анализа.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. За период с 1993 г. по настоящее время провести систематическую перепись мезомасштабных антициклонических и циклонических вихрей в Японском море, вдоль Курило-Камчатского желоба и в Курильской котловине Охотского моря с использованием автоматического алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA.
2. Выявить и охарактеризовать зоны повышенной вихревой активности в

изучаемых регионах, определить их связь с топографией дна и особенностями циркуляции.

3. Рассчитать и проанализировать кинематические характеристики мезомасштабных вихрей (время жизни, размеры, скорость переноса и вращения, параметр нелинейности и др.) и выявить их региональные особенности.
4. Исследовать динамику жизненного цикла вихрей, включая процессы их слияния и разделения, захвата и высвобождения воды, и оценить интенсивность вихревого взаимодействия в каждом регионе.
5. Количественно оценить состав вод различного происхождения в ядрах вихрей с использованием лагранжева метода отслеживания пассивных маркеров и проанализировать их сезонную и межгодовую изменчивость.
6. Оценить роль мезомасштабных вихрей в переносе тепла, соли и питательных веществ в изучаемых регионах.

### **Научная новизна**

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан и верифицирован оригинальный метод посуточной количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей, основанный на совместном применении автоматического алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA и лагранжева анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров. В отличие от существующих подходов, метод позволяет не только идентифицировать вихри, но и количественно оценивать вклад вод разного происхождения в их ядрах с суточным разрешением на протяжении всего жизненного цикла.
2. Впервые за период спутниковой альтиметрии (1993–2021 гг.) проведён систематический учёт долгоживущих мезомасштабных вихрей в Курило-Камчатском желобе. Количественно установлено, что даже в наиболее

юго-восточной части желоба доля трансформированных субтропических вод в ядрах вихрей не превышает 6%, что доказывает их преимущественно субарктическое происхождение и опровергает интуитивные представления о значительном проникновении субтропических вод в этот регион.

3. Впервые на основе спутниковых альтиметрических данных и лагранжевого анализа охарактеризована совокупность долгоживущих вихрей Курильской котловины Охотского моря. Вопреки устоявшимся представлениям, основанным на визуальных наблюдениях, показано количественное преобладание циклонических вихрей над антициклоническими (в 1.5 раза). Установлено, что ядра вихрей обоих знаков на 60–80% состоят из вод открытого океана с выраженным максимумом в холодный сезон.
4. В северо-восточной части Японского моря впервые выявлена и количественно охарактеризована устойчивая пространственная сегрегация антициклонических и циклонических вихрей (индекс Жаккара для наиболее интенсивных очагов составляет 1–3%). С помощью гидродинамических диагностик объяснены механизмы этой сегрегации и регулярного вихреобразования, связанные с динамикой пограничных течений и топографией.
5. Впервые на основе комплекса натуральных судовых измерений, спутниковой альтиметрии и лагранжевого анализа детально прослежена эволюция долгоживущего прифронтального антициклона в северо-западной части Японского моря. Количественно показано, что его ядро на 60–90% было заполнено субтропическими водами, которые сохранялись вплоть до разрушения вихря, что доказывает способность таких структур эффективно переносить субтропические воды через Субполярный фронт в субарктическую зону.

**Методология и методы исследования.**

Основу методологии данного исследования составляет комплексный подход, объединяющий методы спутниковой альтиметрии, автоматического детектирования и отслеживания вихрей (алгоритм AMEDA), лагранжевого анализа и верификации с помощью натуральных данных и численного моделирования. Работа выполнена в условиях обработки больших объёмов данных (Big Data): за 30-летний период использованы ежедневные глобальные поля спутниковой альтиметрии с пространственным разрешением до  $1/8^\circ$ , массивы траекторий дрейфующих буев Argo, а также результаты лагранжевого моделирования, включающего расчёт траекторий сотен тысяч виртуальных частиц. Обработка таких объёмов информации потребовала разработки специализированных вычислительных алгоритмов и эффективных методов визуализации.

1. Спутниковая альтиметрия. В качестве основного источника данных об уровне моря и геострофических течениях использовались продукты AVISO [6] (с разрешением  $1/4^\circ$  и  $1/8^\circ$ ) за периоды с 1993 по 2021 год для Охотского моря и вихрей Курило-Камчатского желоба, а также с 1993 по 2024 год для Японского моря. Эти альтиметрические данные прошли стандартную коррекцию, что делает их пригодными для статистического анализа мезомасштабной изменчивости.
2. Автоматическое детектирование и отслеживание вихрей. Для идентификации и анализа мезомасштабных вихрей применялся автоматический алгоритм AMEDA (Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm) [60]. Его ключевыми преимуществами являются:
  - Динамический подход, основанный на поиске экстремумов нормированного углового момента и замкнутых линий тока.
  - Возможность идентификации слияния и разделения вихрей, что критически важно для точной переписи.
  - Расчет ключевых кинематических характеристик: радиуса ( $R_{max}$ ),

скорости вращения ( $V_{max}$ ), параметра нелинейности ( $\eta = V_{max}/c$ , где  $c$  — скорость перемещения центра вихря), амплитуды и траектории.

- Открытый исходный код алгоритма, а также устойчив к разрешению сетки, использует минимальное число параметров и предоставляет полное описание динамической эволюции вихрей.

3. Лагранжев анализ. Для исследования происхождения водных масс и оценки их переноса вихрями использовался лагранжевый подход. Он заключался в расчете обратных во времени траекторий сотен тысяч виртуальных частиц в поле геострофических скоростей. Это позволило:

- Строить суточные "карты происхождения" вод, показывающие пространственное распределение водных масс разного генезиса.
- Количественно оценивать доли вод в пределах ядер вихрей.
- Исследовать сезонную и межгодовую изменчивость состава вод вихрей.

4. Верификация и дополнение результатов. Для проверки достоверности методов и углубленного анализа использовались:

- Данные натуральных измерений: архивы судовых гидрологических наблюдений (CTD-зондирования) и данные дрейфующих буев Argo.
- Результаты численного моделирования: вихреразрешающий реанализ GLORYS12V1 [38], который предоставляет непрерывные трехмерные поля температуры, солености и течений.
- Данные дрейфтеров: для визуализации и подтверждения траекторий течений и вихревых образований.
- Спутниковые данные дистанционного зондирования: изображения температуры поверхности океана (SST) со спектрорадиометра

MODIS [71] (Aqua/Terra) для независимой верификации пространственной структуры вихрей и идентификации связанных с ними термических аномалий.

Статистический анализ полученных результатов проводится с использованием различных подходов, включая построение гистограмм распределений, вычисление средних значений и их доверительных интервалов, корреляционный анализ. Такой комплексный методологический подход обеспечивает не только получение надежных и статистически значимых результатов, но и позволяет понять их динамическую природу, когерентность и роль в переносе водных масс, обеспечивая высокую надежность и научную ценность полученных результатов.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Научная значимость работы заключается в том, что полученные результаты вносят существенный вклад в понимание роли мезомасштабных вихрей в динамике и водообмене северо-западной части Тихого океана. Полученные данные о пространственно-временном распределении вихрей, их кинематических характеристиках и составе водных масс в их ядрах могут быть использованы для улучшения океанических моделей, включая параметризацию вихревых процессов в моделях, не разрешающих мезомасштабную изменчивость. Выявленные закономерности в формировании и эволюции вихрей способствуют развитию теории геофизической гидродинамики.

Практическая значимость работы обусловлена следующими аспектами:

1. Установленные закономерности пространственно-временного распределения вихрей могут использоваться для прогнозирования условий в рыбопромысловых районах, так как вихри часто создают благоприятные условия для концентрации планктона и рыбы.
2. Количественные оценки долей вод разного происхождения в ядрах вих-

рей могут быть использованы для улучшения прогнозов распространения экологически опасных веществ (нефтяных загрязнений, радионуклидов) в изучаемых регионах.

3. Результаты исследования могут быть применены при планировании научных экспедиций для отбора проб в областях с повышенной вихревой активностью.
4. Разработанные подходы и полученные базы данных о вихрях могут служить основой для системы оперативного мониторинга вихревой активности в регионе.

Таким образом, результаты диссертационной работы имеют как академическое значение для океанологии и геофизической гидродинамики, так и практическую значимость для рыбной промышленности, экологического мониторинга и океанографического прогнозирования в северо-западной части Тихого океана.

**Положения, выносимые на защиту.** На основе текста диссертации и полученных результатов можно сформулировать следующие положения:

- Разработан и верифицирован метод посуточной количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей, основанный на совместном применении алгоритма детектирования вихрей AMEDA и лагранжева анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров.
- Впервые количественно установлено, что долгоживущие вихри Курило-Камчатского желоба переносят преимущественно субарктические воды: даже в юго-восточной субзоне доля трансформированных субтропических вод в их ядрах не превышает 6%.
- Вопреки прежним представлениям, в Курильской котловине Охотского моря долгоживущие циклоны количественно преобладают над антициклонами (в 1.5 раза). Лагранжевым методом показано, что их ядра на 60-80% состоят из вод открытого океана с максимумом в холодный сезон.

- В северо-восточной части Японского моря выявлена устойчивая пространственная сегрегация антициклонов и циклонов (индекс Жаккара 1-3%). С использованием гидродинамических диагностик объяснены причины и механизмы этой сегрегации, а также регулярного вихреобразования в выделенных зонах.
- Лагранжев анализ измеренного в рейсе долгоживущего прифронтового антициклона в северо-западной части Японского моря показал, что 60-90% его ядра содержали субтропические воды вплоть до разрушения вихря.

### **Достоверность.**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается комплексным подходом, основанным на использовании проверенных данных и апробированных методов. Исследование базируется на обширных массивах спутниковой альтиметрии AVISO, предоставляемых службой Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) [6]. Эти данные прошли стандартную многоуровневую коррекцию, что делает их надежным источником информации об океанической динамике. Для детектирования и анализа вихрей применялся современный алгоритм AMEDA [60], хорошо зарекомендовавший себя в мировой научной практике и основанный на строгих динамических принципах. Важным аспектом обеспечения достоверности стала независимая верификация результатов. Так, выводы, сделанные на основе альтиметрии и лагранжевого моделирования, были успешно сопоставлены с натурными измерениями – данными дрейфующих буйев и судовых наблюдений, а также с результатами вихреразрешающего реанализа GLORYS12V1 [38]. Кроме того, идентифицированные вихревые структуры сопоставлялись с данными спутниковой радиометрии MODIS [71], что позволило подтвердить их термические сигнатуры и пространственную согласованность. Выявленные закономерности, такие как пространственное распределение вихрей и их кинематические характеристики, оказались внутренне непротиворечивыми и физически обоснованными. Кроме того, основные поло-

жения и выводы работы прошли строгое независимое рецензирование и были опубликованы в авторитетных научных журналах, что служит дополнительным подтверждением их надежности и научной ценности.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты были неоднократно отмечены на институтском уровне. Они вошли в перечень важнейших научных достижений Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН по итогам 2023 года [158] и включены в список важнейших результатов за 2025 год [160]. Работа, выполненная в 2024 году, также получила высокую оценку при рассмотрении ежегодного отчета института, что подтверждает стабильную значимость проводимых исследований [159].

Исследования, проводимые в рамках данной работы, были поддержаны грантами:

1. РНФ № 23-17-00068 «Лагранжевы фронты и вихри в дальневосточных морях России и в прилегающей части Тихого океана и их значение для биопродуктивности и рыбного промысла», 2023-2025 гг. (рук. чл.-корр. РАН С.В. Пранц).
2. РФФИ 20-05-00124 А «Лагранжево моделирование и краткосрочное прогнозирование распространения радиоактивного и нефтяного загрязнения в Японском и Охотском морях и в прилегающей части Тихого океана», 2020-2023 гг. (рук. чл.-корр. РАН С.В. Пранц)

Результаты, полученные в рамках выполнения данной работы, были отмечены наградами:

1. В 2024 г. стипендией Президента РФ для аспирантов и адъюнктов, обучающихся по очной форме обучения в российских организациях, осуществляющих образовательную деятельность, и проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Рос-

сийской Федерации, определенных в стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

### **Публикации.**

По теме диссертационного опубликовано **10** статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных, определяемых в соответствии с рекомендацией ВАК (категория К1).

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. *Udalov A.A., Budyansky M.V., Prants S.V.* A census and properties of mesoscale Kuril eddies in the altimetry era // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2023. — Vol. 200. — Art.no. 104129. (WoS, Scopus)
2. *Belonenko T.V., Budyansky M.V., Malysheva A.A., Udalov A.A.* Observing the Agulhas Leakage Source in the Water Mixing Area // Pure and Applied Geophysics. — 2023. — Vol. 180, Iss. 9. — P. 3401-3421. (WoS, Scopus)
3. *Udalov A.A., Budyansky M.V., Prants S.V., Didov A.A.* Census and properties of mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2024. — Vol. 212. — Art.no. 104374. (WoS, Scopus)
4. *Budyansky M.V., Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B., Prants S.V., Udalov A.A.* Evolution and Structure of a Mesoscale Anticyclonic Eddy in the Northwestern Japan Sea and Its Exchange with Surrounding Waters: In Situ Observations and Lagrangian Analysis // Ocean Dynamics. — 2024. — Vol. 74. — P. 901–917. (WoS, Scopus)
5. *Belonenko T.V., Budyansky M.V., Akhtyamova A.F., Udalov A.A.* Investigation of the Benguela upwelling eddies using Lagrangian modeling

- methods // *Ocean Dynamics*. — 2024. — Vol. 74, No. 5. — P. 373-390. (WoS, Scopus)
6. *Новоселова Е.В., Травкин В.С., Лебедева М.А., Удалов А.А., Будянский М.В., Белоненко Т.В.* Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. — 2024. — Т. 69, № 2. — С. 372-388. (WoS, Scopus)
  7. *Udalov A.A., Lobanov V.B., Prants S.V., Ladychenko S.Yu., Budyansky M.V., Salyuk A.N.* Census of mesoscale eddies in the Northwestern Japan Sea based on Lagrangian analysis and ship observations // *Progress in Oceanography*. — 2025. — Vol. 236 — Art.no. 103513. (WoS, Scopus)
  8. *Novoselova E.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Udalov A.A., Belonenko T.V.* Lagrangian Eddy Boundary Delineation Algorithm—LEBDA: A case study of the Lofoten Vortex // *Physics of Fluids*. — 2025. — Vol. 37. No. 7. — Art.no. 076657. (WoS, Scopus)
  9. *Demchenko A.Y., Budyansky M.V., Bashmachnikov I.L., Udalov A.A.* Lagrangian Analysis of Fast-Transported Recirculating Atlantic Water in the Fram Strait // *Oceanology*. — 2026. — Vol. 66. No. 1. — P. 10-19. (WoS, Scopus)
  10. *Udalov A.A., Prants S.V.* Mesoscale eddies in the northern Japan/East Sea: census, dynamics and properties // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2026. — Vol. 229. — Art.no. 104694 (WoS, Scopus)

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

1. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В. Перепись и свойства мезомасштабных курильских вихрей в 1993–2021 гг. // X всероссийская конференция

ция молодых ученых «Океанологические исследования», 24 — 28 апреля 2023, Владивосток.

2. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В. Мезомасштабные курильские вихри в эпоху альтиметрии: перепись и свойства. // VII Всероссийская конференция «Комплексные исследования Мирового океана», 15 — 19 мая 2023, Санкт-Петербург.
3. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В. Перепись и свойства мезомасштабных вихрей Курильской котловины Охотского моря в альтиметрическую эпоху. // XII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», 23 — 27 октября 2023, Москва.
4. Белоненко Т.В., Будянский М.В., Ахтямова А.Ф., **Удалов А.А.** Применение Лагранжевого моделирования для анализа вихревой динамики в районе Бенгельского апвеллинга. // Двадцать первая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 13 — 17 ноября 2023, Москва.
5. Будянский М.В., Новоселова Е.В., Травкин В.С., Лебедева М.А., **Удалов А.А.**, Белоненко Т.В. Особенности проявления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых гидрологических характеристик для северо-западной части тихого океана. // XII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», 23 — 27 октября 2023, Москва.
6. Будянский М.В., **Удалов А.А.**, Пранц С.В. Лагранжев анализ циркуляции вод в курильской котловине охотского моря на основе поля скорости по спутниковой альтиметрии. // XII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», 23 — 27 октября 2023, Москва.

7. Худякова С.П., **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Белоненко Т.В. Анализ изменчивости океанологических полей в районе алеутской гряды на основе лагранжева моделирования // VIII Всероссийская конференция «Комплексные исследования Мирового океана», 13 — 17 мая 2024, Владивосток
8. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В., Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю. Эволюция и структура мезомасштабного антициклонического вихря в северо-западной части Японского моря: натурные наблюдения и лагранжев анализ. // VIII Всероссийская конференция «Комплексные исследования Мирового океана», 13 — 17 мая 2024, Владивосток
9. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В. Перепись и свойства мезомасштабных вихрей вблизи восточного побережья Камчатки в альтиметрическую эру // XIII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», 28 октября по 1 ноября 2024, Москва
10. **Удалов А.А.**, Будянский М.В., Пранц С.В., Дидов А.А. Мезомасштабные вихри Курильской котловины Охотского моря в эпоху альтиметрии: перепись и свойства // XXII Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11 — 15 ноября 2024, Москва
11. **Удалов А.А.**, Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю., Будянский М.В., Пранц С.В., Салюк А.Н. Перепись мезомасштабных вихрей в северо-западной части Японского моря на основе Лагранжева анализа и судовых наблюдений // IX Всероссийская научная конференция "Моря России: приоритеты, практика, прогноз 22 — 26 сентября 2025, Севастополь
12. Демченко А.Ю., Будянский М.В., Башмачников И.Л., **Удалов А.А.** Лагранжев подход в исследовании рециркулирующих атлантических вод

в проливе Фрама // XI всероссийская конференция молодых ученых «Океанологические исследования», 26 — 30 мая 2025, Владивосток

13. **Удалов А.А.**, Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю., Будянский М.В., Пранц С.В., Салюк А.Н. Перепись и свойства мезомасштабных фронтальных вихрей в Северо-Западной части японского моря в 1993-2022 гг. // XI всероссийская конференция молодых ученых «Океанологические исследования», 26 — 30 мая 2025, Владивосток
14. Лебедева М.А., Будянский М.В., Пранц С.В., Лобанов В.Б., **Удалов А.А.**, Дидов А.А. Циклонические ринги и их влияние на перенос поперек струи продолжения Куроисио – наблюдение и моделирование // XI всероссийская конференция молодых ученых «Океанологические исследования», 26 — 30 мая 2025, Владивосток
15. Будянский М.В., **Удалов А.А.**, Улейский М.Ю., Белоненко Т.В. Сравнительный анализ вихревой динамики в Лофотенской котловине алгоритмами AMEDA (Adaptive Multi-scale Eddy Detection Algorithm) и НЕРТА (Hyperbolic and Elliptic Point Tracking Algorithm) на основе альтиметрических данных AVISO // XXII Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 10 — 14 ноября 2025, Москва
16. Новоселова Е.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю., **Удалов А.А.**, Белоненко Т.В. Анализ вентиляции вод Лофотенского вихря с применением лагранжева метода оконтуривания вихрей LEBDA на основе альтиметрических данных AVISO // XXII Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 10 — 14 ноября 2025, Москва

**Личный вклад автора.**

Личный вклад автора заключается в выполнении значительной части исследований, изложенных в диссертационной работе. Автором лично проводилось детектирование, отслеживание и составление переписи мезомасштабных вихрей по спутниковым альтиметрическим данным с использованием алгоритма AMEDA, включая адаптацию его параметров для акваторий северо-западной части Тихого океана. Им были рассчитаны и проанализированы все ключевые кинематические характеристики и статистические распределения свойств вихрей.

На основе данных лагранжевого моделирования автором была выполнена привязка обнаруженных вихрей к траекториям пассивных частиц и разработана методика интегрального анализа долей вод разного происхождения в ядрах вихрей. Автором выявлены и описаны зоны повышенной вихревой активности в северо-восточной части Японского моря, установлено, что долгоживущие вихри концентрируются вдоль оси Курило-Камчатского желоба, и определена асимметрия в распределении циклонических и антициклонических вихрей относительно желоба.

В исследованиях вихрей Курильского бассейна Охотского моря автором впервые показано преобладание циклонической полярности, что противоречит ранее существовавшим представлениям, а также выполнена интерпретация количественных оценок долей вод разного происхождения в ядрах вихрей. Анализ распределения водных масс разного происхождения в ядрах вихрей позволил изучить потенциальную роль этих образований в перераспределении питательных веществ в различных районах исследуемых морей.

Большая часть результатов была получена в рамках совместной работы, в которой автор непосредственно участвовал в планировании исследований, физической интерпретации данных, верификации выводов путем сравнения с натурными измерениями, а также в подготовке текстов научных публикаций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии.

Общий объем диссертации 177 страниц, из них 152 страницы текста, включая 61 рисунок. Библиография включает 162 наименования на 20 страницах.

### **Благодарность.**

Автор выражает искреннюю и глубокую признательность своему научному руководителю, члену-корреспонденту РАН, профессору, доктору физико-математических наук Сергею Владимировичу Пранцу. Его неоценимая помощь в постановке задач, всесторонняя поддержка на всех этапах работы, мудрые научные советы и внимание к деталям стали основой для выполнения данного диссертационного исследования.

Я сердечно благодарю своих коллег по лаборатории нелинейных динамических систем (ТОИ ДВО РАН). Особая благодарность – М.В. Будянскому и М.Ю. Улейскому за плодотворное сотрудничество, обучение тонкостям лагранжева моделирования, помощь в освоении алгоритмов и ценные идеи, без которых эта работа не состоялась бы. Спасибо всем сотрудникам лаборатории за поддержку, дружескую атмосферу и готовность прийти на помощь в любой момент.

Я благодарен своим соавторам из Санкт-Петербургского государственного университета – в частности, Т.В. Белоненко и её коллегам. Совместная работа над статьями, острые дискуссии и обмен опытом существенно обогатили это исследование и позволили выйти на новый уровень понимания вихревой динамики.

Автор глубоко признателен коллегам из Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, в особенности В.Б. Лобанову, за плодотворное обсуждение результатов, предоставленные данные натурных наблюдений и многолетний опыт, который помог взглянуть на результаты моделирования с позиций реальной океанологии. Хочу также поблагодарить весь коллектив института за создание творческой научной среды и возможность проведения исследований на высоком уровне.

Отдельную, самую тёплую благодарность я выражаю своей бабушке Уда-

ловой Т.Ф. за её бесконечное терпение, понимание, поддержку и веру в меня, которые вдохновляли и помогали преодолевать этот трудный путь на всём его протяжении – от студенческих лет до завершения работы над диссертацией.

## Глава 1

# Современные методы детектирования и лагранжева анализа мезомасштабных вихрей: обзор и синтез подходов.

Мезомасштабная вихревая активность признана одним из фундаментальных факторов, определяющих динамику, перенос и перемешивание вод в Мировом океане [21; 150; 151]. Эти структуры, эффективно транспортирующие тепло, соль, биогены и растворенные вещества, оказывают непосредственное влияние на климатические процессы и продуктивность морских экосистем [10; 12; 39]. Однако их количественная оценка и отслеживание жизненных циклов долгое время оставались сложной задачей.

Прорыв в этой области связан с развитием спутников, которые обеспечили непрерывный глобальный мониторинг Мирового океана. Это позволило перейти от единичных наблюдений к созданию обширных статистических баз данных и разработке автоматизированных алгоритмов детектирования вихрей. Среди них ключевое место занимают методы, основанные на анализе аномалий уровня моря (например, глобальный атлас МЕТА3.2 [82]), а также более современные кинематические подходы, такие как алгоритм AMEDA [60], который точнее определяет динамические границы вихрей и отслеживает их эволюцию, включая слияния и разделения.

Вторым важнейшим методологическим прорывом стало широкое применение лагранжева подхода [97]. В отличие от «мгновенных» эйлеровых полей, лагранжев анализ, основанный на траекториях виртуальных частиц, позволяет реконструировать происхождение водных масс, оценить степень их захвата вихрем и количественно определить вклад вихрей в перенос на большие расстояния. Комбинация точного детектирования вихрей (AMEDA) с лагранжевым

моделированием их водного содержимого формирует мощный инструментарий для решения современных задач физической океанологии.

Цель данной главы — систематизировать эти современные методологические подходы, обосновать выбор комплексного метода для данного исследования и кратко охарактеризовать их применение в смежных работах, что заложит основу для последующего анализа роли вихрей в регионе Японского и Охотского морей и прилегающей части Тихого океана.

## 1.1. Мезомасштабные вихри как ключевой элемент океанической динамики.

Теоретические основы изучения мезомасштабных вихрей заложены в работах [21; 35; 150; 151]. Эти когерентные структуры, характеризующиеся замкнутой циркуляцией водных масс, играют фундаментальную роль в перераспределении энергии и вещества. Их ключевые кинематические характеристики включают радиус (обычно 25–150 км), время жизни (от нескольких недель до нескольких лет), вращательную и трансляционную скорости.

Одним из важнейших динамических параметров, определяющим способность вихря захватывать и удерживать водные массы, является параметр нелинейности ( $\eta = V/c$ , где  $V$  — вращательная скорость,  $c$  — трансляционная скорость). При  $\eta > 1$  вихрь считается нелинейным и способным к эффективному адвективному переносу. Исследования в северо-западной части Тихого океана показывают, что подавляющее большинство долгоживущих вихрей (более 90%) имеют параметр нелинейности  $\eta > 1$  [123; 124; 126]. Другим ключевым параметром является параметр Россби ( $Ro$ ), который определяет степень влияния вращения Земли на динамику вихря.

Физическая природа мезомасштабных вихрей связана прежде всего с бароклинной и баротропной неустойчивостью крупномасштабных течений (например, Куроисио), которые развиваются при наличии вертикальных и горизонталь-

ных градиентов скорости и плотности [81; 97; 109]. Важную роль в генерации и эволюции вихрей играет взаимодействие с топографией дна. Топографические возвышенности и желоба могут действовать как «направляющие русла» для вихрей, а также генерировать их за счет сохранения потенциальной завихренности при обтекании неровностей рельефа [90; 123; 126].

По полярности вихри делятся на антициклонические (вращение по часовой стрелке в Северном полушарии) и циклонические (против часовой стрелки). По происхождению выделяют вихри фронтальные, топографические, транзитные и квазистационарные [90; 126; 150; 151]. Следует отметить, что эти классы не являются взаимоисключающими. Например, исследования в северо-западной части Японского моря выявили вихри с уникальной многослойной структурой ядра и сложным происхождением водных масс [124], что указывает на их смешанную природу и формирование в результате взаимодействия нескольких процессов.

Роль мезомасштабных вихрей в океане многогранна. Они являются основным переносчиком тепла, соли и биогенных элементов в горизонтальном направлении, внося существенный вклад в формирование климата [13; 64]. В вертикальной плоскости циклонические вихри, поднимая изопикны, способствуют выносу питательных веществ в эвфотическую зону, стимулируя биологическую продуктивность и формируя высокопродуктивные рыбопромысловые зоны [68; 102; 111]. Таким образом, мезомасштабные вихри выступают не только как динамические объекты, но и как важнейшие элементы климатической системы и экосистемы океана.

## **1.2. Современные подходы к идентификации мезомасштабных вихрей.**

Идентификация мезомасштабных вихрей представляет собой одну из ключевых задач современной физической океанографии. Учитывая их важную роль

в переносе тепла, соли, питательных веществ и формировании биологической продуктивности, разработка и сравнение эффективных методов их обнаружения являются критически важными для понимания динамики океана. На сегодняшний день существует множество разнообразных подходов к решению этой задачи, которые, однако, можно систематизировать в несколько основных классов [84].

В научной литературе традиционно выделяют физические, геометрические и смешанные методы. Физические подходы опираются на анализ динамических характеристик потока, таких как поля завихренности, деформации или аномалий уровня моря. В отличие от них, геометрические методы фокусируются на анализе пространственной структуры полей, идентифицируя вихри по специфической форме замкнутых изолиний. Смешанные методы комбинируют оба подхода для повышения точности и надежности детекции [84].

Особое место в этой системе занимают лагранжевы методы, которые основаны на анализе траекторий движения пассивных частиц в потоке. Данные подходы, часто рассматриваемые как самостоятельный класс, позволяют выявлять вихри как когерентные структуры, сохраняющие свой состав в течение определенного времени. К числу лагранжевых индикаторов относятся показатель Ляпунова за конечное время (FTLE) [83], Lagrangian-averaged vorticity deviation (LAVD) [1; 44], количество оборотов пассивных частиц вперед и назад во времени для определения R-contours [74] и другие параметры, анализирующие эволюцию траекторий. Эти методы служат важным инструментом для верификации результатов, полученных в более традиционной эйлеровой парадигме.

### 1.2.1. Физические методы

Физические методы идентификации мезомасштабных вихрей занимают центральное место в океанографических исследованиях, позволяя выявлять вращательные структуры на основе фундаментальных гидродинамических принципов. Эти подходы можно разделить на две взаимодополняющие категории:

методы, основанные на анализе полей уровня моря (SSH, SLA, ADT), и методы, использующие динамические критерии, такие как параметр Окубо-Вейсса и поле завихренности. Хотя при сравнительном анализе алгоритмов эти два подхода часто рассматриваются отдельно [136], в данной работе, следуя [84], мы объединяем их в рамках единой категории физических подходов, поскольку они обладают рядом схожих проблем и этапов реализации, включая чувствительность к шуму в исходных данных, а также необходимость выбора оптимальных пороговых значений для идентификации вихревых структур.

В основе методов, использующих высоту уровня моря и его аномалии, лежит геострофическое равновесие, согласно которому вихри проявляются как локальные экстремумы на картах уровня океана. Исторически развитие этих методов началось с подходов, основанных на фиксированных пороговых значениях. Так, в работе [45] для идентификации вихрей применялись локальные экстремумы SSH. Другие авторы использовали фиксированные значения аномалий: например, в исследовании [18] для выделения границ вихрей у побережья Южной Америки применялся порог в  $\pm 6$  см для SLA, а в работе [29] для мощных вихрей в Южной Индии порог был увеличен до  $\pm 10$  см. Современные алгоритмы на основе SLA (SSH) реализуют двухэтапный подход. На этапе идентификации происходит поиск локальных экстремумов в скользящем окне (обычно  $5 \times 5$  пикселей) с последующим определением границ вихря по внешнему замкнутому контуру. Этап отслеживания эволюционировал от визуального анализа к автоматизированным процедурам с использованием функций стоимости, учитывающих расстояние между центрами, завихренность и другие параметры. Важным преимуществом современных реализаций является отказ от строгих глобальных порогов в пользу адаптивных критериев, что позволяет учитывать региональные особенности океанической динамики [29].

В отличие от методов, опирающихся непосредственно на поля уровня моря, другая группа физических подходов фокусируется на анализе кинематических характеристик течения, полученных на основе этих полей. Эти методы

направлены на выделение областей, где вращательное движение доминирует над деформационным, что является ключевым признаком вихревой структуры. Наиболее распространенным критерием здесь служит параметр Окубо-Вейсса.

Параметр Окубо-Вейсса, предложенный [78] и развитый [132], представляет собой фундаментальный физический критерий, количественно оценивающий соотношение между деформационными и вращательными компонентами потока. Математически он определяется как  $W = (v_x + u_y)^2 + (u_x - v_y)^2 - (v_x - u_y)^2$ , где  $u$  и  $v$  — компоненты скорости. Для несжимаемой жидкости параметр упрощается до  $W = 4(v_x u_y - u_x v_y)$ , где отрицательные значения ( $W < 0$ ) указывают на доминирование вращательного движения. При применении к спутниковым данным этот метод требует предварительного сглаживания полей скоростей, так как чувствителен к шуму в исходных данных. Кроме того, выбор оптимального порогового значения остается субъективной процедурой. Как показано в работе [21], выбор слишком больших значений порога приводит к огрублению результатов и отсеиванию значительной части вихрей, в то время как слишком малые значения ведут к резкому увеличению количества идентифицированных структур и серьезной переоценке их размеров.

Первое применение этого параметра для автоматического обнаружения вихрей было выполнено [46], после чего метод получил широкое распространение в глобальных и региональных исследованиях. Альтернативным подходом является анализ относительной завихренности, предложенный в работе [65], где вихри определяются как связные области, ограниченные замкнутыми изолиниями завихренности эллиптической формы. Этот метод менее чувствителен к шуму, так как требует только первых производных скорости, но также требует дополнительной фильтрации для исключения ложных детекций и субъективной калибровки пороговых значений.

Несмотря на свои преимущества, оба подхода обладают фундаментальными ограничениями. Методы Окубо-Вейсса и относительной завихренности отличаются высокой чувствительностью к шуму, а методы на основе анома-

лий уровня моря (SLA) склонны преувеличивать размеры вихрей. В рамках этих подходов возникают трудности с выделением таких событий, как слияние и деление вихрей, которые играют ключевую роль в изучении их динамики. Выбор оптимальных пороговых значений остаётся субъективной процедурой, что приводит к недооценке или переоценке количества и характеристик вихрей в зависимости от региона [21]. К наиболее современным алгоритмам, основанным на физических подходах, относятся  $R^2$ -алгоритм [133], вейвлет-метод [25] и METAS.1exp [82]. Хотя область обнаружения вихрей активно развивается, метод Окубо-Вейсса не теряет актуальности. Его концептуальная простота обуславливает широкое применение как в чистом виде, так и в качестве фундамента для усовершенствованных алгоритмов, где его основные ограничения преодолеваются за счёт интеграции со статистическими подходами.

### 1.2.2. Геометрические методы

Геометрические подходы к идентификации мезомасштабных океанических вихрей основаны на анализе пространственной конфигурации изолиний гидродинамических полей без привязки к их абсолютным значениям. В отличие от физических методов, которые опираются на динамические параметры, геометрические алгоритмы фокусируются на форме и топологии структур, что обеспечивает их универсальность для различных океанических регионов.

К классическим методам этой группы относятся алгоритмы «Центров Кривизны» и «Угла Поворота» (Winding Angle), разработанные [103]. Алгоритм «Центров Кривизны» анализирует поле изолиний, вычисляя для каждой точки радиус кривизны. Основная гипотеза заключается в том, что у замкнутой изолинии, описывающей вихрь, центры кривизны для всех её точек будут совпадать. Если изолиния не замкнута, центры кривизны её различных участков не совпадут. Алгоритм «Угла Поворота» представляет изолинию в виде последовательности сегментов и вычисляет кумулятивную сумму углов между соседними сегментами. Критерием идентификации вихря служит условие  $|WA| \geq 2\pi$ , что

указывает на полный оборот и замкнутость контура.

Более современным и эффективным геометрическим методом считается алгоритм векторной геометрии, предложенный в работе [72]. Этот подход использует для определения центра вихря четыре ключевых критерия на поле аномалий скорости течений. Согласно алгоритму, вдоль широтного направления знаки меридиональной компоненты скорости ( $v$ ) по обе стороны от центра должны быть противоположны, а её абсолютная величина — монотонно возрастать с удалением от центра. Аналогично, вдоль меридионального направления знаки зональной компоненты ( $u$ ) противоположны, а её абсолютная величина монотонно возрастает. Критически важным является условие согласованности градиентов: направление изменения  $u$  должно совпадать с направлением изменения  $v$ , что обеспечивает замкнутость линий тока. Наконец, модуль вектора скорости должен достигать локального минимума в центре вихря и монотонно расти при удалении от него.

Для работы алгоритма задаются два параметра: параметр  $\mathbf{a}$  определяет размер области поиска локального минимума скорости, а параметр  $\mathbf{b}$  — размер области для проверки монотонного роста скорости (оба параметра задаются в количестве ячеек сетки). Для поля геострофических скоростей, используемого в исследовании, оптимальными значениями оказались  $a = 4$ ,  $b = 3$  [72]. Граница вихря в этом алгоритме определяется по полю функции тока. Поскольку поле скорости вихря слабо дивергентно, вектор скорости направлен по касательной к изолиниям функции тока. Границей вихря считается самая внешняя замкнутая изолиния, внутри которой тангенциальная скорость потока увеличивается при удалении от центра. Траектории вихрей отслеживаются во времени путём сопоставления их центров на последовательных временных шагах: центр вихря в момент  $t + 1$  должен находиться вблизи его положения в момент  $t$  и иметь ту же полярность (антициклоническую или циклоническую). Если связанный центр не найден на следующем шаге, зона поиска расширяется.

При оптимальных настройках алгоритм демонстрирует высокую эффек-

тивность, обнаруживая около 93% вихрей при доле ложных срабатываний всего 2.9% [72]. Его преимущества — относительная простота, интуитивность и способность выявлять вихри разного масштаба. Для повышения точности поле скорости AVISO часто интерполируется на более высокоразрешающую сетку перед обработкой.

В России развитие геометрических подходов представлено в работах [2; 140; 141], где предложили алгоритм автоматического выделения вихрей по спутниковым ИК-изображениям. Их метод, названный алгоритмом доминантной ориентации термического контраста, использует доминантную ориентацию градиента температуры как касательную к статистически значимой изотерме. При тонкой настройке параметров алгоритм обнаруживает до 94% вихрей, однако при неоптимальных параметрах возможно значительное число ложных обнаружений [140].

Сравнительные исследования показывают, что геометрические подходы, в частности алгоритм векторной геометрии, имеют преимущества перед физическими методами, такими как метод Окубо–Вейсса, поскольку позволяют избежать проблемы завышенной детекции в открытом океане [72]. Тем не менее геометрические методы не лишены недостатков: снижение точности в прибрежных зонах и вблизи островов, высокая вычислительная сложность, а также зависимость от качества данных о скоростях течений. Последнее особенно критично для альтиметрических данных, где расчёт скоростей по аномалиям уровня моря вносит дополнительные погрешности.

Современные приложения геометрических методов выходят за рамки простой идентификации. Благодаря возможности построения глобальных баз данных вихрей эти методы интегрируются с измерениями массива Argo для изучения вертикальной структуры вихрей, анализа их влияния на атмосферу и биологические процессы, а также для оценки переноса тепла и соли [26]. Эффективность геометрических алгоритмов подтверждается их успешным применением в региональных исследованиях, таких как работа [54], где на основе метода

векторной геометрии были детально изучены сезонная и межгодовая динамика вихрей в Черном море, а также их роль в переносе водных масс. Наибольший потенциал демонстрируют гибридные алгоритмы, комбинирующие геометрические и физические критерии, что позволяет создавать более надёжные и универсальные системы обнаружения мезомасштабных вихрей.

### 1.2.3. Лагранжевы методы

Лагранжев подход к идентификации мезомасштабных вихрей представляет собой качественно иной метод по сравнению с традиционными эйлеровыми подходами. Вместо анализа полей в фиксированных точках пространства, лагранжевы методы фокусируются на отслеживании траекторий пассивных частиц и анализе их поведения в потоке на протяжении определенного временного интервала. Как отмечают в работе [44; 97], этот подход позволяет выявлять вихри как когерентные структуры, сохраняющие свои свойства во времени, и дает возможность изучать их эволюцию и взаимодействие с окружающей средой.

Ключевыми инструментами в лагранжевой идентификации вихрей являются специальные индикаторы, рассчитываемые на основе траекторий частиц. Наиболее распространенными из них являются:

**Показатель Ляпунова за конечное время (FTLE)** — один из наиболее широко используемых лагранжевых индикаторов, который количественно характеризует скорость расхождения близких траекторий частиц. Области с положительными значениями FTLE соответствуют гиперболическим точкам (границам вихрей), а области с нулевыми значениями — эллиптическим точкам (центрам вихрей). FTLE и связанные с ним методы, такие как FSLE (Finite-Size Lyapunov Exponent), широко применяются в океанографии для идентификации лагранжевых когерентных структур [4; 42; 87; 93].

**Лагранжево среднеквадратичное отклонение завихренности (LAVD)** — объективный метод идентификации когерентных вихрей, предложенный Халлером и соавторами [44]. В отличие от традиционных эйлеровых

подходов, анализирующих мгновенные поля скорости, LAVD основан на траекториях частиц жидкости за конечный интервал времени.

Для двумерного течения на интервале  $(t_0, t_1)$  величина LAVD определяется как среднее отклонение завихренности вдоль траектории лагранжевой частицы:

$$\text{LAVD}_{t_0}^{t_1}(x_0, y_0) = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} |\zeta'(X(x_0, y_0, t), Y(x_0, y_0, t), t)| dt,$$

где  $(X, Y)$  — положение частицы, выпущенной из точки  $(x_0, y_0)$ , а  $\zeta'$  — отклонение мгновенной относительной завихренности от пространственного среднего по всей области.

Физический смысл метода заключается в том, что все жидкие частицы на материальной границе когерентного вихря должны вращаться вокруг его ядра с одинаковой средней угловой скоростью, подобно твердому телу. LAVD измеряет среднюю интенсивность локального вращения каждой частицы: более высокие значения соответствуют более быстрому вращению. Локальный максимум LAVD указывает на центр вихря, а его граница определяется как самая внешняя замкнутая изолиния LAVD, окружающая этот центр. Следует подчеркнуть, что объективность метода относится именно к инвариантности получаемого поля LAVD относительно выбора системы координат, тогда как выбор конкретной замкнутой изолинии в качестве границы вихря (например, с использованием порогов по выпуклости и когерентности) остается исследовательской задачей и может варьироваться в зависимости от целей анализа.

**Lagrangian descriptors** — этот метод был разработан как альтернатива FTLE и позволяет эффективно идентифицировать устойчивые и неустойчивые многообразия в потоках различной сложности. Lagrangian descriptors демонстрируют высокую точность в различных сценариях потока и относительно низкую вычислительную сложность, что делает их привлекательными для широкого применения [66; 83].

**Алгоритм LEBDA (Lagrangian Eddy Boundary Delineation Algorithm)** — лагранжев метод определения динамических границ мезомасштабных вихрей, предложенный Новоселовой и соавторами [74]. В отличие от традиционных эйлеровых подходов, анализирующих мгновенные поля скорости, LEBDA использует информацию о движении жидких частиц за определенный временной интервал, что позволяет избежать резких, физически необоснованных изменений границ и обеспечить временную согласованность при отслеживании эволюции вихревых структур.

Основная идея метода заключается в построении так называемых R-контуров на основе анализа вращения пассивных маркеров. Для равномерной сетки частиц в области локализации вихря выполняется расчет траекторий вперед и назад во времени на фиксированный интервал  $T$  (в работе выбран  $T = 15$  дней, что соответствует характерному синоптическому масштабу). Для каждой частицы определяется число полных оборотов  $R$ , совершаемых ее вектором скорости относительно начального направления. Граница вихря (черный контур на R-картах) определяется как область, внутри которой частицы совершают в сумме не менее двух полных оборотов — один при движении вперед по времени и один при движении назад. Математически это можно выразить как:

$$R_{total}(x_0, y_0) = R_{forward}(x_0, y_0) + R_{backward}(x_0, y_0) \geq 2,$$

где  $R_{forward}$  и  $R_{backward}$  — число оборотов частицы, выпущенной из точки  $(x_0, y_0)$ , при интегрировании вперед и назад на интервал  $T$ .

Физический смысл метода заключается в идентификации области устойчивого вращательного движения, где частицы не просто однократно вовлекаются в вихрь, а демонстрируют когерентное поведение как до рассматриваемого момента времени, так и после него. Использование двух направлений интегрирования позволяет отделить ядро вихря и его периферию от кратковременных возмущений и учесть частицы, которые лишь временно взаимодействуют с вихревой структурой.

Ключевыми преимуществами LEBDA являются: (1) временная согласованность — границы изменяются плавно, без скачков, характерных для эйлеровых методов; (2) способность фильтровать кратковременные возмущения и выделять именно когерентную структуру; (3) возможность изучать тонкие динамические процессы, такие как образование филаментов на периферии вихря, которые существенно увеличивают периметр при незначительном изменении площади, что указывает на интенсивный обмен веществом с окружающей средой. Выбор интервала  $T = 15$  дней и критерия двух оборотов обеспечивает баланс между детальностью описания и устойчивостью идентифицируемых границ, делая метод эффективным инструментом для анализа долгоживущих вихревых структур в нестационарных океанических течениях.

В рамках лагранжева подхода вихревые структуры рассматриваются как перемещающиеся массы воды, которые формируются и эволюционируют в процессе движения в океане. Центры вихрей определяются как эллиптические точки (устойчивые стационарные точки двумерного поля скорости), а области неустойчивости на границе вихрей ассоциируются с гиперболическими точками (неустойчивыми стационарными точками двумерного поля скорости) [97; 157]. Одним из ключевых преимуществ лагранжева подхода является возможность обратной адвекции частиц во времени при сохранении полей скорости. Этот метод позволяет исследовать происхождение водных масс в изучаемой области или внутри вихрей, что невозможно в рамках эйлерова подхода. Как отмечают исследователи, "уникальная особенность экспериментов с лагранжевыми частицами — возможность сохранения всей истории траекторий виртуальных частиц" [123].

#### **1.2.4. Смешанные методы. Алгоритм AMEDA: теоретические основы и преимущества.**

Смешанные методы идентификации мезомасштабных вихрей представляют собой комплексный подход, объединяющий преимущества физических и гео-

метрических критериев для преодоления ограничений, присущих алгоритмам, основанным лишь на одном из этих принципов. Среди наиболее совершенных и физически обоснованных методов этого класса выделяется алгоритм AMEDA (Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm), разработанный [60]. Его теоретическая основа и поэтапная процедура обнаружения и отслеживания вихрей заслуживают детального рассмотрения.

## Теоретические основы и детальная процедура алгоритма AMEDA

Алгоритм AMEDA основан на последовательном выполнении четырех основных этапов: 1) обнаружение центров вихрей, 2) вычисление характеристических контуров и динамических параметров, 3) отслеживание вихрей во времени и 4) идентификация событий слияния и разделения.

На первом этапе AMEDA использует физический параметр — локальный нормированный угловой момент (Local Normalized Angular Momentum, LNAM). Для каждой точки сетки  $G_i$  вычисляется величина:

$$\text{LNAM}(G_i) = \frac{\sum_j (G_i X_j \times V_j)}{\sum_j G_i X_j V_j + \sum_j |G_i X_j| |V_j|} = \frac{L_i}{S_i + BL_i}, \quad (1.1)$$

где  $X_j$  и  $V_j$  — векторы положения и скорости в соседних точках,  $L_i$  — локальный угловой момент,  $BL_i$  — его верхняя граница, а  $S_i$  сумма скалярных произведений, которая велика в гиперболических точках и близка к нулю в эллиптических.

Этот параметр обладает ключевыми свойствами: в центре идеального осесимметричного вихря он достигает экстремальных значений  $+1$  (для циклона) или  $-1$  (для антициклона), не зависит от интенсивности вихря и позволяет четко различать центры вращения и области сдвига.

Далее алгоритм отбирает кандидатов в центры вихрей как экстремумы поля LNAM, но только те, которые находятся внутри областей с преобладанием вращения над деформацией. Для этого выполняется фильтрация по локально-

му параметру Окубо-Вейсса (LOW), и отбираются точки, где  $|\text{LNAM}(\text{LOW} < 0)| \geq K$ , где  $K$  — пороговое значение (по умолчанию  $K = 0.7$ ).

Однако физического критерия недостаточно. Кандидат окончательно признается центром вихря только в том случае, если вокруг него существует *замкнутая линия тока* (геометрический критерий). Это гарантирует, что обнаруженная структура способна захватывать и переносить водные массы.

Для каждого подтвержденного центра вихря алгоритм находит все замкнутые линии тока, его окружающие. Для каждой такой линии вычисляются:

- **Усредненный радиус**  $\langle R \rangle = \sqrt{A/\pi}$ , где  $A$  — площадь, ограниченная контуром
- **Усредненная скорость**  $\langle V \rangle = \frac{1}{L_p} \oint V dl$ , где  $L_p$  — длина периметра контура

Среди всех контуров находится тот, на котором достигается максимальная усредненная скорость  $V_{\max}$ . Соответствующий радиус  $R_{\max}$  называется радиусом максимальной скорости. Именно этот контур считается характеристическим для вихря и определяет его размер и интенсивность.

На основе  $V_{\max}$  и  $R_{\max}$  вычисляются ключевые динамические параметры:

- **Вихревое число Россби**  $Ro = \frac{V_{\max}}{f \times R_{\max}}$ , где  $f$  — параметр Кориолиса
- **Время оборота вихря**  $\tau_e$ , из которого оценивается относительная завихренность ядра  $\frac{\zeta(0)}{f} = \frac{4\pi}{f\tau_e}$

AMEDA также проводит классификацию на вихри (eddies) и гиры (gyres). Если скорость на внешних замкнутых контурах падает ниже 97% от  $V_{\max}$  ( $V_{\text{end}} \leq 0.97|V_{\max}|$ ), структура классифицируется как когерентный вихрь. Если нет — как гир, часто поддерживаемый внешним потоком.

Для построения траекторий AMEDA использует усовершенствованный метод глобального назначения с *функцией стоимости*, которая учитывает не

только минимальное расстояние между центрами вихрей в последовательные моменты времени, но и их физическое сходство.

Функция стоимости  $e_{ji}$  для пары вихрей  $e_j$  (в момент  $t - 1$ ) и  $e_i$  (в момент  $t$ ) имеет вид:

$$e_{ji} = \sqrt{\left[\frac{d_{ij}}{D_{ij}(T_c)}\right]^2 + \left[\frac{\Delta R}{\langle R \rangle(j) + R(i)}\right]^2 + \left[\frac{\Delta Ro}{\langle Ro \rangle(j) + Ro(i)}\right]^2 + \left(\frac{1}{2T_c} dt\right)^2}$$

где  $d_{ij}$  — расстояние между центрами вихрей,  $D_{ij}$  — максимальное расстояние поиска,  $\Delta R$ ,  $\Delta Ro$  — разницы в радиусах и числах Россби,  $T_c$  — корреляционное время набора данных.

Для разрешения неоднозначных случаев применяется алгоритм Куна-Манкреса [56], который находит глобально оптимальное назначение, минимизирующее суммарную стоимость всех пар.

Это одна из самых сильных сторон AMEDA. Алгоритм способен детектировать сложные вихревые взаимодействия. Ключевым индикатором служит появление *характеристического общего контура* (*characteristic shared contour*) — замкнутой линии тока, которая окружает сразу два центра вихрей и на которой средняя скорость превышает  $V_{\max}$  хотя бы одного из исходных вихрей.

- **Слияние** регистрируется, если два независимо отслеживаемых вихря образуют общий контур, после чего один из них исчезает, а траектория второго продолжается.
- **Разделение** фиксируется, если из одного вихря, имеющего общий контур с вновь появившимся, образуются два независимых вихря.

Это позволяет точно определять моменты взаимодействия, строить ”генеалогические деревья” вихрей и более точно оценивать время их жизни и перенос ими водных масс.

## Преимущества алгоритма AMEDA

Благодаря своей многоэтапной и физически обоснованной процедуре, AMEDA обладает рядом ключевых преимуществ:

- Устойчивость к разрешению сетки и минимальная настройка: Алгоритм использует всего два основных настраиваемых параметра ( $L_b/R_d$  и  $K$ ), оптимальные значения которых ( $L_b/R_d = 1.2$  и  $K = 0.7$ ) слабо зависят от типа данных. Тестирование показало, что ошибки в определении характеристик вихря не превышают 15-20% при  $R_{\max} > 2 dX$ .
- Физически обоснованное определение границ: Характеристический контур, основанный на максимуме окружной скорости, дает более реалистичную оценку размера и формы вихря по сравнению с полигональными контурами алгоритмов, основанных на аномалии уровня моря.
- Способность отслеживать сложные взаимодействия: Автоматическая детекция слияний и разделений критически важна для изучения долгоживущих вихрей и оценки их роли в переносе.
- Комплексная количественная характеристика: AMEDA предоставляет обширный набор кинематических и динамических параметров для каждого вихря, что открывает возможности для углубленного анализа их физики и сравнения с натурными измерениями.

Эффективность алгоритма AMEDA была многократно проверена на различных типах данных: на полях геострофических скоростей AVISO с разрешением  $1/8^\circ$ , на выходных данных численных моделей ROMS, а также на результатах лабораторных экспериментов с использованием изображений частиц в вращающемся резервуаре [8; 9; 13; 60; 74; 87; 123; 124]. Алгоритм успешно применялся для исследования вихрей в различных регионах Мирового океана, включая Алеутскую область [14], Курило-Камчатский желоб [126], а также северо-западную часть Тихого океана [157].

## Сравнение с другими смешанными алгоритмами

Среди других известных смешанных алгоритмов можно выделить:

Алгоритм Chelton [21] — один из первых глобальных алгоритмов, использующий комплексный подход к идентификации вихрей. Однако он имеет тенденцию к ложному слиянию близлежащих вихрей, что приводит к недооценке времени их существования.

Алгоритм МЕТА3.2 [82] — улучшенная версия алгоритма Челтона, использующая поля аномалий уровня моря и абсолютной динамической топографии. Хотя этот алгоритм обеспечивает более точное определение контуров, его контуры имеют искусственную полигональную форму из-за использования фиксированного числа точек, а также отсутствует отслеживание событий слияния и деления вихрей

Алгоритм Faghmous [29] — основанный на предпосылке о существовании единственного экстремума аномалии уровня внутри вихря. Этот алгоритм успешно идентифицирует все присутствующие на тестовых полях вихри, но требует сложной процедуры отбраковки ложных детекций.

## Алгоритмы на основе искусственного интеллекта

В последние годы методы искусственного интеллекта и машинного обучения занимают все более важное место в задачах идентификации мезомасштабных вихрей, особенно в регионах, где традиционные методы дают неудовлетворительные результаты. Особое значение эти подходы имеют для сложных арктических регионов, Marginal Ice Zone, а также прибрежных районов с высокой динамической активностью.

В Арктике применение стандартных методов детектирования вихрей на основе спутниковой альтиметрии сталкивается с серьезными ограничениями. Во-первых, размеры арктических вихрей значительно меньше по сравнению с вихрями в низких широтах, что делает их практически необнаруживаемыми

альтиметрическими полями. Как отмечают [7], типичный радиус арктических вихрей составляет 30–50 км, а пространственные масштабы менее 30 км практически не наблюдаются спутниковой альтиметрией. Во-вторых, наличие морского льда создает дополнительные сложности для интерпретации альтиметрических данных.

Для решения этих проблем все большее распространение получают методы, основанные на анализе спутниковых радиолокационных изображений с синтезированной апертурой (SAR). Однако визуальная интерпретация таких изображений требует значительных экспертных знаний и подвержена субъективным ошибкам. Автоматизация этого процесса с помощью алгоритмов глубокого обучения представляет собой перспективное направление исследований.

Ярким примером такого подхода является применение алгоритма YOLOv8 (You Only Look Once) для автоматического обнаружения вихрей в зоне краевого льда, описанное в работе [105]. В этой статье авторы демонстрируют, как модифицированная версия алгоритма компьютерного зрения может эффективно выявлять вихри различной полярности (циклонические и антициклонические) на изображениях SAR в сложных арктических условиях. YOLOv8 показывает преимущества перед предыдущими версиями алгоритмов благодаря улучшенной пространственной разрешающей способности и адаптивности к различным масштабам, что особенно важно для выявления субмезомасштабных структур. В других регионах методы ИИ также показывают впечатляющие результаты. Для прибрежных вод Южной Калифорнии были разработаны гибридные подходы, объединяющие YOLO с традиционными методами анализа [139].

Однако методы искусственного интеллекта имеют и существенные недостатки. Во-первых, они требуют больших объемов размеченных обучающих данных, получение которых часто является трудоемким процессом. Во-вторых, результаты работы нейронных сетей могут быть сложны для интерпретации с физической точки зрения. В-третьих, модели, обученные на данных одного региона, часто плохо переносятся на другие океанические акватории из-за раз-

личий в физических характеристиках вихрей и окружающей среды.

Тем не менее, перспективы развития методов на основе искусственного интеллекта выглядят многообещающими. Сочетание традиционных физических подходов с методами машинного обучения позволяет создавать гибридные системы детектирования вихрей, которые сохраняют физическую обоснованность при одновременном повышении точности и автоматизации процесса идентификации. Особенно перспективным направлением является интеграция алгоритмов ИИ с лагранжевыми методами анализа для изучения эволюции и транспорта свойств воды вихрями.

### **Обоснование выбора AMEDA для данного исследования**

Выбор алгоритма AMEDA для исследования мезомасштабных вихрей в Японском море, Курило-Камчатском желобе и Курильской котловине Охотского моря обусловлен несколькими факторами. Во-первых, необходимостью детального изучения долгоживущих вихрей в регионах с высокой динамической активностью. Во-вторых, возможностью алгоритма фиксировать события слияния и разделения вихрей, что позволяет получить более полное представление об эволюции вихревых структур. В-третьих, минимальной зависимостью от настраиваемых параметров обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов исследования.

Таким образом, алгоритм AMEDA представляет собой оптимальный выбор для комплексного исследования мезомасштабных вихрей в северо-западной части Тихого океана, сочетая физическую обоснованность, вычислительную эффективность и способность к детектированию сложных взаимодействий между вихрями.

### 1.3. Методы анализа мезомасштабных вихрей

#### 1.3.1. Лагранжев анализ океанических течений и вихревых структур

В лагранжевом подходе водные массы представляются совокупностью виртуальных пассивных частиц, траектории которых вычисляются в заданном поле течений [97]. Для расчётов используется поле скоростей AVISO с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  и суточным временным шагом [6].

Траектории частиц вычисляются интегрированием уравнений адвекции:

$$\frac{d\phi}{dt} = u(\phi, \lambda, t), \quad \frac{d\lambda}{dt} = v(\phi, \lambda, t), \quad (1.2)$$

где  $\phi$  и  $\lambda$  - широта и долгота частицы,  $u$  и  $v$  - угловые зональная и меридиональная компоненты скорости.

Для пространственно-временной интерполяции дискретных данных скорости используются:

- Бикубическая интерполяция в пространстве, обеспечивающая непрерывность производных
- Полиномы Лагранжа 3-го порядка для временной интерполяции [63]

Линейной пространственной интерполяции недостаточно, поскольку она обеспечивает непрерывность интерполирующей функции при пересечении границ ячеек сетки, но её производные разрывны на этих границах [97]. Бикубическая интерполирующая функция имеет 16 коэффициентов, но это позволяет нам получить более точные результаты. Интерполяция во времени намного проще пространственной, так как мы имеем дело с одномерной функцией. В работе [63] продемонстрировано для хаотических потоков, что бикубическая пространственная интерполяция вместе с полиномами Лагранжа третьего порядка во времени дает превосходную точность при очень скромных вычислительных затратах по сравнению с другими методами.

Интегрирование осуществляется по схеме Рунге-Кутты 4-го порядка [89; 97]. Связь между угловой и линейной скоростью задаётся соотношением:

$$u_{\text{угл}} = \frac{0.864}{1.853 \cdot \cos \phi} \cdot u_{\text{лин}}, \quad v_{\text{угл}} = \frac{0.864}{1.853} \cdot v_{\text{лин}} \quad (1.3)$$

где  $R = 6371$  км — радиус Земли,  $u_{\text{угл}}$  и  $v_{\text{угл}}$  выражаются в угловых минутах в день,  $u_{\text{лин}}$  и  $v_{\text{лин}}$  — в см/с [95].

## Классификация лагранжевых индикаторов и карт

- **Карты происхождения (О-карты).** О-карты представляют собой специализированный тип лагранжевых карт, визуализирующих географическое происхождение водных масс в исследуемой области [97]. Методика построения О-карт основана на обратном интегрировании траекторий виртуальных частиц. Исследуемая область покрывается плотной равномерной сеткой, где в каждом узле сетки размещается виртуальная частица-трасер. Для каждой такой частицы производится интегрирование уравнений адвекции в обратном времени на протяжённый период, который эмпирически устанавливается как достаточный для достижения удалённых регионов бассейна [9].

Ключевым элементом методики является определение граничных сегментов, которые соответствуют путям основных течений и потоков в регионе. Эти сегменты располагаются в местах входа характерных водных масс. В процессе обратного интегрирования фиксируется первый момент пересечения траекторией частицы одного из этих граничных сегментов, после чего дальнейшее интегрирование прекращается. Каждому такому сегменту присваивается уникальный цветовой код, и все частицы, достигшие данного сегмента, визуализируются на итоговой карте соответствующим цветом Рис. 1.1.

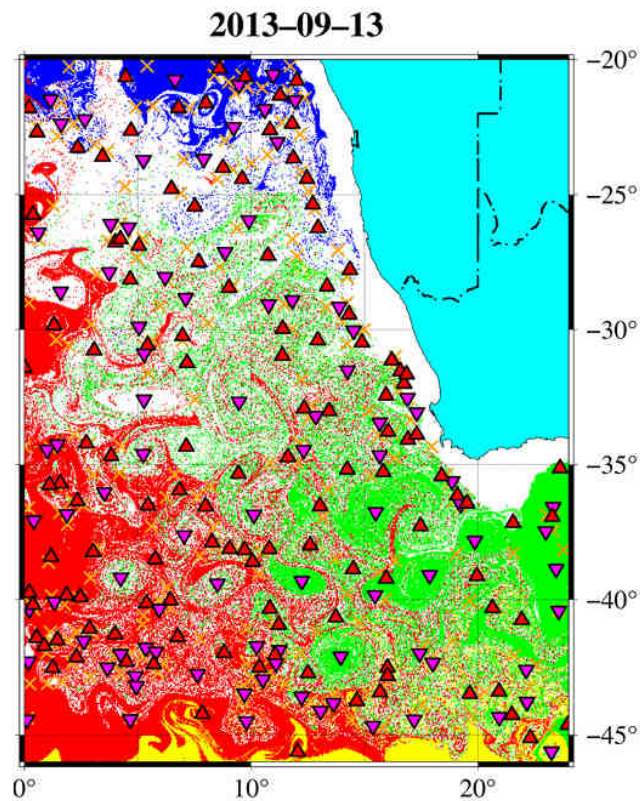


Рис. 1.1: Карта происхождения водных масс (О-карта) на 13 сентября 2013 года на глубине 266 м показывает водные частицы (поле скорости реанализа GLORYS12V1 [38]), окрашенные в зависимости от того, какую границу они пересекли в течение предыдущего года: зеленым цветом обозначены частицы, пересекшие меридиан  $25^\circ$  в.д. 365 дней назад, желтым — частицы, пересекшие параллель  $46^\circ$  ю.ш., красным — частицы, пересекшие нулевой меридиан, а синим — частицы, пересекшие параллель  $20^\circ$  ю.ш. При этом белый цвет указывает на маску шельфа, образованную границами пересечения дна на глубине 266 м и береговой линии, а также на частицы, не пересекшие ни одну из указанных границ. Также на карте отмечены центры вихрей красными треугольниками (циклоны, направлены вверх) и розовыми треугольниками (антициклоны, направлены вниз), а оранжевые кресты обозначают гиперболические точки неустойчивости. [9]

Результирующая О-карта представляет собой пространственное распределение цветовых маркеров, где каждый цвет указывает на конкретный

источник происхождения водных масс. Эта методика позволяет не только качественно оценить географическое происхождение вод, но и количественно анализировать долю вод различного генезиса в конкретных океанографических структурах, таких как вихревые образования, фронтальные зоны и другие динамические особенности океанической циркуляции [9; 86; 87].

- **Карты путей (L-карты).** L-карты представляют собой специализированный тип лагранжевых карт, отображающих пространственное распределение длин траекторий, пройденных виртуальными частицами за определённый временной интервал [97]. Методика построения L-карт основана на прямом или обратном интегрировании траекторий частиц с последующим вычислением интегральной длины пути для каждой траектории.

$$L = R \int_{t_0}^{t_0+T} \sqrt{\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 + \left(\cos \phi(t) \frac{d\lambda}{dt}\right)^2} dt \quad (1.4)$$

где  $R = 6371$  км - радиус Земли,  $\phi$  и  $\lambda$  - широта и долгота частицы,  $T$  - период интегрирования.

Визуализация L-карт осуществляется с помощью градаций серого цвета, где более тёмные оттенки соответствуют большим пройденным расстояниям, а светлые - меньшим (см. Рис. 1.2). Такой подход позволяет идентифицировать зоны с различной динамической активностью [13; 87; 97]. L-карты особенно эффективны для изучения эволюции вихревых структур, так как позволяют количественно оценивать процессы вовлечения и выделения водных масс, отслеживать деформацию вихрей и идентифицировать зоны взаимодействия между соседними вихревыми образованиями [8; 86; 87].

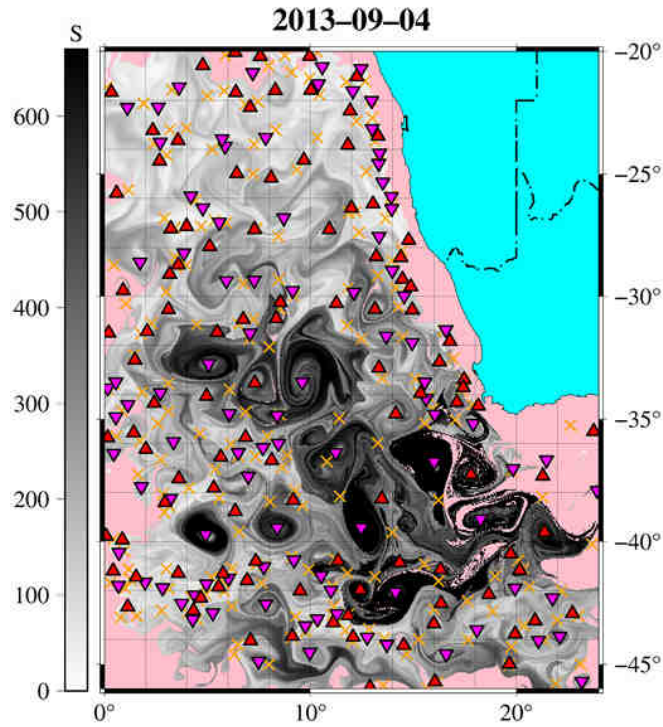


Рис. 1.2: Карта движения частиц (L-карта) на 4 сентября 2013 года на глубине 266 м (поле скорости реанализа GLORYS12V1 [38]) показывает, что черный цвет соответствует длине траектории в километрах, которую прошла каждая точка (водная частица) за 30 дней до указанной даты, розовый цвет обозначает точки, принадлежащие к одному из двух типов вод: те, которые соприкасались с маской берега (или контуром шельфа), и те, которые в прошлом достигли границ выбранного бокса поля скорости. Также на карте представлены центры вихрей в виде треугольников: красные треугольники обозначают центры циклонов (закрашены и направлены вверх), а розовые треугольники — центры антициклонов (закрашены и направлены вниз), при этом оранжевые кресты показывают гиперболические точки, которые являются точками неустойчивости. [9]

- **Карты возраста вод (Т-карты).** Т-карты представляют собой специализированный тип лагранжевых карт, визуализирующих временные характеристики переноса водных масс и показывающих "возраст" вод в различных участках исследуемой области [8; 97]. Методика построения Т-карт основана на обратном интегрировании траекторий виртуальных

частиц с фиксацией времени, прошедшего с момента пересечения ими определённых граничных сегментов.

Аналогично методике построения O-карт, исследуемая область покрывается плотной равномерной сеткой с виртуальными частицами-трассерами в каждом узле. Для каждой частицы производится интегрирование уравнений адвекции в обратном времени до момента пересечения одного из заранее определённых граничных сегментов, соответствующих путям основных течений региона. Ключевым отличием T-карт является фиксация не только факта пересечения, но и времени, прошедшего с этого момента до текущей даты ( см. Рис.1.3).

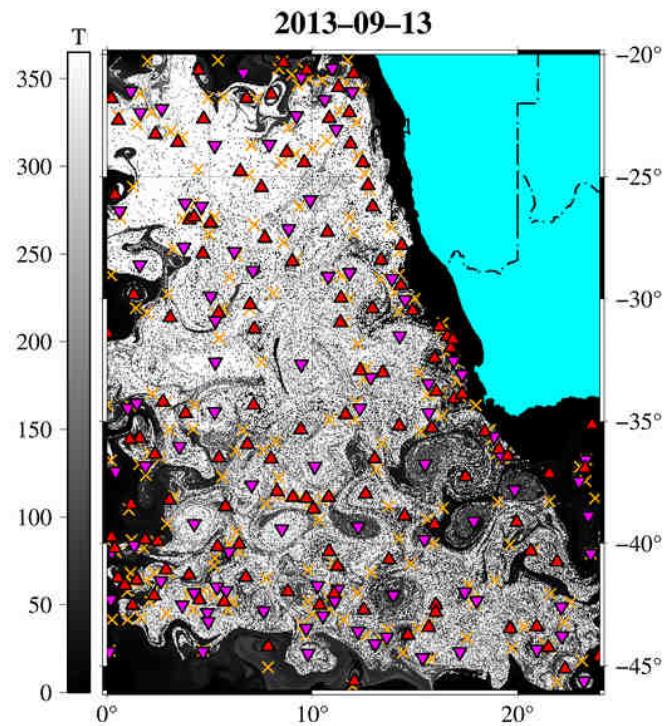


Рис. 1.3: Карта «возраста» частиц (Т-карта) на 13 сентября 2013 года на глубине 266 м (поле скорости реанализа GLORYS12V1 [38]) отображает цветом временной интервал между запуском частиц в указанную дату и моментом достижения одной из границ региона, где цветовая шкала показывает время  $T$  достижения соответствующей границы в течение года до даты, указанной на каждом кадре/карте, при этом белым цветом обозначены точки, которые находились в пределах границ этого региона в течение года с данной даты или находились на момент запуска маркеров на шельфе, а треугольники и кресты соответствуют обозначениям из предыдущих рисунков (см. Рис.1.1 и 1.2). [9].

Т-карты предоставляют уникальную возможность количественной оценки времени обновления водных масс в различных океанографических структурах. Они особенно ценны для изучения вихревых образований, позволяя определить время удержания вод в вихревых ядрах, оценить интенсивность водообмена между вихрями и окружающими водами, а также проанализировать временные масштабы процессов перемешивания в фронтальных зонах [8; 13; 86; 87].

Представленные О-, L- и T-карты составляют основной инструментарий лагранжевой диагностики, используемый в данной работе для анализа происхождения, переноса и временных характеристик водных масс. Следует отметить, что существующий арсенал лагранжевых методов не ограничивается описанными подходами - в литературе представлены и другие специализированные карты, такие как D-карты (карты смещения), Λ-карты (карты показателя Ляпунова) и другие производные лагранжевые индикаторы. Однако в рамках настоящего исследования мы сознательно ограничились применением О-, L- и T-карт, которые наиболее адекватно отвечают поставленным задачам по изучению происхождения водных масс и их транспортных путей. [87; 90; 97].

### Применение к анализу вихревых структур

Комбинированное использование О-, L- и T-карт открывает возможности для комплексного анализа вихревых структур и их эволюции [87; 90; 123]. Для количественной оценки состава вод в ядрах вихрей применяется специализированный алгоритм, включающий распределение частиц в узлах регулярной сетки, обратное интегрирование траекторий на периоды от 1 до 3 лет и цветовое кодирование частиц в соответствии с типом пересекаемой водной массы. Количественная оценка относительной концентрации вод различного происхождения внутри вихревого контура осуществляется по формуле:

$$C_j = \frac{N_j(i)}{\sum_{k=1}^K N_k(i)}, \quad (1.5)$$

где  $N_j(i)$  — число частиц  $j$ -го типа внутри контура вихря в  $i$ -й день,  $K$  — общее число типов вод. Данный подход позволяет количественно оценивать долевым вклад различных водных масс в состав вихревых структур и отслеживать его изменение в процессе эволюции вихря [126].

Для анализа временной динамики состава водных масс применяется процедура нормализации времени жизни вихрей. Множество дней жизненного цикла

каждого вихря отображается на универсальный нормализованный временной интервал от 0 до 1. Доля частиц заданного происхождения интерполируется на единую сетку с мелким шагом для каждого вихря, что позволяет объединять данные для вихрей с различной продолжительностью жизни. Усреднение доли каждой водной массы по всем вихрям для каждого нормализованного временного интервала позволяет построить обобщённые кривые изменения состава вихря в течение его жизненного цикла.

Для исследования сезонной изменчивости состава водных масс в вихрях рассчитываются средние сезонные доли. Доли водных масс, рассчитанные для каждого вихря ежедневно в течение его времени жизни, агрегируются в массив, соответствующий каждому дню года, а затем усредняются по всем вихрям для каждой календарной даты. Поскольку анализ основан на статистической выборке вихрей за многолетний период, все рассчитанные средние значения сопровождаются оценками 95% доверительного интервала, который определяет диапазон значений, где с вероятностью 95% находится истинное среднее значение для генеральной совокупности.

Данная методология позволяет отслеживать динамику изменения состава вод в процессе эволюции вихря, включая такие ключевые этапы жизненного цикла как формирование и усиление, слияние и разделение, деформация и ослабление, эрозия и распад вихревых структур [8; 13; 123]. Лагранжев подход обладает рядом существенных преимуществ, включая сохранение полной истории траекторий частиц, возможность интегрирования как вперёд, так и назад во времени, выявление скрытых транспортных путей и фронтальных зон [97]. Однако метод имеет и определённые ограничения, связанные с невозможностью учёта изменения гидрологических характеристик из-за смешения с фоновой водой, ограниченной надёжностью в прибрежных зонах, зависимостью от точности исходного поля скоростей и двумерным характером анализа при трёхмерной природе океанических процессов [97; 123].

Важно отметить, что несмотря на эти ограничения, статистическая зна-

чимось результатов обеспечивается фундаментальными принципами теории динамических систем [11; 41]. Согласно лемме о затенении, в хаотических системах каждая численно вычисленная траектория остаётся близкой к "истинной" траектории со слегка изменённым начальным положением [41]. Это обеспечивает репрезентативность статистических распределений лагранжевых характеристик при использовании большого числа частиц [97], что подтверждается хорошим соответствием модельных результатов с натурными наблюдениями и спутниковыми данными [8; 13; 123].

### 1.3.2. Характеристики и пространственные распределения

Статистическое описание вихревых структур требует расчета комплексного набора параметров, которые позволяют количественно оценивать их свойства, эволюцию во времени и пространственную изменчивость. Представленные ниже кинематические и динамические характеристики используются для анализа статистических закономерностей в распределении, интенсивности и поведении вихрей в исследуемом регионе.

Анализ мезомасштабных вихрей включает расчет набора кинематических и динамических параметров, которые описывают их структуру, интенсивность и эволюцию во времени. Эти характеристики позволяют количественно оценивать энергетику вихрей, их устойчивость и взаимодействие с окружающей средой. В методе AMEDA выделяются суточные характеристики, рассчитываемые для каждого временного шага, и усреднённые за время жизни параметры, которые дают интегральное представление о свойствах вихря на всём периоде его существования [60].

#### Суточные характеристики

Для каждого временного шага (обычно ежедневно) рассчитываются следующие параметры. Следует отметить, что алгоритм AMEDA непосредственно

вычисляет только четыре базовые характеристики: площадь, скорость, радиус и амплитуду. Остальные параметры рассчитываются самостоятельно на основе этих исходных данных.

- **Площадь (Area)** — площадь криволинейного контура вихря, км<sup>2</sup>
- **Скорость (Velocity)** — средняя вращательная скорость на контуре, м/с
- **Радиус (Radius)** — радиус окружности, эквивалентной по площади контуру вихря, км
- **Амплитуда (Amplitude)** — разность уровня моря между контуром и экстремумом внутри него, м
- **Интенсивность (Intensity)** — безразмерный параметр  $I = 0.001 \times \frac{Amplitude}{Radius}$  (рассчитывается самостоятельно)
- **Параметр нелинейности (Non-linearity parameter)** — безразмерный параметр  $\eta = 0.001 \times 24 \times 3600 \times \frac{V}{c}$ , где  $V$  — вращательная скорость,  $c$  — трансляционная скорость (рассчитывается самостоятельно) [21]
- **Глубина (Bathymetry)** — глубина под центром вихря в данный временной шаг, м (рассчитывается самостоятельно)

### Усреднённые за время жизни характеристики

Все усреднённые характеристики рассчитываются самостоятельно на основе суточных данных. Интегральные параметры, осреднённые за весь период существования вихря:

- **Время жизни (Lifetime)** — длительность существования вихря, сутки
- **Средний радиус (Mean radius)** — среднее арифметическое радиусов всех контуров вихря, км

- **Средняя амплитуда (Mean amplitude)** — среднее арифметическое амплитуд, м
- **Средняя скорость (Mean velocity)** — средняя вращательная скорость, м/с
- **Средняя площадь (Mean area)** — средняя площадь контура, км<sup>2</sup>
- **Месяц рождения/распада (Month of birth/death)** — месяц появления или исчезновения вихря
- **Трансляционная скорость (Translation velocity)** — средняя скорость перемещения вихря, км/сут
- **Средняя интенсивность (Mean intensity)**  

$$I_{\text{mean}} = 0.001 \times \frac{\text{Mean amplitude}}{\text{Mean radius}}$$
- **Средний параметр нелинейности (Mean non-linearity parameter)** — среднее арифметическое параметра нелинейности за время жизни
- **Длина пути (Length of the path)** — общее расстояние, пройденное вихрем, км
- **Смещение за время жизни (Displacement during lifetime)** — расстояние между точкой рождения и точкой распада, км
- **Координаты рождения и распада (Latitude/Longitude birth/death)** — географические координаты появления и исчезновения вихря

Суточные характеристики отражают мгновенное состояние вихря и позволяют отслеживать его эволюцию во времени, выявлять кратковременные изменения интенсивности, размеров и скорости перемещения. Усреднённые за время жизни параметры дают интегральную картину, характеризующую вихрь как

целостный объект, и позволяют сравнивать различные вихри между собой по совокупности их свойств. Совместный анализ обоих типов характеристик обеспечивает наиболее полное понимание динамики вихревых структур и создает основу для статистического анализа их поведения.

## Пространственные распределения характеристик вихрей

**Карты частоты встречаемости** вихрей строятся на основе расчёта относительной частоты (доли времени) обнаружения вихря в каждой точке исследуемого региона. Для этого исследуемая область покрывается равномерной сеткой с шагом  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , и для каждого узла сетки вычисляется отношение количества дней, когда данный узел находился внутри контура вихря, к общему числу дней в рассматриваемом периоде. Частота встречаемости в точке рассчитывается по формуле:

$$\text{Frequency} = \frac{N_{\text{eddy}}}{N_{\text{total}}} \quad (1.6)$$

где  $N_{\text{eddy}}$  — количество дней, в которые точка попадала внутрь вихревого контура;  $N_{\text{total}}$  — общее число дней наблюдений (например, 10 592 дня за период 1993–2022 гг.). Полученные значения визуализируются на географических картах, где цветом кодируется относительная частота встречаемости антициклонических и циклонических вихрей (обычно отдельно для каждого типа или с использованием двухцветной шкалы).

**Карты параметра нелинейности** отражают пространственное распределение средних значений параметра  $\eta = V/c$ . Для каждого узла сетки накапливается сумма значений нелинейности для всех дней, когда данный узел находился внутри вихря, после чего вычисляется среднее арифметическое. Полученные значения отображаются на карте, выделяя регионы с наиболее нелинейными вихрями, обладающими значительной энергией и устойчивостью.

**Карты слияний и разделений вихрей** визуализируют зоны интенсив-

ных вихревых взаимодействий. Метод основан на детекции общего контура, образующегося при сближении вихрей. Для каждого узла сетки подсчитывается количество дней, когда он находился в зоне общего контура при слиянии или разделении вихрей. После нормировки на общее число дней результаты отображаются на карте, выделяя регионы с наиболее активными динамическими взаимодействиями между вихрями.

Представленный набор характеристик и методов картографирования обеспечивает комплексный подход к статистическому анализу вихревых структур и выявлению пространственно-временных закономерностей их распределения и эволюции.

### **1.3.3. Дополнительные методы верификации и анализа**

Для комплексного исследования мезомасштабных вихрей и верификации результатов, полученных методами лагранжева анализа, в работе применяется совокупность дополнительных методов, основанных на использовании разнородных независимых данных. Эти методы позволяют провести кросс-валидацию результатов и получить более полное представление о физических характеристиках вихревых структур.

- **Автоматизированный анализ данных дрейфтерных наблюдений.**

Для верификации идентифицированных вихревых структур и анализа их физических параметров разработан алгоритм автоматического сопоставления суточных положений дрейфтерных буюв с контурами вихрей. Метод позволяет выявлять случаи нахождения измерительных платформ внутри вихревых образований, отобранных по заданным критериям (продолжительность жизни, интенсивность, географическое положение). Такой подход обеспечивает статистически значимую выборку измерений *in situ* для последующего анализа термохалинных характеристик вихрей и их динамических параметров.

- **Сопоставление со спутниковыми данными дистанционного зондирования.** Для независимой верификации вихревых структур и анализа связанных с ними термических аномалий выполняется наложение детектированных контуров вихрей на спутниковые инфракрасные изображения. Методика включает обработку данных высокого разрешения для идентификации температурных фронтов, зон апвеллинга и других термических особенностей, ассоциированных с вихревыми образованиями. Этот подход позволяет установить соответствие между кинематическими характеристиками вихрей, выявленными по альтиметрическим данным, и их термохалинной структурой.
- **Сравнение с натурными океанографическими измерениями.** Для валидации результатов и получения информации о вертикальной структуре вихрей проводится сравнение с данными контактных измерений, выполненными в периоды научных экспедиций. Анализируются гидрологические разрезы и станционные измерения, выполненные внутри вихревых образований, что позволяет получить информацию о распределении температуры, солёности и других гидрофизических параметров по глубине в вихревых ядрах и периферийных зонах.
- **Анализ термохалинных характеристик на основе вихреразрешающих реанализов.** По аналогии с методологией анализа состава водных масс, разработана процедура исследования пространственно-временной изменчивости температуры и солёности в вихревых образованиях. На основе данных вихреразрешающего реанализа с высоким пространственным разрешением рассчитываются усреднённые термохалинные характеристики в пределах поверхностных ядер вихрей на разных стадиях их жизненного цикла. Метод включает построение T-S диаграмм и анализ сезонной динамики термохалинных параметров, что позволяет выявить особенности формирования и трансформации водных масс в процессе эво-

люции вихревых структур.

## 1.4. Применения комплексного метода анализа вихрей в различных регионах Мирового океана

Описанные в данной главе методы и алгоритмы детектирования мезомасштабных вихрей и лагранжева анализа нашли широкое применение в различных регионах Мирового океана, демонстрируя свою универсальность и эффективность. В частности, алгоритм AMEDA и лагранжевы методы были успешно применены для анализа вихревой динамики в системе Бенгельского апвеллинга у западных берегов Африки, где изучалась роль вихрей в транспорте питательных веществ и формировании рыбопромысловых зон [8]. В Атлантическом океане лагранжевы подходы использовались для изучения Агульясовских колец и оценки их вклада в межокеанический обмен между Индийским и Атлантическим океанами [9].

Особый интерес представляет исследование Лофотенского вихря в Норвежском море с применением алгоритма LEBDA, который позволил точно определить границы этого долгоживущего образования и проследить эволюцию его водных масс [74]. В северо-западной части Тихого океана был проведен сравнительный анализ эйлеровых и лагранжевых характеристик вихревых структур, что позволило выявить особенности пространственного распределения и динамики вихрей в зоне взаимодействия течений Куроисио и Ойяиси [157].

Интегрированный подход, сочетающий лагранжев анализ траекторий пассивных маркеров с детектированием вихревых структур по алгоритму AMEDA, позволяет не только локализовать отдельные вихревые образования, но и количественно оценить их роль в переносе водных масс на региональном масштабе. Применение данной методологии в исследовании Фрамского пролива [23] продемонстрировало, что совместный анализ траекторий маркеров и границ вихрей даёт возможность разделить вклады адвективного и вихревого механизмов

в рециркуляцию атлантических вод, выявить ключевые транспортные коридоры и объяснить пульсирующий характер поступления водных масс в западную часть пролива. Такой комбинированный подход, где лагранжева информация о перемещении частиц накладывается на объективно выделенные вихревые контуры, оказывается особенно эффективным при изучении регионов со сложной гидродинамикой, где перенос вещества осуществляется одновременно крупномасштабными течениями и мезомасштабными вихрями.

Опыт применения этих методов в различных географических регионах подтверждает их эффективность и адаптивность к специфическим условиям конкретных акваторий. Это позволяет с уверенностью использовать их для исследования мезомасштабных вихрей в Японском и Охотском морях, а также в Курило-Камчатском желобе.

## 1.5. Выводы к главе 1

В данной главе представлен обзор современных методов идентификации мезомасштабных вихрей и подходов лагранжева анализа их свойств и эволюции. Рассмотрены основные подходы к детектированию вихрей: физические методы на основе параметра Окубо-Вейсса и анализа завихренности, геометрические алгоритмы, включая векторную геометрию и алгоритмы на основе кривизны изолиний, а также лагранжевы методы, основанные на анализе траекторий пассивных частиц и вычислении индикаторов когерентности. Особое внимание уделено алгоритму AMEDA, который был выбран для основного исследования ввиду его способности точно определять контуры вихрей, отслеживать их эволюцию и выявлять сложные взаимодействия, такие как слияние и разделение.

Применение лагранжева подхода рассмотрено на примере различных океанических регионов, что подтверждает его эффективность для изучения происхождения водных масс в ядрах вихрей, их транспорта на большие расстоя-

ния и взаимодействия с окружающей средой. Комбинация алгоритма AMEDA с лагранжевыми методами анализа (О-, L- и Т-карт) создает эффективный инструментарий для комплексного исследования мезомасштабных вихрей, позволяющий получать как качественные, так и количественные характеристики этих образований.

Глобальный опыт применения описанных методов в различных регионах Мирового океана подтверждает их универсальность и надежность. Это обосновывает выбор предложенного методологического подхода для исследования мезомасштабных вихрей в Японском и Охотском морях, а также в Курило-Камчатском желобе. Данная методология позволит не только провести детальную перепись вихрей и выявить зоны повышенной вихревой активности, но и количественно оценить их роль в переносе вод различных типов и формировании водных масс в изучаемых регионах.

## Глава 2

# Мезомасштабные вихри Курило-Камчатского желоба: статистика, эволюция и трансграничный перенос вод

### 2.1. Физико-географическая характеристика региона Курило-Камчатского желоба

Курило-Камчатский желоб (ККЖ) представляет собой одну из наиболее глубоководных и динамически активных структур северо-западной части Тихого океана. Протянувшись вдоль Курильских островов и полуострова Камчатка от острова Хоккайдо до Камчатского полуострова, желоб достигает максимальной глубины 9.7 км [135]. Регион характеризуется исключительно сложной батиметрией, оказывающей существенное влияние на циркуляцию вод и генерацию вихревых структур [90].

Как отмечается в исследовании [135], желоб расположен в зоне конвергенции трансформированных субтропических и субарктических водных масс. Западный склон желоба значительно круче восточного, что создает асимметричную топографическую структуру (Рис. 2.1). Такая топография играет ключевую роль в динамике вихрей, определяя траектории их преимущественного переноса.

Основными элементами циркуляции в районе ККЖ являются Восточно-Камчатское течение и течение Ойясио, которые формируют западную часть Субарктического круговорота [135]. Восточно-Камчатское течение движется на юго-запад вдоль Камчатского полуострова, тогда как течение Ойясио, как принято считать, начинается к востоку от пролива Буссоль [126].

Трансформированные субтропические воды поступают в регион тремя пу-

тями:

- Теплые воды из Японского моря поступают в океан через Сангарский пролив и далее переносятся так называемой струей Изогучи [48];
- Через пролив Лаперуза течение Соя транспортирует теплые воды из Японского моря в Охотское море и далее в океан через южные Курильские проливы [116];
- Ветвь Куроисио, непосредственно влияющая на восточную часть региона через Куроисио-Ойясиский переходный район [99];

Регион исследования, как показано на Рис. 2.1, был разделен на четыре субзоны (I-IV) в соответствии с особенностями батиметрии и циркуляции. Субзоны I и III расположены между островами и желобом, в то время как субзоны II и IV находятся к востоку от желоба. Такое разделение позволило провести детальный анализ пространственного распределения и характеристик вихрей в различных динамических условиях.

Южная граница исследовательского домена совпадает с так называемой А-линией Японского метеорологического агентства, а северная пересекает поток Восточно-Камчатского течения у оконечности Камчатского полуострова и желоб [49]. В средней части домен разделен условной линией поперек желоба примерно на траверзе пролива Буссоль, где, как предполагается, берет начало течение Ойясио.

Западная граница исследовательского домена ограничена береговой линией Курильских островов, а восточная граница субзоны IV примерно совпадает с Субарктическим фронтом, идентифицированным по потенциальной температуре  $4^{\circ}\text{C}$  на глубине 100 м [30]. Эта часть фронта почти параллельна струе Изогучи [48] - квазистационарному фронтальному течению, текущему на северо-восток над поднятием Хоккайдо (Рис. 2.1).

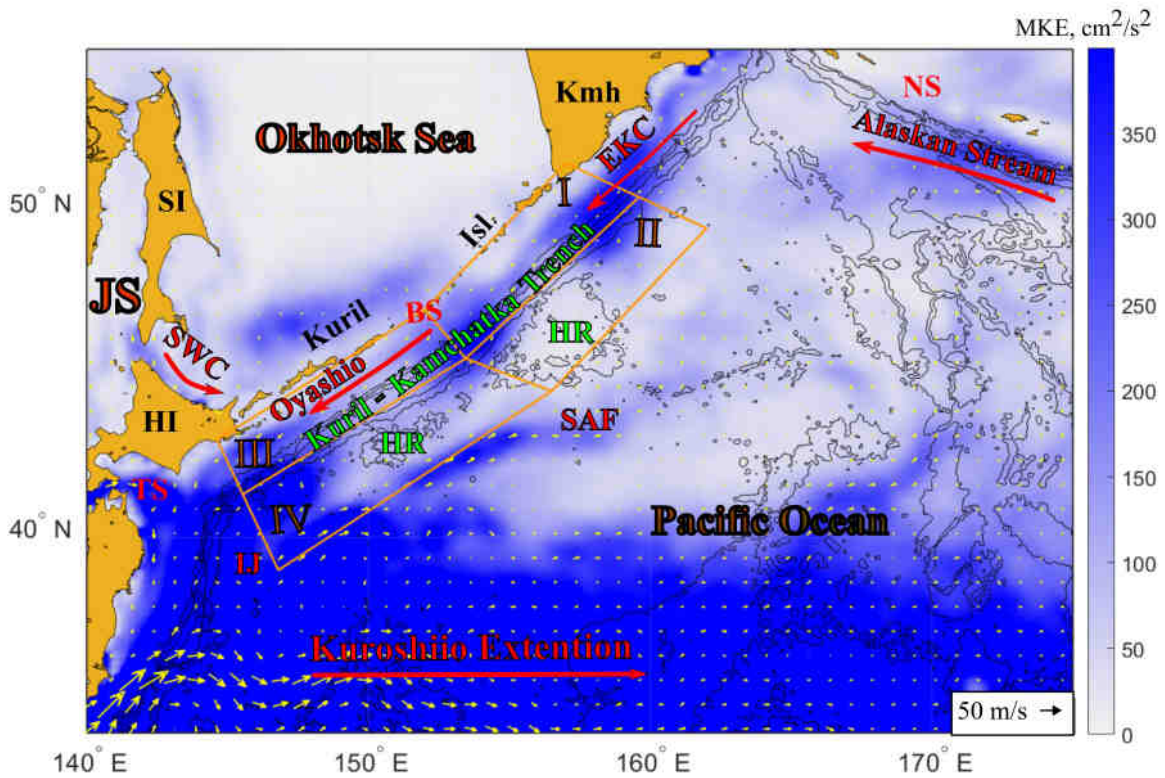


Рис. 2.1: Географическая карта региона с распределением средней кинетической энергии на поверхности ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ), усреднённой за период с 1 января 1993 года по 31 декабря 2021 года, с изобатами 5, 6 и 7 км и наложенным полем средней геострофической скорости, обозначенным маленькими стрелками. Крупные стрелки схематично показывают основные струйные течения в регионе. SWC — тёплое течение Соя. IJ и SAF обозначают струю Исогути и Субарктический фронт. HR — поднятие Хоккайдо. Показана область формирования изучаемых курильских вихрей с четырьмя подобластями, обозначенными римскими цифрами. HI и SI — острова Хоккайдо и Сахалин, Kmh — полуостров Камчатка, JS — Японское море; TS, BS и NS — проливы Сангарский, Буссоль и Ближний. [126]

Распределение средней кинетической энергии поверхности  $E = (u^2 + v^2)/2$  в Курошио-Ойяиском переходном районе, усредненное за 1993-2021 гг., показывает повышенные значения энергии в северных и южных частях субзон I и II, в южных частях субзон III и IV и на границе между всеми субзонами к востоку от пролива Буссоль (Рис. 2.1) [126]. Это в основном связано с круглогодичным

существованием крупномасштабных и долгоживущих вихрей в исследовательском домене.

Климатические условия региона характеризуются муссонным режимом ветров. С октября по май преобладают северо-западные, западные и северные направления ветров. Летний муссон приходит в регион с южными, юго-восточными и юго-западными ветрами в июне-сентябре, и его продолжительность в два раза короче [126]. Преобладающая положительная завихренность напряжения трения ветра, возникающая в регионе в холодный период, в принципе благоприятствует генерации циклонов, тогда как отрицательная завихренность напряжения трения ветра благоприятна для антициклонов.

Регион Курило-Камчатского желоба известен как область с повышенной биопродуктивностью, включая рыболовство [34; 79]. Высокие концентрации питательных веществ, первичная продукция и интенсивное рыболовство наблюдались вокруг некоторых курильских вихрей в исследовательском домене [58; 90; 95]. Западная субарктическая часть Тихого океана, включая исследовательский домен, является одной из зон высокой продуктивности мира. На основе глобальных оценок первичной продукции SeaWiFS ( $>300 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) это экосистема класса I, высокопродуктивная экосистема [114], что добавляет дополнительную мотивацию для изучения вихрей в этом домене.

## **2.2. Перепись и пространственные распределения вихрей в 1993–2021 гг.**

Систематическая перепись мезомасштабных вихрей в регионе ККЖ за период 1993-2021 гг. была проведена с использованием алгоритма AMEDA [60]. Всего было идентифицировано 2520 вихрей, из которых 992 были антициклоническими (КАС) и 1528 - циклоническими (КС) [126]. Среди долгоживущих вихрей (время жизни  $>90$  суток) было обнаружено 219 антициклонов и 468 циклонов (Таблица 2.1). Наблюдается выраженная асимметрия в полярности

вихрей с преобладанием циклонов над антициклонами, которая не зависит от наложенного ограничения по времени жизни.

Таблица 2.1. Количество вихрей в регионе Курило-Камчатского желоба при различных ограничениях по времени жизни (по данным [126])

| Ограничение по времени жизни |     | Без ограничения |      | 30 суток и более |      | 90 суток и более |     |
|------------------------------|-----|-----------------|------|------------------|------|------------------|-----|
| Область                      | Тип | КАС             | КС   | КАС              | КС   | КАС              | КС  |
| Все                          |     | 992             | 1528 | 865              | 1469 | 219              | 468 |
| Субзона I                    |     | 216             | 364  | 188              | 339  | 39               | 86  |
| Субзона II                   |     | 248             | 317  | 219              | 314  | 75               | 132 |
| Субзона III                  |     | 280             | 356  | 245              | 333  | 36               | 78  |
| Субзона IV                   |     | 248             | 491  | 213              | 483  | 69               | 172 |

Для анализа были выбраны вихри с временем жизни более 90 суток. Этот выбор обусловлен необходимостью обеспечения статистической надежности результатов и фокусировки на устойчивых когерентных структурах, способных осуществлять значительный адвективный перенос водных масс [126]. Долгоживущие вихри представляют особый интерес для изучения процессов водообмена, поскольку они сохраняют свои характеристики в течение продолжительного времени и могут транспортировать водные массы на большие расстояния.

Анализ распределения вихрей по времени жизни показал, что большинство КАС и КС существуют менее 200 суток (Рис. 2.2). Среднее время жизни долгоживущих КАС составляет 212 дней, КС - 180 дней [126]. Среди наблюдаемых вихрей 12.3% антициклонов и 6.4% циклонов прожили более одного года, а 3.2% антициклонов и 1% циклонов - более двух лет.

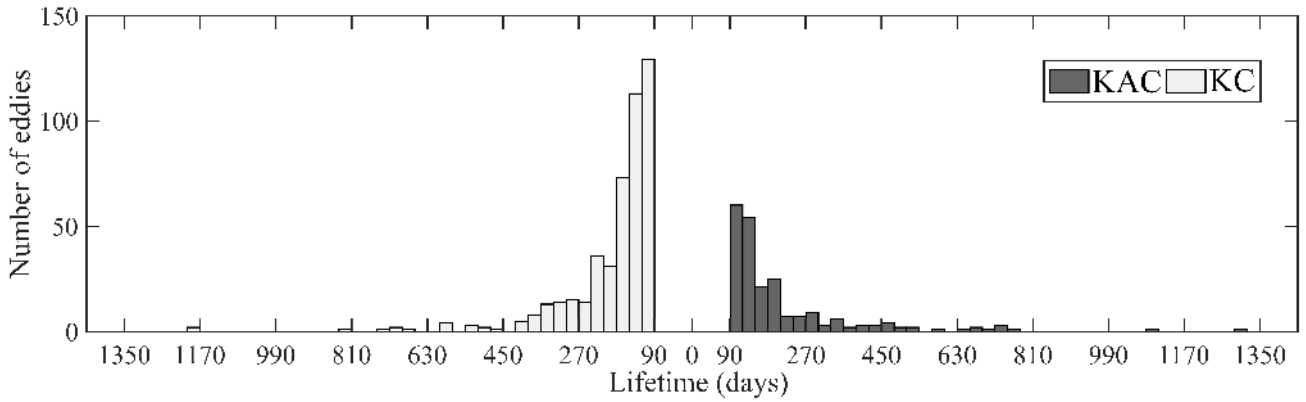


Рис. 2.2: Гистограммы времени жизни курильских антициклонов (КАС) и циклонов (КС) [126]

Сезонное распределение формирования и распада вихрей демонстрирует слабо выраженную сезонную зависимость (Рис. 2.3). Для антициклонов наблюдается некоторое увеличение количества образований в холодный сезон (127 КАС с ноября по апрель против 92 КАС с мая по октябрь), тогда как распределение циклонов по сезонам более однородно [126].

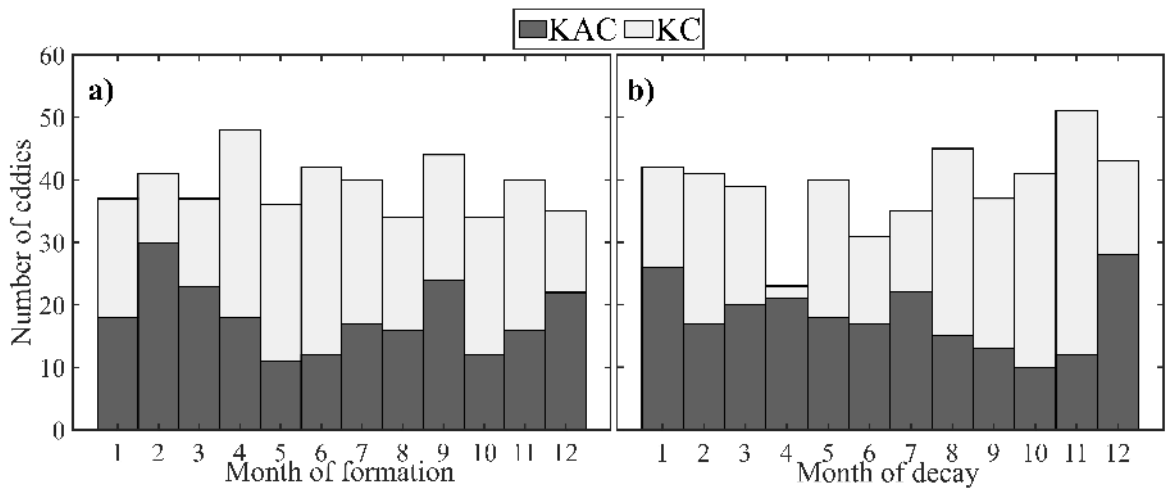


Рис. 2.3: Гистограммы долгоживущих курильских антициклонов (КАС) и циклонов (КС) по месяцам а) формирования и б) распада [126]

Пространственное распределение отобранных вихрей показало значительную неоднородность. Антициклоны преимущественно концентрировались вдоль оси желоба, особенно в районе пролива Буссоль (Рис. 2.4). В то же время цик-

лоны чаще наблюдались к востоку от желоба, над поднятием Хоккайдо (Рис. 2.5) [126]. Такое распределение объясняется эффектом отражения вихрей от топографических особенностей желоба [16].

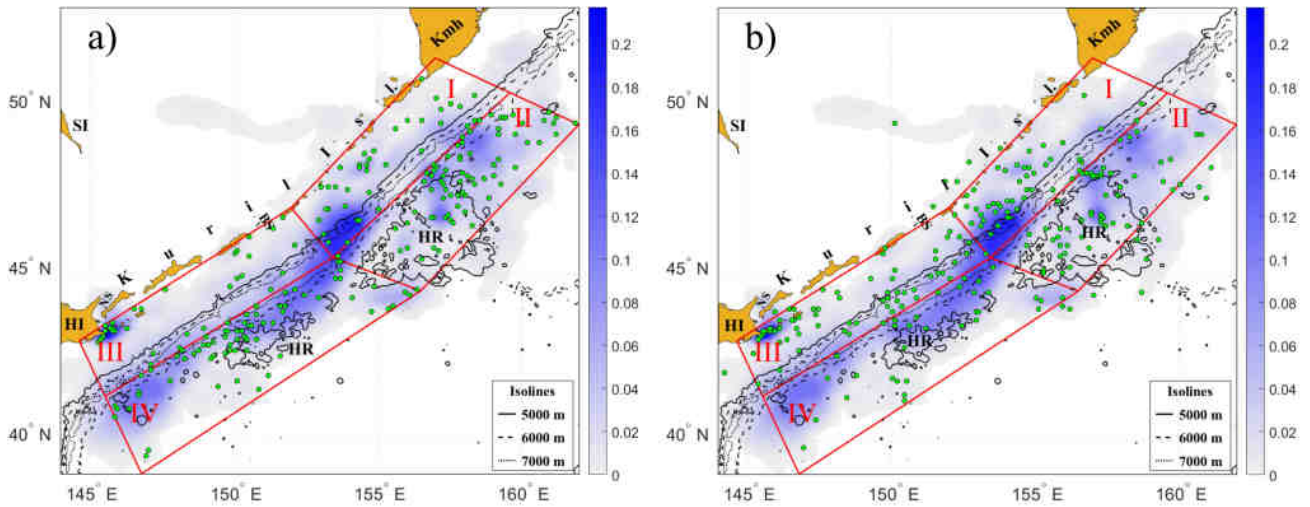


Рис. 2.4: Частота встречаемости курильских антициклонов, существовавших 90 дней и более, с нанесенными местами а) рождения и б) распада за весь период наблюдений (1993–2021). [126]

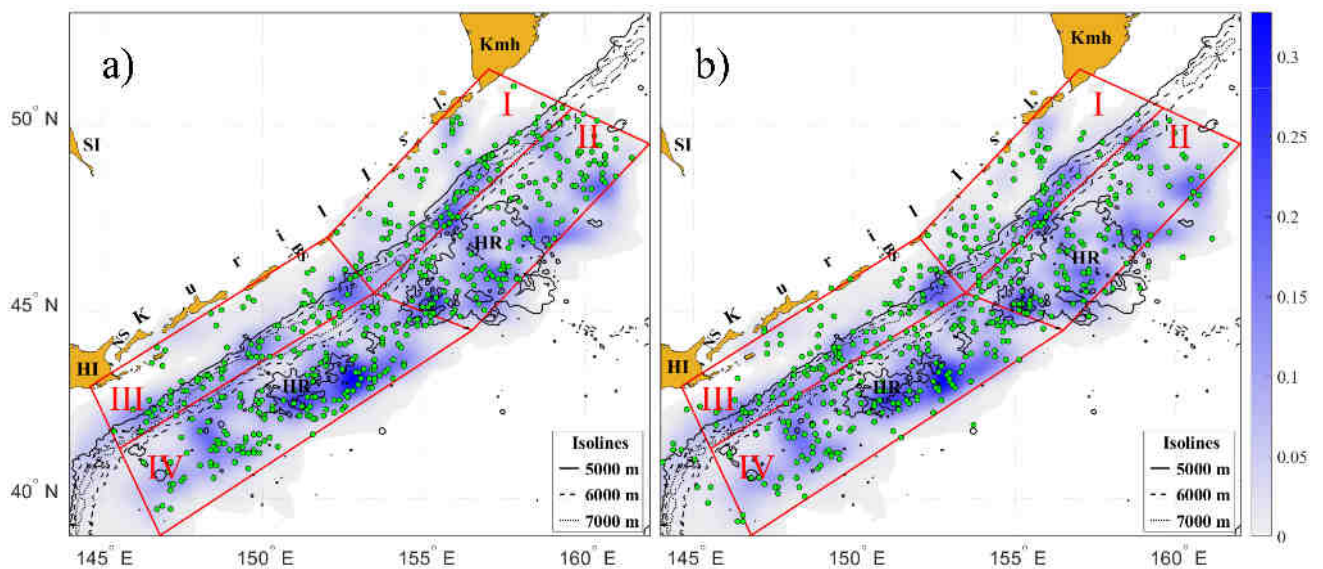


Рис. 2.5: То же, что и на Рис. 2.4, но для долгоживущих курильских циклонов. [126]

Гистограммы распределения вихрей по кинематическим характеристикам демонстрируют существенные различия между антициклонами и циклонами.

Среднее смещение центров вихрей составляет 189.3 км для КАС и 161.6 км для КС (Рис. 2.6a), при этом средняя скорость переноса составляет 5.01 км/сут для КАС и 5.2 км/сут для КС (Рис. 2.6b) [126].

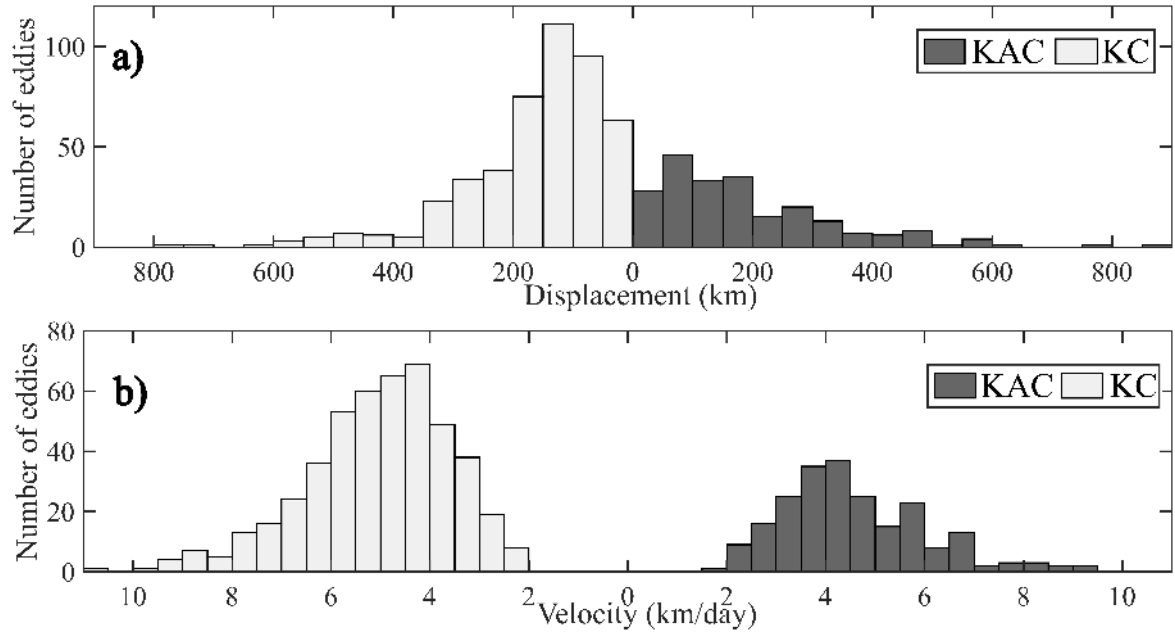


Рис. 2.6: Гистограммы а) смещения центров вихрей в км и б) средней скорости переноса в км/день для курильских антициклонов (КАС) и циклонов (КС). [126]

Анализ размерных характеристик показал, что средний радиус вихрей составляет 36.8 км для КАС и 38 км для КС (Рис. 2.7a), при этом антициклоны характеризуются большей интенсивностью (Рис. 2.7b) [126]. Средняя площадь вихрей составляет приблизительно 4 787 км<sup>2</sup> для КАС и 5 248 км<sup>2</sup> для КС (Рис. 2.8a).

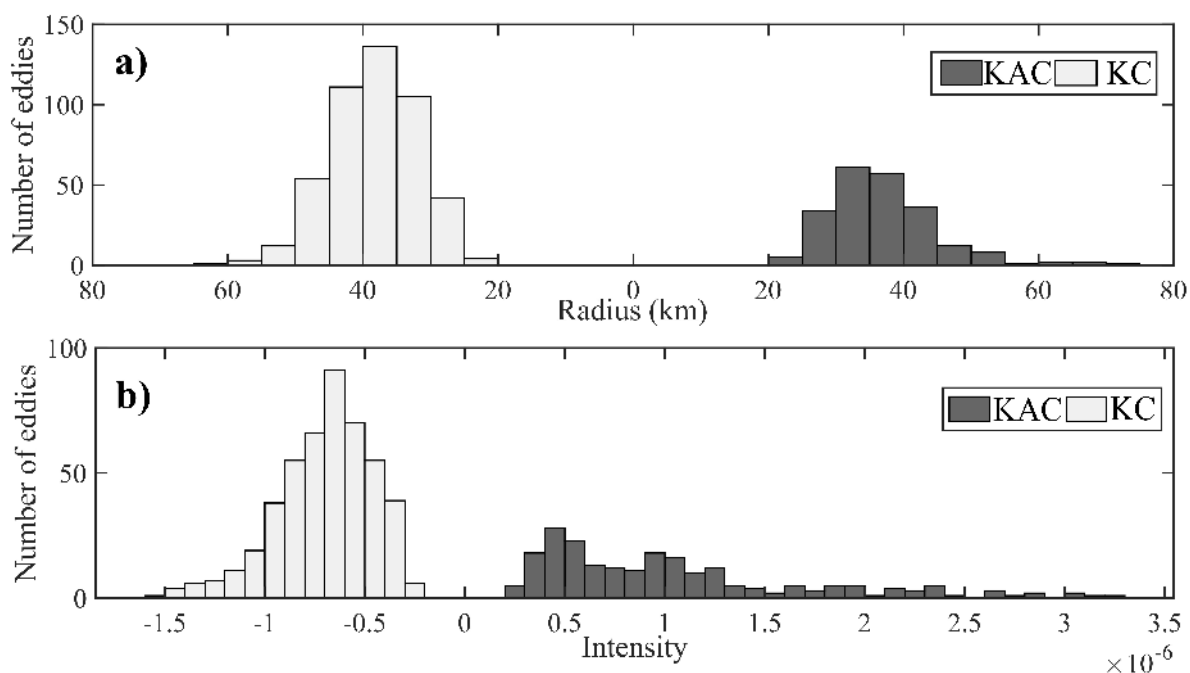


Рис. 2.7: Гистограммы а) среднего радиуса в км и б) средней интенсивности (в безразмерных единицах) для курильских антициклонов (КАС) и циклонов (КС) [126]

Важной характеристикой, определяющей способность вихрей к переносу водных масс, является параметр нелинейности. Гистограммы распределения показывают, что 91% КАС и 92% КС имеют параметр нелинейности  $\eta > 1$  (Рис. 2.8b). При этом 27% антициклонов и только 5% циклонов имеют  $\eta > 4$ , что свидетельствует о значительно более высокой нелинейности антициклонических вихрей [126].

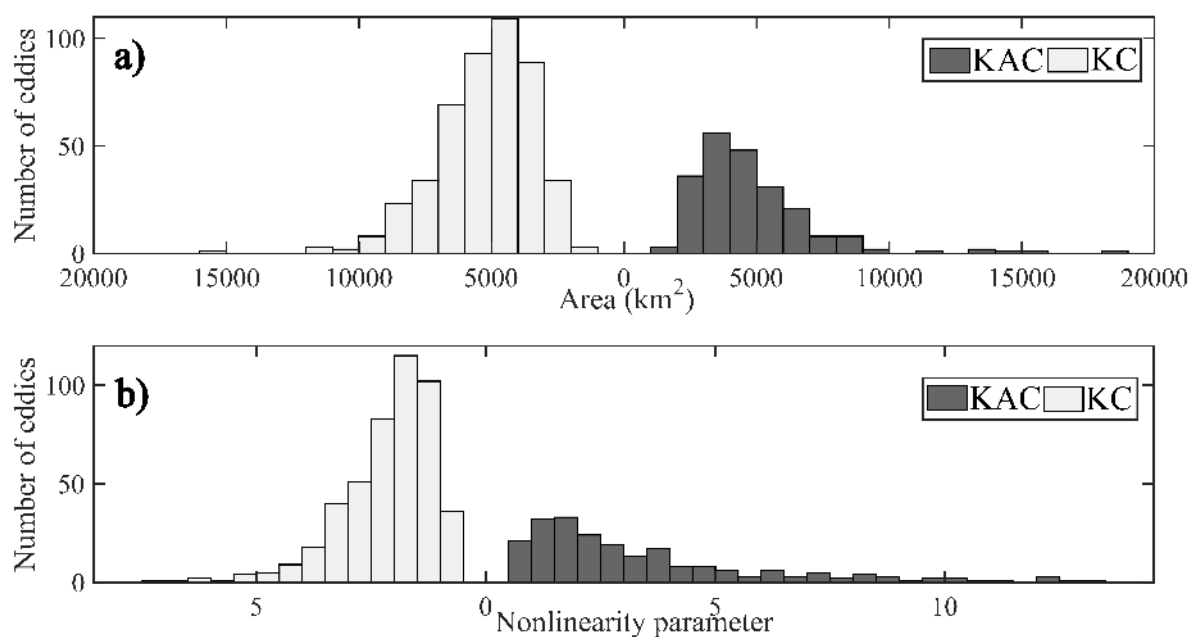


Рис. 2.8: Гистограммы а) средней площади в кв. км и б) среднего параметра нелинейности (в безразмерных единицах) для курильских антициклонов (КАС) и циклонов (КС) [126]

Анализ траекторий вихрей показал, что долгоживущие вихри преимущественно дрейфуют вдоль оси Курило-Камчатского желоба. Большинство вихрей перемещались вдоль оси желоба, причем как в направлении фонового течения, так и против него [126]. При этом лишь незначительное количество вихрей смогло полностью пересечь желоб, что подтверждает его роль как топографического барьера. Среднее смещение центров вихрей составляет 189.3 км для КАС и 161.6 км для КС, что значительно меньше общей длины их траекторий, указывая на сложный характер движения.

### 2.3. Содержание вод разного происхождения в вихрях

#### ККЖ

Анализ происхождения водных масс в ядрах вихрей Курило-Камчатского желоба проводился с применением лагранжевых методов, подробно описанных в разделе 1.3 первой главы. В соответствии с методологией, изложенной в под-

разделе 1.3.1, для реконструкции происхождения водных масс использовался метод О-карт (карт происхождения) с обратным интегрированием траекторий виртуальных частиц.

Методология исследования включала распределение 490 000 виртуальных частиц по исследовательской области с последующим обратным интегрированием их траекторий на протяжении трех лет [126]. Такой продолжительный период интегрирования был выбран эмпирически как достаточный для достижения частицами удаленных регионов бассейна и надежной идентификации их происхождения.

Ключевым элементом методики являлся выбор расположения и ориентации сегментов для идентификации водных масс (Рис. 2.9). Выбор сегментов основан на классических представлениях о схемах циркуляции в регионе и призван фиксировать ключевые потоки основных водных масс в их "чистом" виде, до интенсивного смешения [76; 135]. Каждый сегмент расположен в критической точке - "горловине" потока, что позволяет однозначно идентифицировать происхождение водной массы:

- **Сегмент для вод Охотского моря (желтый):** Расположен поперек зоны интенсивного выноса распресненных вод из Охотского моря через центральные и южные курильские проливы ( $44^{\circ}$ – $47.5^{\circ}$ N,  $144^{\circ}$ – $151^{\circ}$ E)
- **Сегмент для вод Аляскинского течения (черный):** Находится непосредственно в зоне Аляскинского течения ( $49^{\circ}$ – $54^{\circ}$ N,  $170^{\circ}$ E), фиксируя субарктические воды северного происхождения
- **Сегмент для вод Ойясио (синий):** Расположен в области формирования течения Ойясио к востоку от пролива Буссоль ( $50^{\circ}$ N,  $155^{\circ}$ – $160^{\circ}$ E)
- **Сегмент для вод Куроисио (красный):** Пересекает ось потока субтропических вод, переносимых Куроисио и его продолжением ( $34.5^{\circ}$ N,  $139^{\circ}$ – $144^{\circ}$ E)



1.3.1. Обратное интегрирование траекторий проводилось на протяжении трех лет, что обеспечивало надежную идентификацию происхождения водных масс даже из удаленных регионов бассейна.

Результаты анализа выявили четкую пространственную дифференциацию в составе водных масс вихрей, образовавшихся в различных субзонах ККЖ (Рис. 2.10, 2.11). Наиболее выраженные различия наблюдаются между западными (I и II) и восточными (III и IV) субзонами.

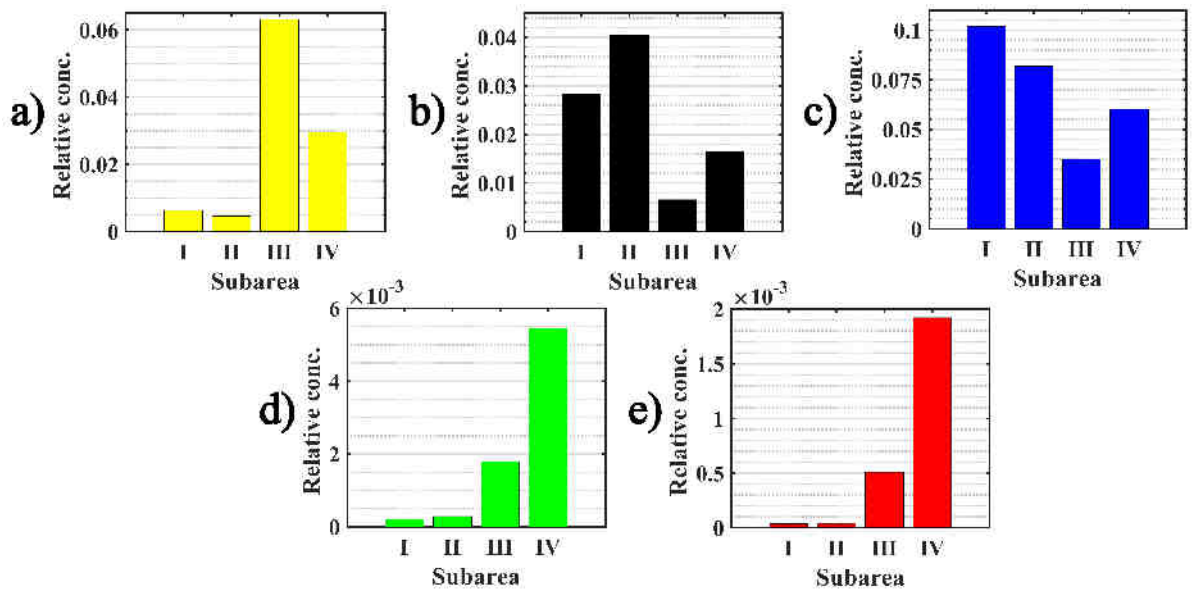


Рис. 2.10: Гистограммы распределения средней относительной концентрации частиц а) охотоморского, б) аляскинского, с) оясийского, д) япономорского и е) куросиского происхождения внутри долгоживущих курильских антициклонов, сформированных в подобластях I, II, III и IV. [126]

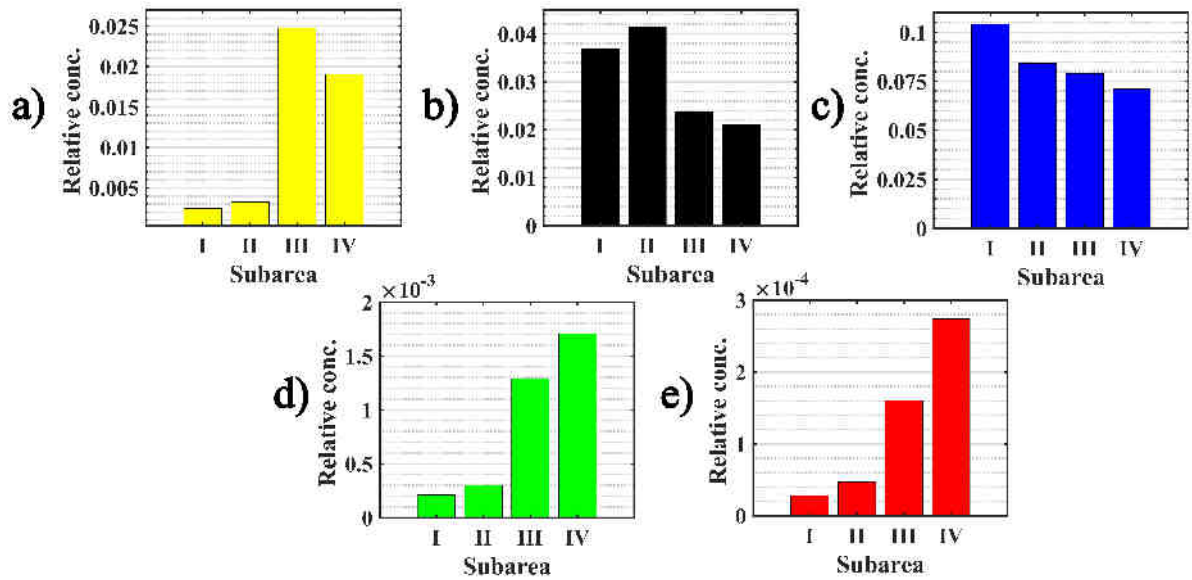


Рис. 2.11: Гистограммы распределения средней относительной концентрации частиц а) охотоморского, б) аляскинского, с) оясийского, д) япономорского и е) кurosиского происхождения внутри долгоживущих курильских циклонов, сформированных в подобластях I, II, III и IV. [126]

**Вихри западных субзон (I и II)** характеризуются преобладанием вод субарктического происхождения. Антициклоны субзоны II демонстрируют наибольшую концентрацию вод Ойясио (Рис. 2.10с), что объясняется их образованием в зоне непосредственного влияния этого течения. Циклоны тех же субзон содержат значительные количества вод Аляскинского течения (Рис. 2.11б), поступающих с севера вдоль Камчатского полуострова.

**Вихри восточных субзон (III и IV)** отличаются более смешанным составом. Здесь отмечается увеличение доли трансформированных субтропических вод, хотя их абсолютная концентрация остается невысокой. Наибольшая концентрация вод Охотского моря наблюдается в антициклонах субзоны III (Рис. 2.10а), что связано с интенсивным выходом этих вод через южные курильские проливы.

Процентное распределение водных масс (Рис. 2.12, 2.13) позволяет количественно оценить вклад различных источников в формирование состава вихрей. Статистически значимым результатом является исключительно малая до-

ля трансформированных субтропических вод (Курисио и Японского моря) даже в восточных субзонах ККЖ, где их процент не превышает 6% [126].

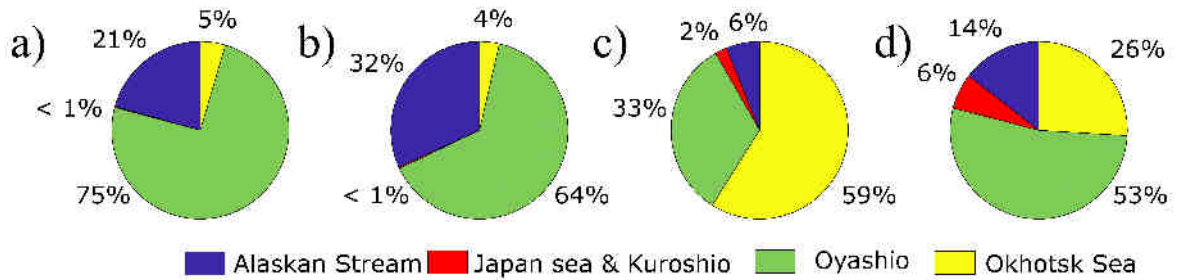


Рис. 2.12: Диаграммы с процентным содержанием воды разного происхождения внутри поверхностных ядер курильских антициклонов, сформированных в подобластях а) I, б) II, в) III и д) IV. Данные усреднены за 1993–2021 годы [126]

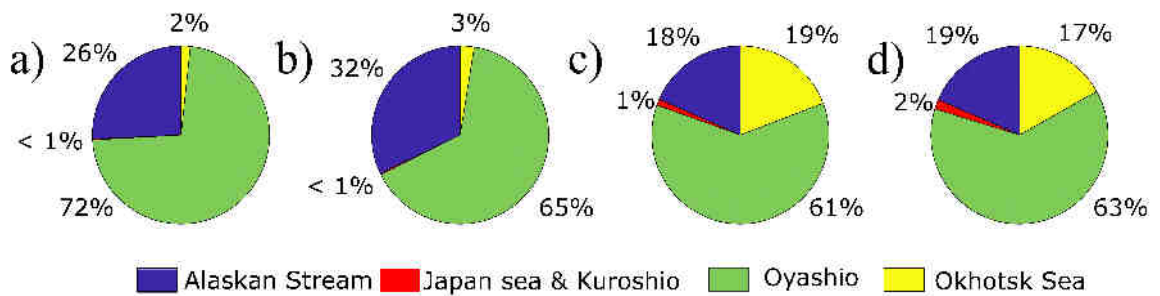


Рис. 2.13: То же, что и на Рис. 2.12, но для долгоживущих курильских циклонов.) [126]

Особого внимания заслуживает неожиданно высокий процент вод Аляскинского течения в вихрях субзон III и IV (Рис. 2.12с,д, 2.13с,д). Этот результат объясняется механизмом дальнего транспорта данных вод алеутскими вихрями с последующим их высвобождением в районе 160-163° в.д. [14]. Часть этих вод достигает субзон I и II, обходя сегмент у Камчатки, и далее транспортируется на юг Восточно-Камчатским течением.

Сравнительный анализ состава вод в антициклонах и циклонах выявил существенные различия в их способности захватывать определенные водные массы. В субзоне III антициклоны содержат примерно вдвое больше вод Охотского моря по сравнению с циклонами (Рис. 2.12с и 2.13с), несмотря на меньшее общее

количество антициклонов (36 против 78) [126]. Это свидетельствует о различной роли вихрей разной полярности в процессах водообмена между Охотским морем и Тихим океаном.

Важным результатом является также обнаружение значительной доли вод неидентифицированного происхождения (белые частицы на O-картах), которые не пересекали ни один из установленных сегментов в течение трехлетнего периода интегрирования. Это может быть связано как с ограниченной длительностью обратного интегрирования, так и с наличием дополнительных, неучтенных в данной схеме источников водных масс.

Полученные результаты убедительно демонстрируют, что мезомасштабные вихри ККЖ являются эффективными агентами дальнего трансграничного переноса водных масс на расстояния порядка 1000 км и более. Установленные закономерности пространственного распределения состава вод в вихрях различных субзон имеют важное значение для понимания процессов формирования гидрологической структуры и биогеохимических циклов в регионе Курило-Камчатского желоба.

## **2.4. Синтез характеристик вихрей Курило-Камчатского желоба и их роль в региональной динамике**

Проведенное комплексное исследование мезомасштабных вихрей в Курило-Камчатском желобе (ККЖ) позволило выявить ряд фундаментальных закономерностей их пространственно-временного распределения, кинематических характеристик и роли в водообмене северо-западной части Тихого океана. Полученные результаты демонстрируют уникальные особенности вихревой динамики в этом регионе, обусловленные сложной топографией желоба, взаимодействием различных водных масс и интенсивными фронтальными процессами.

Систематическая перепись вихрей с использованием алгоритма AMEDA и лагранжевого анализа за 29-летний период (1993–2021 гг.) подтвердила, что

ККЖ является зоной преимущественной локализации долгоживущих мезомасштабных вихрей. Выявлена асимметрия в распределении вихрей по полярности с преобладанием циклонических вихрей над антициклоническими, что указывает на динамическое влияние топографии желоба на генерацию и эволюцию вихревых структур.

Анализ состава водных масс в ядрах вихрей с применением лагранжевых методов отслеживания траекторий частиц показал их способность к эффективному переносу водных масс на значительные расстояния. Высокие значения параметра нелинейности ( $\eta > 1$  для 91–92% вихрей) подтверждают когерентность этих образований и их роль как "транспортных машин" в океаническом водообмене. Особое значение имеет перенос субтропических вод на север и субарктических на юг на расстояния порядка 1000 км, что существенно влияет на формирование водных масс и термохалинной структуры региона. Биологическая продуктивность региона, связанная с присутствием вихрей и апвеллинговыми процессами, особенно выражена в зонах их концентрации, таких как район пролива Буссоль, где первичная продукция превышает  $300 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Полученные результаты создают необходимую основу для перехода к исследованию мезомасштабных вихрей в другом ключевом регионе северо-западной части Тихого океана — Курильской котловине Охотского моря. Этот регион характеризуется иными гидрологическими условиями, топографией и источниками водных масс, что должно проявиться в существенных различиях вихревых характеристик.

## 2.5. Выводы к главе 2

В результате комплексного исследования мезомасштабных вихрей в районе Курило-Камчатского желоба (ККЖ) на основе спутниковых альтиметрических данных за 1993–2021 гг. с применением алгоритма AMEDA и лагранжевых методов анализа были получены следующие основные результаты:

- Проведена первая систематическая перепись курильских вихрей. За 29-летний период в исследуемом районе идентифицировано 2520 вихрей, из которых 992 — антициклонические (КАС) и 1528 — циклонические (КС). Для долгоживущих вихрей (время жизни  $>90$  суток) эти числа составили 219 КАС и 468 КС. Установлено устойчивое преобладание циклонов над антициклонами, которое не зависит от ограничения по времени жизни.
- Выявлена пространственная неоднородность в распределении вихрей. Показано, что долгоживущие вихри концентрируются преимущественно в пределах Курило-Камчатского желоба: антициклоны располагаются вдоль его оси с максимумом частоты встречаемости в районе пролива Буссоль, тогда как циклоны чаще наблюдаются на океанической стороне желоба, над поднятием Хоккайдо. Данное распределение объясняется влиянием топографии желоба.
- Определены кинематические характеристики вихрей. Средняя продолжительность жизни долгоживущих КАС составляет 212 дней, КС – 180 дней. Антициклоны в среднем обладают большей интенсивностью и нелинейностью по сравнению с циклонами. Более 90% всех долгоживущих вихрей являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), что подтверждает их когерентную природу и способность к эффективному адвективному переносу водных масс на значительные расстояния (до 1000 км и более).
- Впервые с помощью разработанной лагранжевой методики количественно оценены доли вод различного происхождения в поверхностных ядрах вихрей. Установлено, что состав вод в вихрях закономерно меняется в зависимости от места их формирования. Вихри западных субзон (I и II) содержат преимущественно субарктические воды (Ойясио, Аляскинского течения и Охотского моря). В вихрях восточных субзон (III и IV) доля суб-

тропических вод (Курисио и Японского моря) возрастает, но даже там не превышает 6‰, что указывает на их интенсивное перемешивание с субарктическими водами. Обнаружен значительный процент вод Аляскинского течения в вихрях всех субзон, что свидетельствует об их дальнем переносе алеутскими вихрями.

- Подтверждена ключевая роль вихрей ККЖ в перераспределении тепла, соли и биогенных элементов в северо-западной части Тихого океана, что имеет важное значение для формирования гидрологической структуры региона и поддержания его высокой биологической продуктивности. Полученные результаты создают основу для сравнительного анализа вихревой динамики в различных бассейнах, включая Охотское море.

## Глава 3

# Мезомасштабные вихри Курильской котловины Охотского моря: перепись, свойства и влияние на внутрибассейновую циркуляцию

### 3.1. Физико-географическая характеристика региона Курильской котловины

Курильская котловина (КК) представляет собой глубоководную депрессию в южной части Охотского моря, ограниченную с востока Курильскими островами, с запада – островами Сахалин и Хоккайдо, а с севера – подводным поднятием Академии Наук (рис. 3.1). Максимальная глубина котловины достигает 3916 м [146], что делает её ключевым регионом формирования промежуточных вод Охотского моря, играющих важную роль в вентиляции северной части Тихого океана [106; 117; 142].

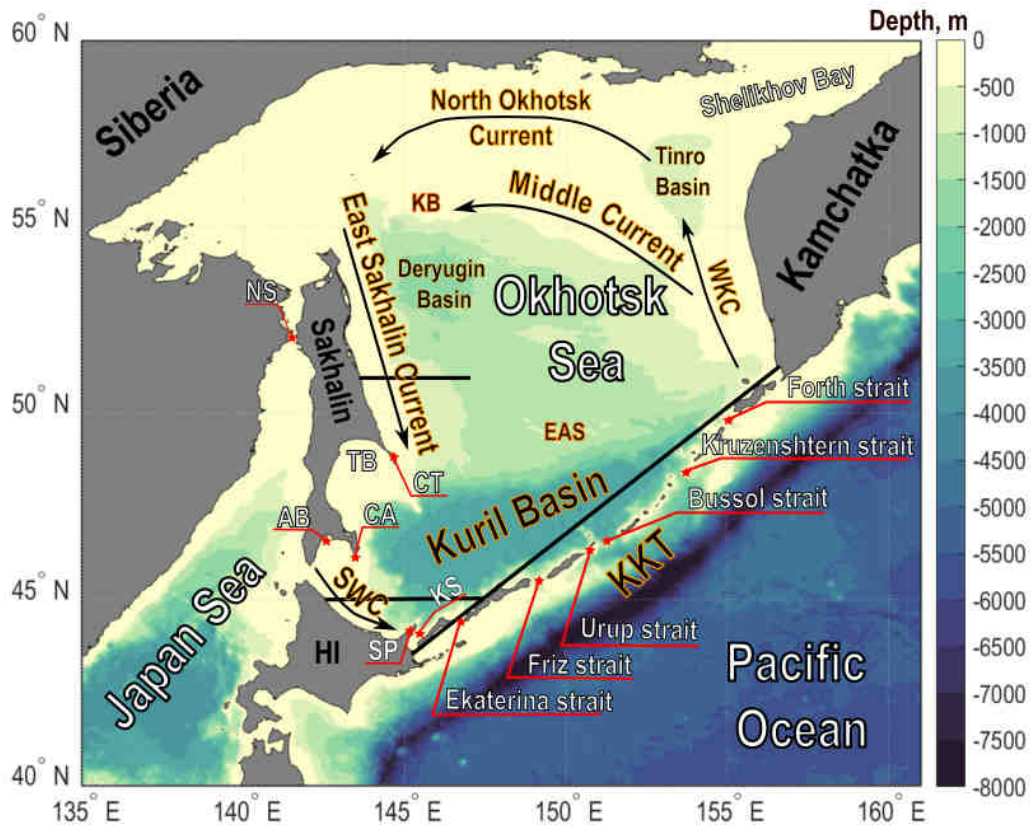


Рис. 3.1: Батиметрия Охотского моря, схема основных течений и географических объектов. Прямолинейные сегменты использованы для определения происхождения вод в Курильской котловине и в пределах поверхностных ядер долгоживущих вихрей. Обозначения: WKC – Западно-Камчатское течение; ККТ – Курило-Камчатский желоб; NS и KS – проливы Невельского и Кунаширского соответственно; HI – остров Хоккайдо; ТВ и АВ – заливы Терпения и Анива; SP – полуостров Сиретоко; СА и СТ – мысы Анива и Терпения; EAS и KB – возвышенность Академии Наук и банка Кашеварова [123]

Батиметрические особенности региона оказывают определяющее влияние на циркуляционные процессы. Курильская котловина отделена от тихоокеанского склона ярко выраженным Курило-Камчатским желобом, создающим сложный топографический барьер для водообмена [77]. Первый бароклинный радиус деформации Россби в котловине составляет 18–20 км, что является максимальным значением для Охотского моря и создаёт благоприятные условия для генерации и эволюции мезомасштабных вихревых структур [113]. Средняя глубина

котловины составляет около 3000 м, что делает её одной из самых глубоких частей Охотского моря [75].

Циркуляционная система Курильской котловины характеризуется сезонной изменчивостью и сложным взаимодействием нескольких водных масс (рис. 3.1):

- **Теплое течение Соя** – переносит теплые и солёные воды из Японского моря через пролив Лаперуза, достигая максимальной интенсивности в летний период [5; 28; 116].
- **Восточно-Сахалинское течение** – транспортирует холодные распреснённые воды вдоль восточного побережья Сахалина, оказывая значительное влияние на гидрологическую структуру западной части котловины [27; 77].
- **Субарктические тихоокеанские воды** – поступают через северные Курильские проливы, формируя промежуточные водные массы котловины [50; 106].

Водообмен с Тихим океаном через Курильские проливы имеет асимметричный характер. Приток тихоокеанских вод происходит преимущественно через северные проливы (пролив Крузенштерна, Четвёртый Курильский пролив), в то время как вынос охотоморских вод осуществляется через южные проливы (пролив Буссоль, пролив Екатерины) [32; 50; 128; 143]. Такой характер водообмена создаёт условия для формирования фронтальных зон и генерации вихревых структур [70; 75].

Термохалинная структура Курильской котловины формируется под влиянием сезонного ледового покрова и конвективных процессов. Зимнее охлаждение и льдообразование на шельфе Сахалина приводят к формированию плотных шельфовых вод, которые стекают по склону и участвуют в вентиляции промежуточного слоя [37; 73]. Летний прогрев и распреснение поверхностного слоя

создают устойчивую стратификацию, способствующую развитию бароклинной неустойчивости [67].

Климатические условия региона характеризуются муссонной циркуляцией атмосферы [152]. Зимой преобладают холодные и сухие континентальные ветры, способствующие интенсивному выхолаживанию и льдообразованию, тогда как летом юго-восточные муссоны приносят теплый и влажный воздух, усиливая стратификацию водной толщи [77; 123].

Особенностью региона является высокая биологическая продуктивность. Район Курильской котловины представляет собой важный промысловый район, особенно для минтая, что связано с интенсивными процессами вертикального перемешивания и выносом биогенных элементов в эвфотическую зону [12; 53; 69; 91; 110].

Важной особенностью региона является сезонный ледовый покров. Согласно спутниковым наблюдениям, среднегодовая заполненность Курильской котловины льдом составляет 20–40% [3; 130]. При этом лёд не является сплошным: значительная часть акватории остаётся открытой или покрыта дрейфующими (битыми) льдами, что создаёт мозаичную структуру. Средняя температура воды в районе, ограниченном изобатой 3000 м, составляет 1–2°C [59]. Эти условия, наряду с повышенной биопродуктивностью, делают котловину интересным объектом для исследования мезомасштабных вихрей, поскольку вихревая активность сохраняется даже при наличии разрежённого ледового покрова.

Алгоритм AMEDA, используемый в данной работе для детектирования и отслеживания вихрей по спутниковым альтиметрическим данным, требует наличия открытой водной поверхности для корректного расчёта замкнутых линий тока и контуров вихрей. Сплошной ледяной покров делает такое детектирование невозможным. Однако в Курильской котловине, как отмечено выше, лёд присутствует не круглогодично и не сплошь: максимальное льдообразование приходится на зимне-весенний период, но даже в это время сохраняются обширные участки открытой воды (полиньи, разводья, трещины), где альти-

метрические измерения надёжны. Более того, большинство долгоживущих вихрей изучались в безледный период или в условиях разрежённого льда, когда их структура остаётся когерентной. Таким образом, ледовый режим региона не препятствует выполнению переписи вихрей и лагранжевому анализу их состава; полученные статистические результаты по содержанию водных масс остаются репрезентативными.

Совокупность перечисленных факторов – сложная батиметрия, интенсивный водообмен с океаном, сезонная изменчивость циркуляции и термохалинной структуры – создаёт уникальные условия для генерации и эволюции мезомасштабных вихрей, играющих ключевую роль в переносе водных масс, тепла и биогенных элементов в регионе Курильской котловины [90].

## **3.2. Перепись и пространственные распределения вихрей в 1993-2021 гг.**

Для проведения систематической переписи мезомасштабных вихрей в Курильской котловине Охотского моря за период 1993–2021 гг. использованы данные спутниковой альтиметрии AVISO/CMEMS с пространственным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  и суточным временным шагом [6]. Для автоматического обнаружения и отслеживания вихрей применялся алгоритм AMEDA [60], позволяющий идентифицировать вихри и фиксировать сложные взаимодействия между ними, включая слияние и разделение.

Без ограничений по времени жизни в Охотском море обнаружено 1634 антициклонических (АЕ) и 1659 циклонических вихрей (СЕ), что в сумме составляет 3293 вихря. При ограничении минимального времени жизни 30 дней количество обнаруженных вихрей составило 1098 АЕ и 1139 СЕ (всего 2237). В регионе Охотского моря наблюдается приблизительно равное количество вихрей разной полярности, однако этот паритет нарушается при рассмотрении долгоживущих вихрей Курильской котловины (таблица 2.2).

Таблица 3.1. Количество вихрей в Охотском море и Курильской котловине при различных ограничениях по времени жизни (по данным [123])

| Ограничение по времени жизни | Охотское море |           |           |           | Курильская котловина |
|------------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
|                              | Больше 0      | Больше 30 | Больше 60 | Больше 90 |                      |
| АЕ                           | 1634          | 1098      | 829       | 591       | 243                  |
| СЕ                           | 1659          | 1139      | 874       | 612       | 366                  |

Анализ карт частоты встречаемости вихрей для всего Охотского моря показал неоднородность их распределения как в пространстве, так и по полярности (рис. 3.2 и 3.3). Наибольшая концентрация антициклонических вихрей наблюдается в южной части моря, особенно в районах Курильской котловины. Сравнительно высокая плотность мест образования отмечается вдоль восточного побережья Сахалина, особенно в его южных заливах. В самой южной части Охотского моря высокая частота встречаемости со скоплением мест образования наблюдается в районе мыса Сиретоко для АЕ и к западу от него для СЕ. Ответвление тёплого течения Соя поворачивает там на северо-восток и впадает в КК, тогда как другое ответвление следует вдоль побережья и вытекает в океан [28; 116]. Циклонические вихри демонстрируют более равномерное распределение с максимальной концентрацией вдоль Курильских островов и в центральной части котловины. В Курильской котловине, ограниченной изобатой 3000 м, наблюдается значительная асимметрия в распределении вихрей по полярности, особенно выраженная при ограничении времени жизни 30 днями и более. Это пространственное распределение отражает влияние топографии дна и особенностей циркуляции в регионе, включая взаимодействие различных водных масс и фронтальных зон [123].

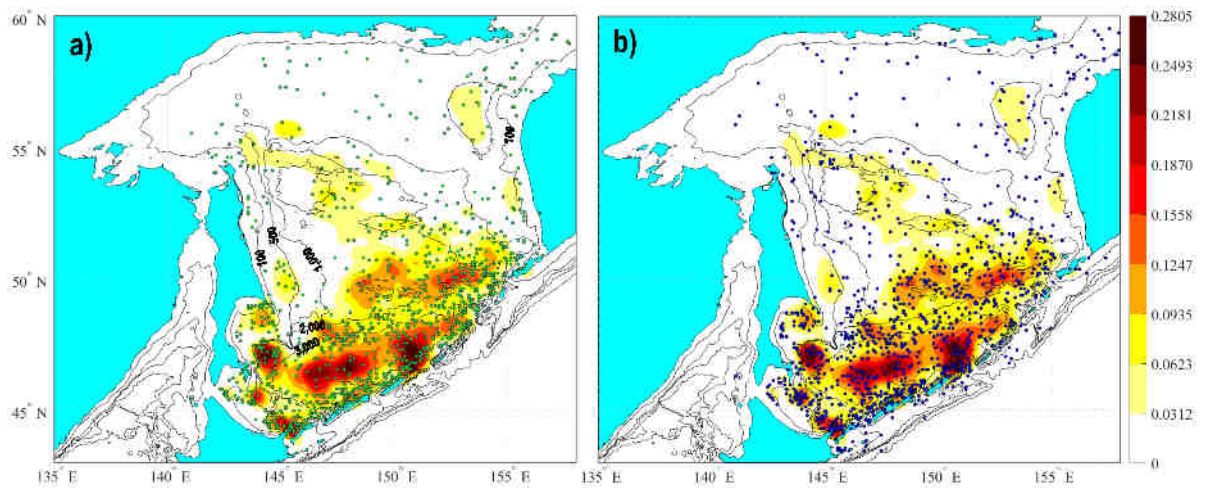


Рис. 3.2: Частота встречаемости антициклонов (АЕ) в Охотском море с нанесёнными а) местами образования (зелёные точки) и б) местами распада (синие точки) без ограничения по времени жизни. Цветовая шкала выделяет области с повышенной вероятностью наблюдения антициклонических вихрей в 1993–2021 гг. Показаны изобаты 100, 500, 1000, 2000 и 3000 м [123]

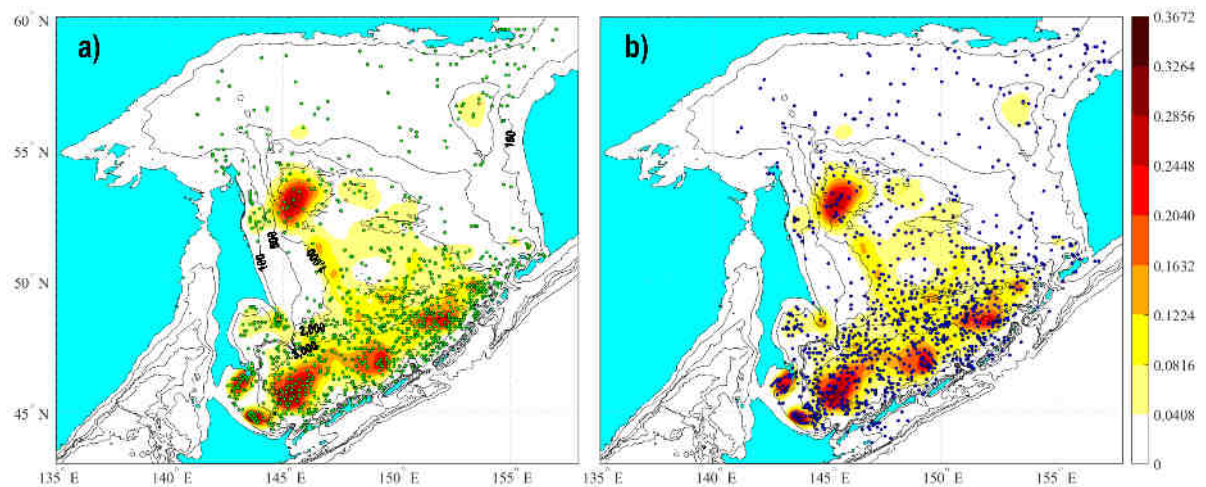


Рис. 3.3: То же, что на рис. 3.2, но для циклонов (СЕ) в Охотском море [123]

Критерием отбора долгоживущих вихрей в Курильской котловине служило условие нахождения вихря внутри изобаты 3000 м в течение более 30 суток. Данный подход позволил включить в анализ как вихри, сформировавшиеся непосредственно в котловине, так и вихри, пришедшие извне, но удовлетворяющие критерию долговременности. Таким образом исключаются кратковременные вихревые образования и фокусируется внимание на устойчивых струк-

турах, оказывающих значительное влияние на процессы переноса вод внутри бассейна. Именно такие вихри могут быть надежно идентифицированы с помощью альтиметрического алгоритма AMEDA и детально отслежены с помощью лагранжевых карт [123].

Первым важным наблюдением является преобладание долгоживущих СЕ над АЕ в КК с временем жизни более 30 дней (таблица 3.1). Согласно распространённому мнению, АЕ являются доминирующими структурами в Курильской котловине [75; 77; 85; 101; 130; 131; 148]. Это впечатление связано, вероятно, с большим горизонтальным размером (рис. 3.5d) и амплитудой АЕ по сравнению с СЕ, что облегчает наблюдение антициклонов в поле уровня моря. Однако до настоящего исследования не проводилось переписи вихрей КК за столь длительный период.

Средняя продолжительность жизни вихрей в КК составила 203 дня для антициклонов (АЕ) и 127 дней для циклонов (СЕ) (рис. 3.4). 18% АЕ и 7.3% СЕ прожили более одного года, что указывает на уникальные условия для сохранения когерентности вихрей в этом регионе. Средняя скорость переноса вихрей была относительно низкой: 3.86 км/день для антициклонов и 4.48 км/день для циклонов, что значительно меньше по сравнению с курильскими вихрями в открытом океане [123; 126]. Среди долгоживущих вихрей в КК 97.9% антициклонов и 97.8% циклонов имели параметр нелинейности  $\eta > 1$ , что подтверждает их роль как когерентных образований, способных эффективно переносить воду и её свойства (рис. 3.4с). Сезонная изменчивость образования вихрей выражена слабо – 122 антициклона (АЕ) и 178 циклонов (СЕ) образовались в холодный сезон (ноябрь–апрель) против 121 антициклона (АЕ) и 188 циклонов (СЕ) в теплый сезон (май–октябрь) [123]. Это указывает на относительную стабильность процессов генерации вихрей в течение года.

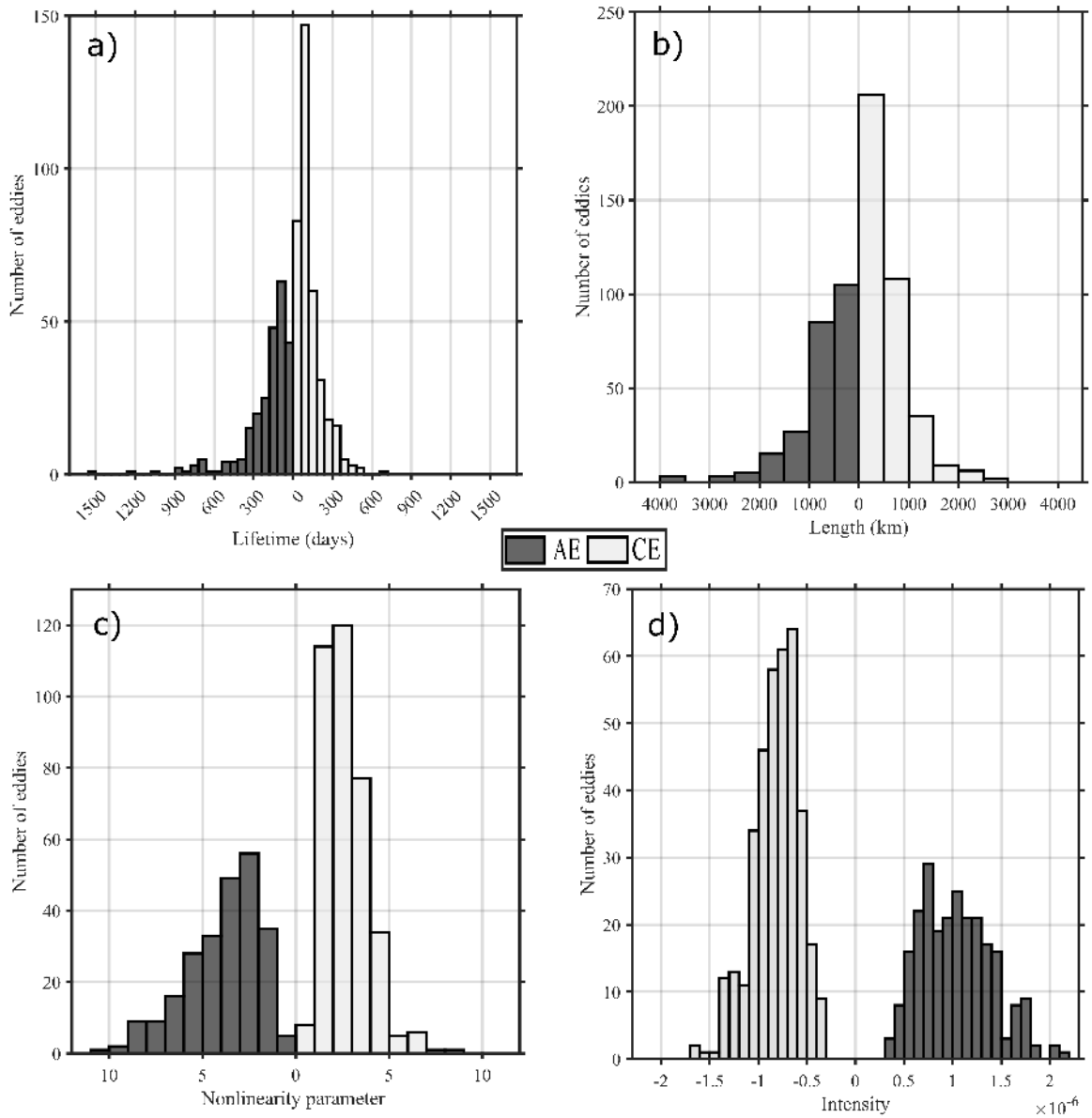


Рис. 3.4: Гистограммы а) времени жизни в днях, б) длины пути траектории в км, с) среднего параметра нелинейности (безразмерные единицы) и d) интенсивности (безразмерные единицы) долгоживущих антициклонов (АЕ) и циклонов (СЕ) в Курильском бассейне [123]

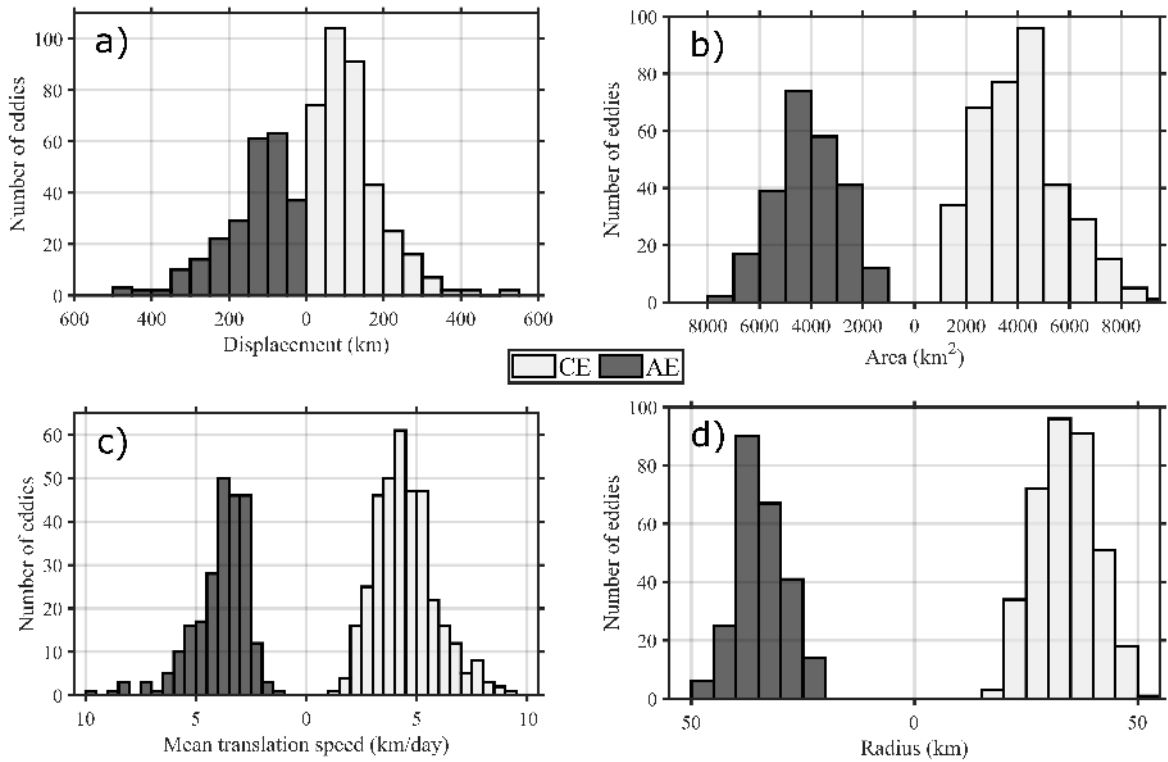


Рис. 3.5: Гистограммы а) смещения центров вихрей в км, б) площади в кв. км, с) средней скорости перемещения в км/день и d) среднего радиуса в км для долгоживущих антициклонов (АЕ) и циклонов (СЕ) в Курильском бассейне [123]

Пространственное распределение долгоживущих вихрей в Курильской котловине демонстрирует выраженную неоднородность. Антициклоны (АЕ) наиболее часто наблюдаются в южной части котловины, особенно в районах, прилегающих к проливам Буссоль и Крузенштерна, а также в центральной части котловины. Циклоны (СЕ), в свою очередь, концентрируются преимущественно в глубоководных районах котловины, формируя зоны повышенной вихревой активности [123].

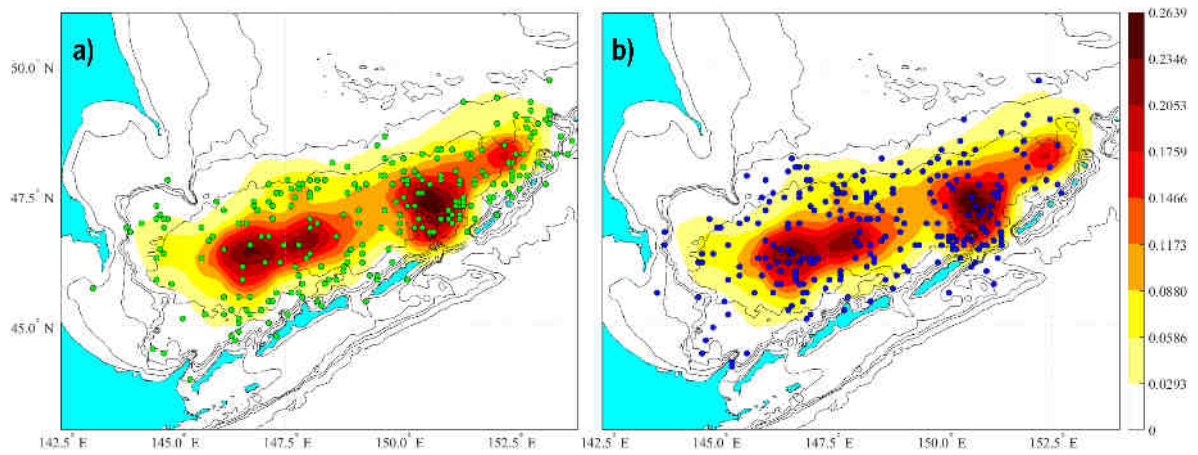


Рис. 3.6: Частота встречаемости антициклонических вихрей (АЕ) в Охотском море с наложенными местами а) образования и б) распада без ограничения по времени жизни [123]

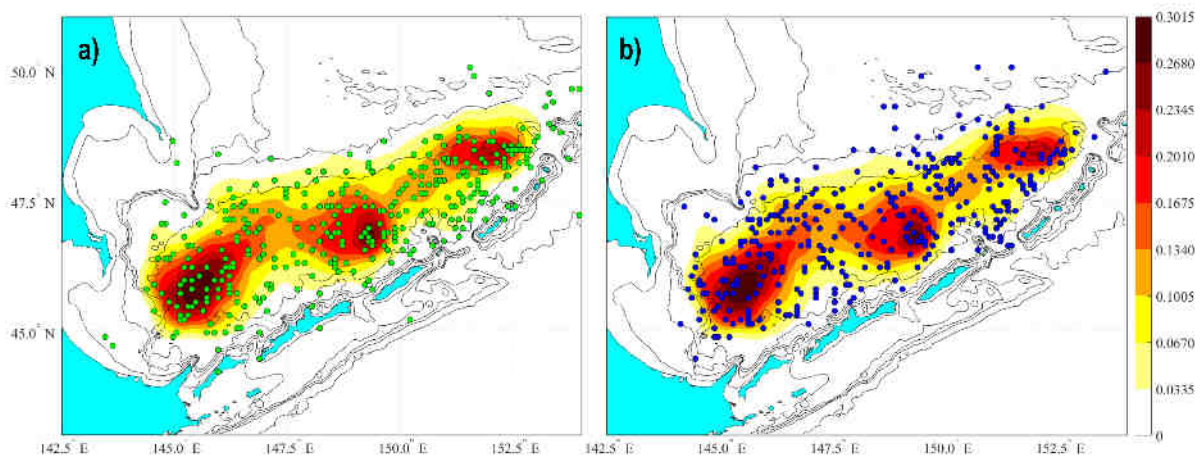


Рис. 3.7: Частота встречаемости циклонических вихрей (СЕ) в Охотском море с наложенными местами а) образования и б) распада без ограничения по времени жизни [123]

Анализ мест образования и распада вихрей выявил четкие пространственные закономерности (рис. 3.6 и 3.7). Антициклонические вихри (АЕ) преимущественно образуются в южной и юго-западной частях котловины с максимальной плотностью мест образования в районе пролива Буссоль, к востоку от залива Терпения, в северной части этого залива, а также в районе мыса Сиретоко (рис. 3.6). Эти зоны генерации тесно связаны с областями интенсивного взаимодействия теплого течения Соя с водами Охотского моря и зонами бароклинной

неустойчивости. Для циклонических вихрей (СЕ) характерны несколько иные зоны генерации с повышенной плотностью в глубоководных районах центральной части котловины и в заливе Анива, что может быть связано с процессами вихреобразования на фронтальных разделах и влиянием Восточно-Сахалинского течения (рис. 3.7).

Распределение мест распада вихрей демонстрирует менее концентрированный характер по сравнению с зонами образования. Антициклоны чаще прекращают существование в центральных и восточных районах котловины, в то время как циклоны распадаются более равномерно по всей акватории. В некоторых районах, таких как область к востоку от пролива Буссоль, наблюдается совпадение зон образования и распада вихрей, что свидетельствует о локализованном характере вихревой динамики в этих районах.

Анализ траекторий движения вихрей показывает сложную пространственную организацию их перемещений. Долгоживущие вихри демонстрируют разнообразные траектории, включающие как квазизигзагообразные движения, так и сложные петлеобразные траектории. Антициклоны часто перемещаются вдоль западной и южной периферии котловины, следуя общему направлению циркуляции вод, в то время как циклоны проявляют большую пространственную свободу в своих перемещениях. Большинство вихрей сохраняется в пределах котловины, ограниченной изобатой 3000 м, что подчеркивает роль топографических особенностей в ограничении их меридионального переноса. Наблюдается тенденция к западно-восточному перемещению вихрей с многочисленными мейндами, особенно выраженными в центральной части котловины [123].

Насколько известно, отбор проб СТД проводился только для АЕ и СЕ в прилегающих районах [75; 101; 131]. Мы обозначаем две большие области в Курильской котловине с повышенной вероятностью наблюдения антициклонов, где проводились эти отборы проб, как области «Буссоль» и «центр КК» (рис. 3.1 и 3.6). Вихри там называются «прибрежные буссольские АЕ» (чтобы отличать их от «океанических буссольских вихрей», рассмотренных недавно

[90]) и «глубоководные АЕ». Отобранные вихри имели глубокий холодный слой до 700–900 м с нижней границей холодного слоя, определяемой как глубина изотермы 2°C [101].

В качестве частичной валидации обнаруженных особенностей когерентных вихрей можно обратиться к траекториям дрейфтеров ARGOS в пределах антициклонических циркуляций (см. [77]). Местоположение этих траекторий хорошо совпадает с областями повышенной частоты встречаемости долгоживущих АЕ, обнаруженными в нашем исследовании. Один из дрейфтеров находился в ловушке Буссольского антициклона с 7 октября по 14 ноября 1999 года с центром приблизительно на 47.5° с.ш., 151° в.д. Этот вихрь с холодным ядром диаметром ~100 км был четко виден на изображениях AVHRR в октябре, где также присутствовал глубоководный АЕ с холодным ядром. Гидрографические измерения поперёк Буссольского антициклона были проведены 1 и 2 сентября 1999 года [75]. Вихрь имел холодное, менее солёное и менее плотное ядро, простирающееся до глубины ~1200 м, с изопикнами, направленными вниз к центру. Такая картина плотности создавала антициклоническое движение от поверхности до глубины ~800 м. Структура вихря была похожа на ту, которую описали в работе [15].

В ноябре и декабре 1993 года другой дрейфтер #15371 совершал петли против часовой стрелки вокруг вихреподобных циклонических образований [120] точно в том же месте, где мы обнаружили повышенную частоту встречаемости долгоживущих циклонов (СЕ) (см. рис. 3.7).

Антициклоны (АЕ) регулярно наблюдались (например, [27]) по десятилетним записям (1992–2001) аномалии уровня моря в местах с повышенной частотой встречаемости (см. рис. 3.6), то есть в положениях прибрежных буссольских вихрей и глубоководных вихрей (с центром на 46° с.ш., 146° в.д.). Диаметр последних вихрей оценивался в среднем в 130 км, и они, по-видимому, не перемещались ни откуда, ни в каком-либо направлении в центральном КК с высокой частотой встречаемости (рис. 3.6).

Некоторые вихри образуются, когда поток малоплотной воды внедряется в глубокую КК. Антициклоны, образующиеся вне котловины к востоку и югу от мыса Анива и от полуострова Сиретоко (рис. 3.1), вероятно, являются вихрями такого типа. Большое количество АЕ образуется и распадается в этих областях, но лишь немногие смогли войти в КК (рис. 3.6а). Схожая плотность мест образования и распада в одной и той же области означает, что эти вихри образуются, застаиваются и распадаются на ограниченной территории. Было обнаружено, что Сиретокские АЕ содержат тёплую, солёную воду у поверхности, до глубины около 100 м, лежащую на холодном, менее солёном ядре. Сравнивая рис. 3.2 и 3.6, можно заключить, что Сиретокские АЕ являются короткоживущими.

Используя вихреразрешающую численную модель циркуляции, в работе [122] успешно представлено формирование АЕ в конце лета, когда тёплая и солёная вода течения Соя достигает оконечности полуострова Сиретоко в июле (рис. 6а и 7а в [122]) и начинает закручиваться с появлением АЕ вокруг точки с координатами  $145.5^\circ$  в.д.,  $44.5^\circ$  с.ш. Вода этого течения не транспортируется через проливы ниже по течению, а остается в районе вблизи полуострова Сиретоко, так что смоделированный антициклон постепенно растёт там (рис. 6б и 7б в [122]). Формирование Сиретокского вихря зависит от переноса течения Соя. Когда перенос мал, отчетливый вихрь не образуется. По мере увеличения переноса вихрь появляется с диаметром около 80 км. Эти находки согласуются с нашими наблюдениями повышенной частоты встречаемости короткоживущих АЕ вокруг полуострова Сиретоко (рис. 3.2) и для долгоживущих вихрей Курильской котловины (рис. 3.6). Сочетание таяния льда, вертикального перемешивания зимой и сезонного апвеллинга обогащает воды района Сиретоко питательными веществами. Сиретокские вихри удерживают эту обогащённую воду, что способствует формированию продуктивной и разнообразной морской экосистемы [104].

Другая область с повышенной частотой встречаемости расположена к востоку от залива Терпения (рис. 3.1), где регулярно образуются короткоживущие

щие (рис. 3.2) и долгоживущие (рис. 3.6) АЕ (см., например, [84]). Некоторые из этих вихрей достигают КК, адвектируемые Восточно-Сахалинским течением. Антициклоны, образующиеся к востоку от мыса Анива (рис. 3.1), также связаны с Восточно-Сахалинским течением, но ни один из этих вихрей не смог достичь КК за весь период наблюдений. АЕ к востоку от залива Терпения был отобран осенью 2006 года [107] в месте с повышенной частотой встречаемости на рис. 3.2. Насколько известно, Анивские вихри не отбирались. Несмотря на преобладание СЕ над АЕ, литература по СЕ в КК практически отсутствует.

Что касается вихрей без ограничения по времени жизни, самые высокие плотности мест образования и распада наблюдались вне КК, севернее поднятия Академия Наук (рис. 3.2 и 3.3). В отличие от этого, лишь несколько долгоживущих вихрей за 29-летний период смогли достичь КК из этой области (рис. 3.6а и 3.7а). Следовательно, большинство АЕ и СЕ образовались и распались там, и лишь меньшинство из них смогло достичь КК. Известно, что фронты потенциальной завихренности формируются вдоль цепи островов из-за пространственных вариаций интенсивности вертикального перемешивания. Такие фронты порождают различные неустойчивости и связанные с ними вихри (например, [81]). Фронтальные вихри должны содержать воду с низкой потенциальной завихренностью в своих ядрах, и, таким образом, антициклонические вихри производить легче. Приливные фронты потенциальной завихренности вдоль Курильских островов исследовались численно в работах [70; 75]. Эти авторы смоделировали мезомасштабные и субмезомасштабные бароклинные вихри, образующиеся по обе стороны Курильских проливов. В зрелой фазе возмущения выросли достаточно большими, так что некоторые вихри отщепились и были адвектированы в открытое море на запад. Отщепившиеся вихри были преимущественно антициклоническими [75], простираясь от поверхности до глубины  $\sim 1200$  м. Типичные масштабы вихрей и скорость западного переноса в модели составили  $\sim 100$  км и  $\sim 0.6$  км/день. Вопреки результатам модели, мы не наблюдали доминирования АЕ в открытой части Охотского моря. Коли-

чество АЕ и СЕ, образовавшихся там, примерно одинаково (рис. 3.2а, 3.3а и 3.6, 3.7).

### 3.3. Состав и происхождение вод в вихрях Курильской котловины

Для анализа состава и происхождения водных масс в поверхностных ядрах вихрей Курильской котловины (КК) применялся лагранжев метод отслеживания частиц, подробно описанный в разделе 1.3.1. Методология основана на обратном интегрировании траекторий сотен тысяч виртуальных частиц, распределенных по исследовательской области ( $39^{\circ}$ – $60^{\circ}$ N,  $135.5^{\circ}$ – $167^{\circ}$ E), с использованием альтиметрических данных AVISO/CMEMS [6]. Траектории вычислялись в обратном времени на протяжении одного года, что эмпирически установлено как достаточный период для достижения частицами удаленных регионов бассейна.

Ключевым элементом методики является использование сегментов, пересекающих основные пути переноса водных масс в регионе (Рис. 3.8):

- **Теплое течение Соя (синий цвет)**: идентифицируется по пересечению частицами зонального сегмента ( $51^{\circ}$ N,  $143^{\circ}$ – $147^{\circ}$ E)
- **Восточно-Сахалинское течение (желтый цвет)**: идентифицируется по пересечению зонального сегмента ( $45^{\circ}$ N,  $142.4^{\circ}$ – $147.6^{\circ}$ E)
- **Субарктические тихоокеанские воды (красный цвет)**: идентифицируются по пересечению диагонального сегмента ( $43^{\circ}$ N,  $145.5^{\circ}$ E и  $51.75^{\circ}$ N,  $157.5^{\circ}$ E)

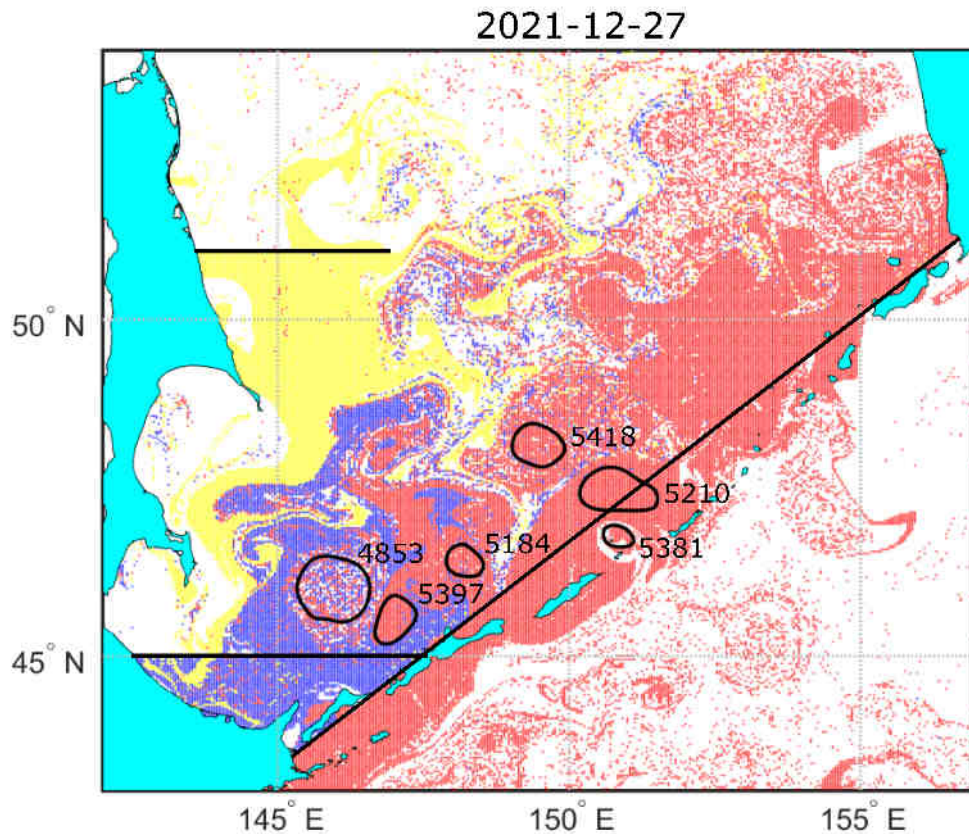


Рис. 3.8: Карта происхождения на 27 декабря 2021 года, показывающая пространственное распределение трех водных масс в южной части Охотского моря. Красным цветом обозначены воды открытого океана, желтым — воды Восточно-Сахалинского течения, синим — воды теплого течения Соя. Белым цветом обозначены частицы, происхождение которых не удалось определить. Контуры нескольких обнаруженных вихрей показаны с их номерами [123]

Расчет относительных концентраций вод различных типов в вихревых ядрах выполнялся путем наложения контуров идентифицированных вихрей на суточные О-карты и подсчета соотношения частиц различного происхождения внутри этих контуров (см. методику в разделе 1.3.2.). Этот подход позволил количественно оценить доли различных водных масс в поверхностных ядрах долгоживущих вихрей КК и проследить их сезонную и межгодовую изменчивость.

Анализ временных вариаций состава водных масс в пределах всей Курильской котловины (Рис. 3.9) показал четко выраженную сезонную цикличность.

Доля вод открытого океана демонстрирует периодическое увеличение в холодный сезон (октябрь-апрель), что связано с интенсификацией Восточно-Камчатского течения и усилением поступления западных субарктических вод через северные Курильские проливы [51; 77; 98]. Доли вод течения Соя и Восточно-Сахалинского течения варьируются более хаотично, но также с выраженной сезонной компонентой.

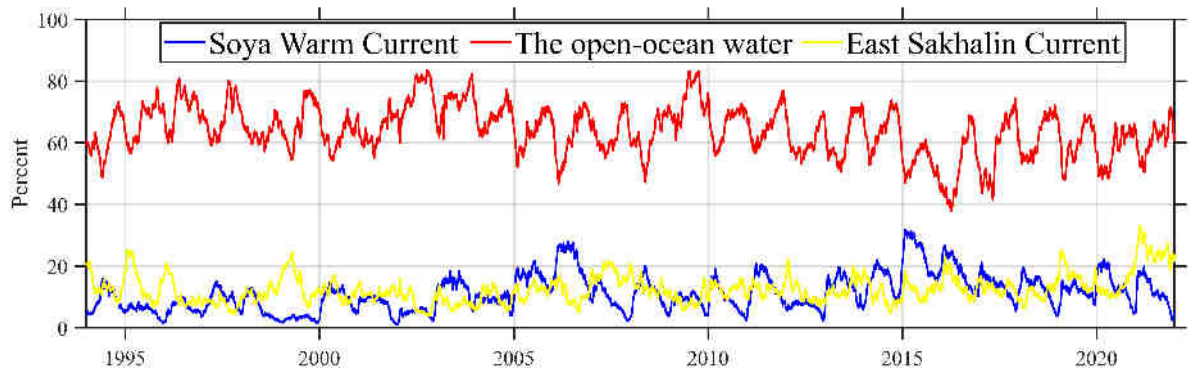


Рис. 3.9: Вариации доли поверхностных вод открытого океана (красный), Восточно-Сахалинского течения (желтый) и теплого течения Соя (синий) в Курильской котловине, ограниченной изобатой 3000 м, в 1994–2021 гг. [123]

Сезонные вариации состава вод в ядрах долгоживущих вихрей демонстрируют существенные различия между антициклонами и циклонами (Рис. 3.10). В холодный сезон наблюдается увеличение доли океанических вод в ядрах антициклонов по сравнению с циклонами, что объясняется их формированием вблизи пролива Буссоль — основного пути поступления тихоокеанских вод в Охотское море. В теплый сезон (май-сентябрь) доля океанических вод в циклонах уменьшается, тогда как доли вод течения Соя и Восточно-Сахалинского течения возрастают, что связано с сезонной интенсификацией этих течений [31; 116].

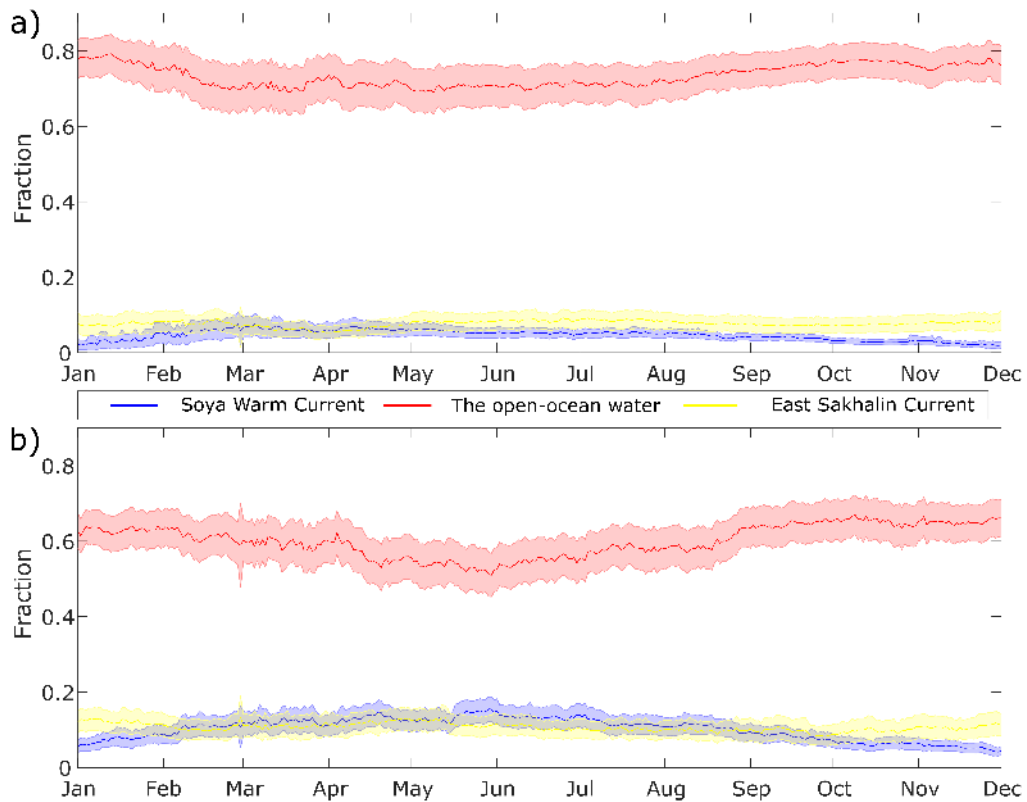


Рис. 3.10: Сезонные вариации доли вод открытого океана (красный), Восточно-Сахалинского течения (желтый) и теплого течения Соя (синий) в пределах поверхностных ядер долгоживущих а) антициклонов и б) циклонов в Курильской котловине. Данные представлены с 95% доверительным интервалом [123]

Анализ изменчивости состава вод в течение жизненного цикла вихрей не выявил значительных вариаций долей различных водных масс (Рис. 4S в дополнительных материалах к [123]). Это свидетельствует о том, что вихри КК сохраняют исходный состав захваченных водных масс на протяжении всего своего существования, подтверждая их роль как когерентных образований, эффективно изолирующих внутренние воды от окружающей среды.

Для валидации результатов лагранжевого моделирования проведено сравнение с данными дрейфующих буюв, развернутых в Охотском море в рамках совместной программы Университета Хоккайдо и Вашингтонского университета. Были отобраны буйи, оказавшиеся внутри нескольких типичных долгоживущих вихрей в различных частях КК, и получены вертикальные профили температу-

ры и солености внутри этих вихрей.

Результаты для антициклона #2937 в юго-западной части КК, отобранного 17 апреля 2008 года (Рис. 3.11), показывают, что вихрь был заполнен преимущественно смесью вод Восточно-Сахалинского течения и вод открытого океана. Температурные профили демонстрируют холодную и распресненную поверхностную воду — результат весеннего таяния льда. Термохалинные характеристики и T-S диаграммы (Рис. 9S в дополнительных материалах [123]) подтверждают наличие вод как охотоморского, так и тихоокеанского происхождения.

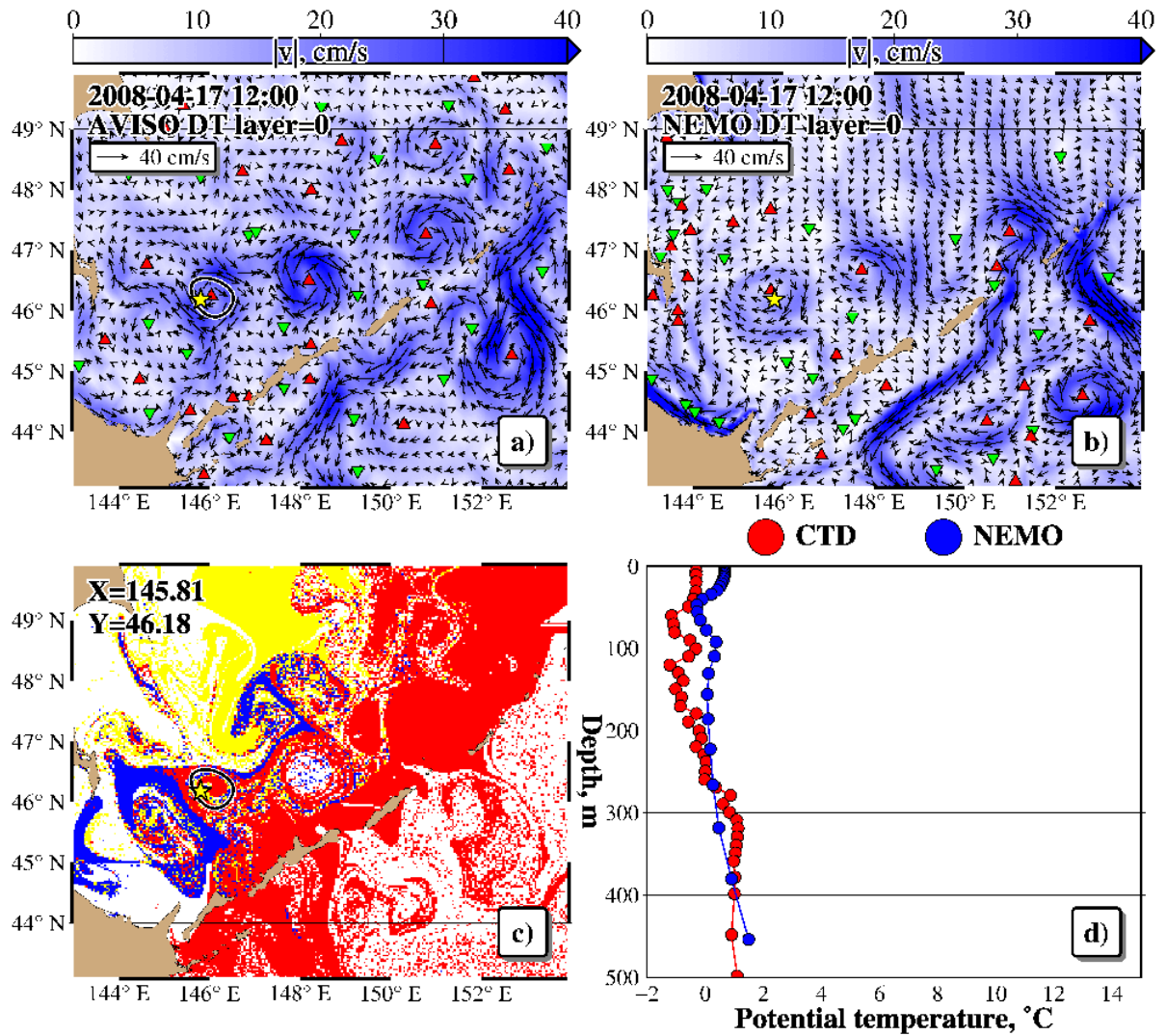


Рис. 3.11: а) Поле поверхностной скорости AVISO и б) GLORYS12V1 с антициклоном #2937 с центром в  $46.18^{\circ}\text{N}$ ,  $145.81^{\circ}\text{E}$  в юго-западной части Курильской котловины, отобранном дрейфующим буем (звезда) 17 апреля 2008 года. в) Альтиметрическая карта происхождения показывает, что этот вихрь был заполнен смесью «желтых» вод Восточно-Сахалинского течения и «красных» вод открытого океана. г) Температурные профили, предоставленные буем (красные точки) и данными реанализа GLORYS12V1 (синие точки) в тот же день [123]

Циклон #3951 в центральной части КК, отобранный 6 сентября 2015 года (Рис. 3.12), демонстрирует иной состав — он был заполнен преимущественно водами открытого океана с небольшой долей вод Восточно-Сахалинского течения. Вертикальные профили температуры и солёности, а также T-S диаграммы (Рис. 10S в дополнительных материалах [123]) характерны для субарктических

ВОД.

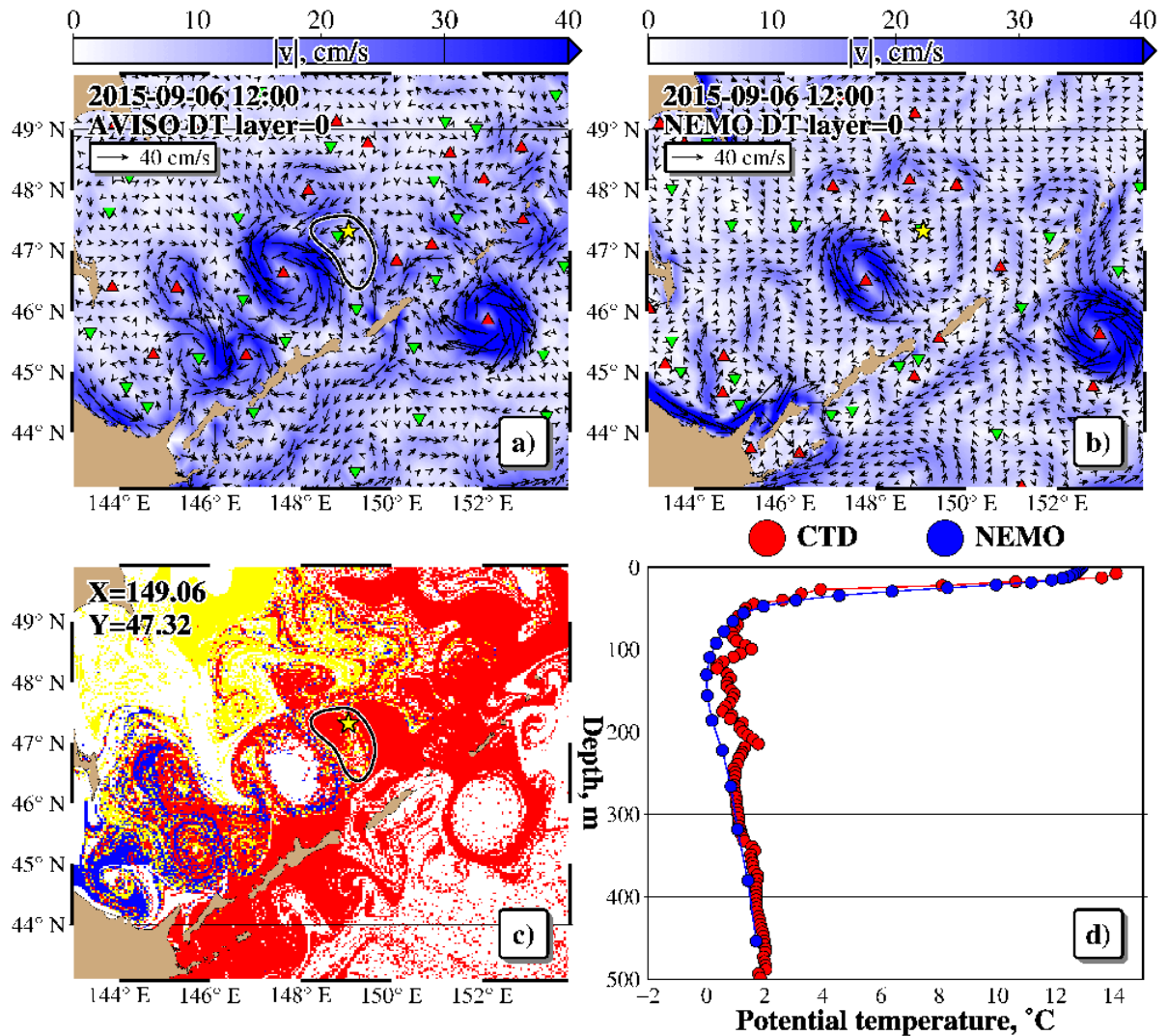


Рис. 3.12: а) Поле поверхностной скорости AVISO и б) GLORYS12V1 с циклоном #3951 с центром в 47.32°N, 149.06°E в центральной части Курильской котловины, отобранном дрейфующим буюм (звезда) 6 сентября 2015 года. в) Альтиметрическая карта происхождения показывает, что этот вихрь был заполнен смесью «красных» вод открытого океана с небольшой долей «желтых» вод Восточно-Сахалинского течения. д) Температурные профили, предоставленные буюм (красные точки) и рассчитанные с использованием данных реанализа GLORYS12V1 (синие точки) [123]

Антициклон #3335 в южной части КК, отобранный 5 октября 2011 года (Рис. 3.13), содержал смесь вод открытого океана и теплого течения Соя. Термохалинные характеристики этого антициклона сходны с таковыми для циклона

#3951 (Рис. 11S в дополнительных материалах [123]), что указывает на возможное сходство процессов формирования вихрей разной полярности в этом регионе.

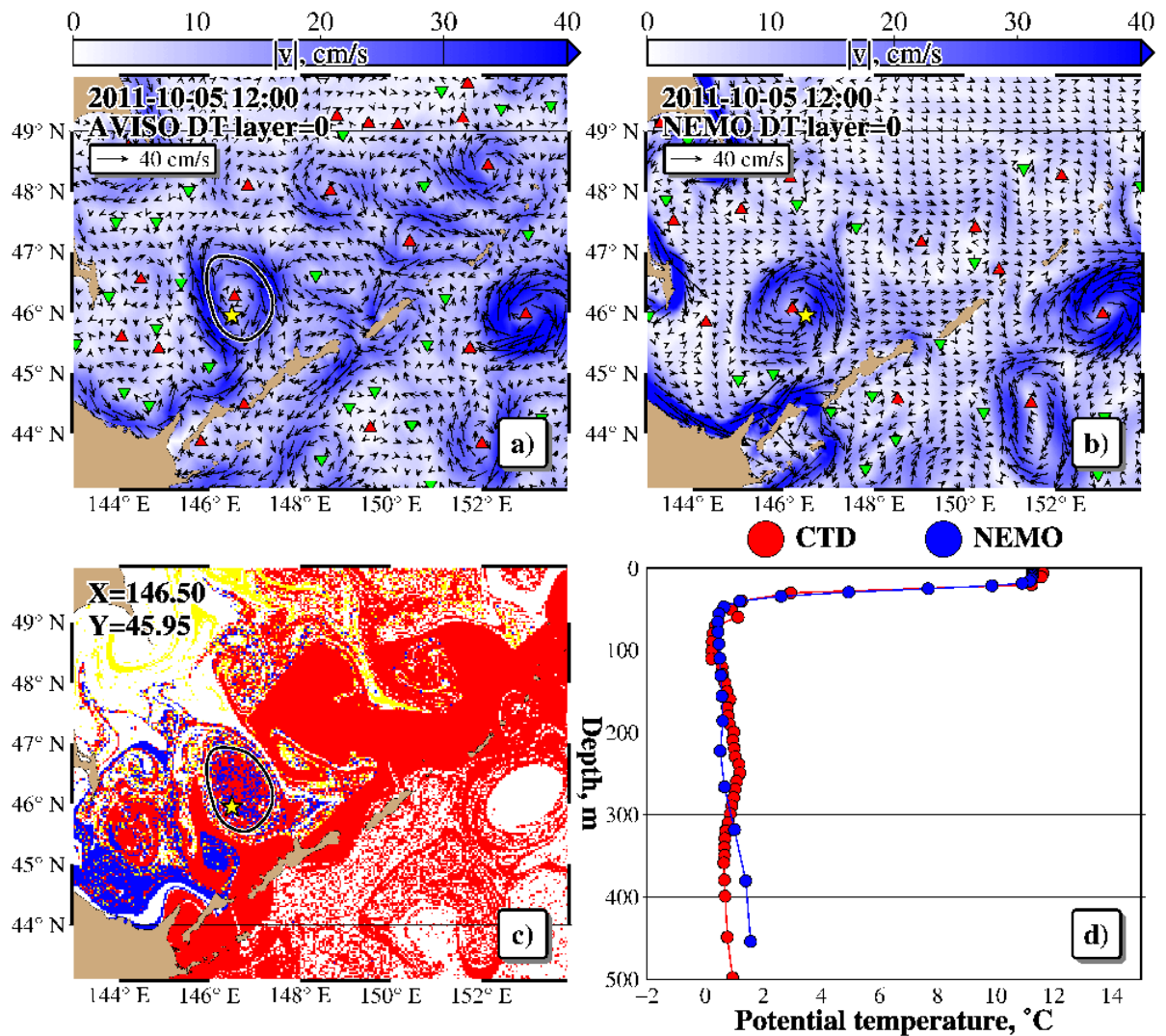


Рис. 3.13: а) Поле поверхностной скорости AVISO и б) GLORYS12V1 с антициклоном #3335 с центром в 45.95°N, 146.50°E в южной части Курильской котловины, отобранном дрейфующим буем (звезда) 5 октября 2011 года. в) Альтиметрическая карта происхождения показывает, что этот вихрь был заполнен смесью «красных» вод открытого океана и «синих» вод теплого течения Соя. д) Температурные профили, предоставленные буем (красные точки) и рассчитанные с использованием данных реанализа GLORYS12V1 (синие точки) [123]

Сравнение результатов лагранжевого моделирования с данными дрейфующих буюв демонстрирует хорошее качественное соответствие. Во всех рассмот-

ренных случаях состав водных масс, определенный по О-картам, согласуется с термохалинными характеристиками, измеренными *in situ*. Это подтверждает адекватность примененной методологии для оценки происхождения вод в вихревых ядрах и свидетельствует о реальной способности вихрей КК захватывать и транспортировать водные массы различного генезиса.

Высокие значения параметра нелинейности ( $\eta > 1$  для 97.9% антициклонов и 97.8% циклонов) подтверждают, что вихри КК являются когерентными образованиями, способными не только переносить тепло, соль и потенциальную завихренность, но и биохимические трассеры, такие как питательные вещества и фитопланктон [123]. Вихри, образующиеся весной в продуктивных районах залива Терпения и дрейфующие в сторону котловины, могут транспортировать богатую питательными веществами воду в олиготропные районы, создавая благоприятные условия для морских экосистем и устойчивого рыболовства [55; 110]. Таким образом, вихри представляют собой важный механизм обогащения азотом вод Курильской котловины, содержащих продуктивные воды открытого океана и Восточно-Сахалинского течения.

### **3.4. Сравнение свойств вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского желоба**

Сравнительный анализ характеристик мезомасштабных вихрей в Курильской котловине (КК) Охотского моря и Курило-Камчатском желобе (ККЖ) Тихого океана выявляет существенные различия, обусловленные контрастными физико-географическими условиями этих регионов. Проведенное сравнение основано на данных систематической переписи вихрей за период 1993-2021 гг., выполненной с использованием единого алгоритма AMEDA [60], что обеспечивает сопоставимость результатов.

**Распределение по полярности** демонстрирует сходную тенденцию в обоих регионах — преобладание циклонических вихрей над антициклоническими.

ми. В Курило-Камчатском желобе наблюдается выраженное доминирование циклонических вихрей (КС) над антициклоническими (КАС) — 1528 КС против 992 КАС без ограничения по времени жизни и 468 КС против 219 КАС для долгоживущих вихрей (время жизни  $>90$  суток) [126]. Аналогичная картина выявлена и в Курильской котловине, где зафиксировано преобладание долгоживущих циклонов (СЕ) над антициклонами (АЕ) - 366 СЕ против 243 АЕ при времени жизни более 30 суток [123]. Однако для Курильской котловины это является новым научным результатом, противоречащим устоявшемуся мнению о преобладании антициклонических вихрей в КК, основанному на визуальных наблюдениях и ограниченных натурных данных [77; 131]. Особенностью Курильской котловины является то, что с увеличением времени жизни вихрей асимметрия в пользу циклонов становится более выраженной, тогда как в целом по Охотскому морю наблюдается примерный паритет между количеством АЕ и СЕ.

**Механизмы генерации и устойчивости** вихрей в двух регионах демонстрируют как сходства, так и различия. В Курило-Камчатском желобе наблюдается значительно более высокая склонность циклонов к разделению по сравнению с антициклонами - отношение числа событий разделения циклонов к антициклонам составляет более 3:1 для долгоживущих вихрей. В Курильской котловине также отмечается аналогичная тенденция большей склонности циклонов к разделению, хотя и менее выраженная, что подтверждает общую закономерность, характерную для обоих регионов. Каждое событие разделения генерирует дополнительный вихрь и увеличивает общее количество циклонов по сравнению с антициклонами при прочих равных условиях, что частично объясняет наблюдаемую асимметрию в распределении вихрей по полярности. При этом в Курильской котловине антициклоны демонстрируют большую устойчивость, что связано с преобладающей антициклонической циркуляцией в этом регионе и стабилизирующим влиянием небольших циклонов, часто наблюдаемых вокруг квазистационарных антициклонов.

**Временные характеристики** вихрей существенно различаются между регионами (Таблица 3.2). Антициклоны Курильской котловины характеризуются большей продолжительностью жизни (среднее значение 203 дня) по сравнению с циклонами (127 дней), тогда как в Курило-Камчатском желобе антициклоны также живут дольше циклонов (212 дней против 180 дней). Доля долгоживущих вихрей (время жизни  $>300$  дней) в КК составляет 18% для антициклонов и 7.3% для циклонов, что значительно превышает соответствующие показатели для ККЖ (12.3% и 6.4%) [123; 126].

Таблица 3.2. Сравнение кинематических характеристик вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского желоба (по данным [123])

| Характеристика                       | Курильская котловина |      | Курило-Камчатский желоб |       |
|--------------------------------------|----------------------|------|-------------------------|-------|
|                                      | АЕ                   | СЕ   | КАС                     | КС    |
| Среднее время жизни, дни             | 203                  | 127  | 212                     | 180   |
| Медианное время жизни, дни           | 146                  | 96   | 67                      | 74    |
| Средняя скорость переноса, км/день   | 3,86                 | 4,48 | 5,01                    | 5,20  |
| Среднее смещение центров, км         | 136                  | 118  | 189,3                   | 161,6 |
| Средний радиус, км                   | 34,5                 | 34   | 36,8                    | 38    |
| Параметр нелинейности $\eta > 1$ , % | 97,9                 | 97,8 | 91                      | 92    |

**Кинематические характеристики** показывают, что вихри Курильской котловины являются значительно более медленными объектами по сравнению с вихрями Курило-Камчатского желоба. Средняя скорость переноса антициклонов в КК составляет 3.86 км/день, циклонов - 4.48 км/день, тогда как в ККЖ соответствующие значения равны 5.01 км/день и 5.2 км/день [123; 126]. Средние радиусы вихрей в Курильской котловине составляют 34.5 км для антициклонов и 34.0 км для циклонов, что свидетельствует об их сравнительно компактных размерах по сравнению с вихрями ККЖ, где средний радиус составляет 36.8 км для антициклонов и 38.0 км для циклонов. Это различие объясняется отсутствием сильных фоновых течений в Курильской котловине, в то время как вихри

ККЖ адвектируются интенсивными потоками Восточно-Камчатского течения и Ойясио.

**Параметр нелинейности** демонстрирует высокие значения в обоих регионах, но с существенными различиями. В Курильской котловине 97.9% антициклонов и 97.8% циклонов имеют  $\eta > 1$ , тогда как в Курило-Камчатском желобе соответствующие показатели составляют 91% и 92% [123; 126]. Более того, 27% антициклонов ККЖ имеют  $\eta > 4$  против только 5% циклонов, что указывает на значительно более высокую нелинейность антициклонических вихрей в этом регионе. Высокие значения параметра нелинейности подтверждают, что вихри в обоих регионах являются когерентными образованиями, способными эффективно транспортировать водные массы и их свойства.

**Пространственное распределение** вихрей имеет принципиальные различия. В Курило-Камчатском желобе вихри концентрируются вдоль оси желоба, который служит зоной их преимущественного переноса: антициклоны располагаются вдоль западного склона, а циклоны — вдоль восточного [126]. В Курильской котловине распределение вихрей более сложное: антициклоны чаще наблюдаются в южной части котловины, особенно в районах проливов Бусоль и Крузенштерна, а циклоны концентрируются в глубоководных районах центральной части котловины [123].

**Роль в экосистемах** обоих регионов значительна, но имеет различную природу. В Курило-Камчатском желобе вихри способствуют переносу субтропических вод на север и субарктических на юг, влияя на формирование фронтальных зон и продуктивности региона [90]. В Курильской котловине вихри играют ключевую роль в обогащении олиготропных вод питательными веществами, особенно за счет транспорта богатых железом вод из районов таяния льда в заливе Терпения [55; 110].

Таким образом, проведенное сравнение выявляет фундаментальные различия в характеристиках и динамике мезомасштабных вихрей Курильской котловины и Курило-Камчатского желоба, обусловленные различиями в топографии,

циркуляционных условиях и механизмах генерации вихрей в этих контрастных регионах северо-западной части Тихого океана.

### 3.5. Выводы к главе 3

В результате комплексного исследования мезомасштабных вихрей в Курильской котловине (КК) Охотского моря на основе спутниковых альтиметрических данных за 1993–2021 гг. с применением алгоритма AMEDA и лагранжевых методов анализа были получены следующие основные результаты:

- Проведена первая систематическая перепись мезомасштабных вихрей в Курильской котловине. Установлено, что в этом регионе долгоживущие (время жизни  $>30$  суток) циклоны количественно преобладают над антициклонами: 366 СЕ против 243 АЕ. Этот результат опровергает устоявшееся мнение о доминировании антициклонов в КК, основанное на визуальных наблюдениях, и объясняется, в частности, более высокой частотой разделения циклонов.
- Выявлены основные зоны генерации и повышенной встречаемости вихрей. Антициклоны чаще всего наблюдаются в южной части котловины, в районах проливов Буссоль и Крузенштерна, а также в центральной части КК. Циклоны концентрируются преимущественно в глубоководных районах центральной части котловины. Показано, что большинство вихрей, формирующихся в прикурильской зоне, являются короткоживущими, и лишь немногие из них проникают в глубоководную часть КК.
- Определены кинематические характеристики вихрей КК. Средняя продолжительность жизни долгоживущих АЕ составляет 203 дня, СЕ — 127 дней. Вихри КК характеризуются низкими скоростями переноса (3.86–4.48 км/сут) и небольшими смещениями центров (116–136 км) по сравнению с вихрями в открытом океане, что обусловлено отсутствием

сильных фоновых течений в котловине. Подавляющее большинство вихрей (более 97%) являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), что подтверждает их когерентную природу и способность к эффективному переносу водных масс и их свойств.

- Впервые с помощью лагранжева метода количественно оценены доли вод различного происхождения в поверхностных ядрах вихрей КК. Установлено, что вихри обоих знаков содержат преимущественно воды открытого океана, доля которых возрастает в холодный сезон. Вклад вод Восточно-Сахалинского течения и теплого течения Соя существенно ниже и характеризуется сезонной изменчивостью. Верификация результатов с данными дрейфующих буев и реанализа GLORYS12V1 подтвердила, что лагранжевы карты происхождения (О-карты) адекватно отражают реальный состав вод в вихревых ядрах.
- Проведен сравнительный анализ вихрей КК с вихрями Курило-Камчатского желоба (ККЖ), выявивший фундаментальные различия в их динамике. Вихри ККЖ, находясь под влиянием интенсивных течений (Ойясио, Восточно-Камчатское), обладают большими скоростями переноса и смещения. Вихри КК, напротив, являются более медленными и стабильными структурами, часто привязанными к локальной топографии. Общей чертой является высокий параметр нелинейности, подтверждающий их ключевую роль в перераспределении тепла, соли и биогенных элементов, что имеет важное значение для поддержания высокой биологической продуктивности Охотского моря.

## Глава 4

# Многолетняя статистика, эволюция и роль мезомасштабных вихрей в водообмене северной части Японского моря

## 4.1. Физико-географическая и динамическая характеристика региона

Японское море (ЯМ) является окраинным морем западной части Тихого океана, ограниченное материком Евразии, Японским архипелагом и островом Сахалин. С юга море сообщается с Восточно-Китайским морем через пролив Цусима (Корейский пролив), с востока — с Тихим океаном через Сангарский пролив, с севера — с Охотским морем через проливы Лаперуза (Соя) и Татарский [147]. Такая конфигурация определяет особенности циркуляции и термохалинной структуры водного столба. Максимальная глубина моря достигает 3720 м в центральной части Японской котловины, а средняя глубина составляет около 1500 м [20; 147].

Батиметрия моря сложна и оказывает определяющее влияние на циркуляцию. Выделяются три основные глубоководные котловины, разделённые подводными поднятиями (Рис. 4.1а):

- **Японская котловина** — самая крупная и глубокая (до 3720 м), занимает северную часть моря.
- **Котловина Ямато** — расположена к юго-востоку, отделена от Японской котловины поднятием Ямато, с максимальными глубинами дна свыше 3000 м.
- **Котловина Цусима (Уллындо)** — расположена на юго-западе, к восто-

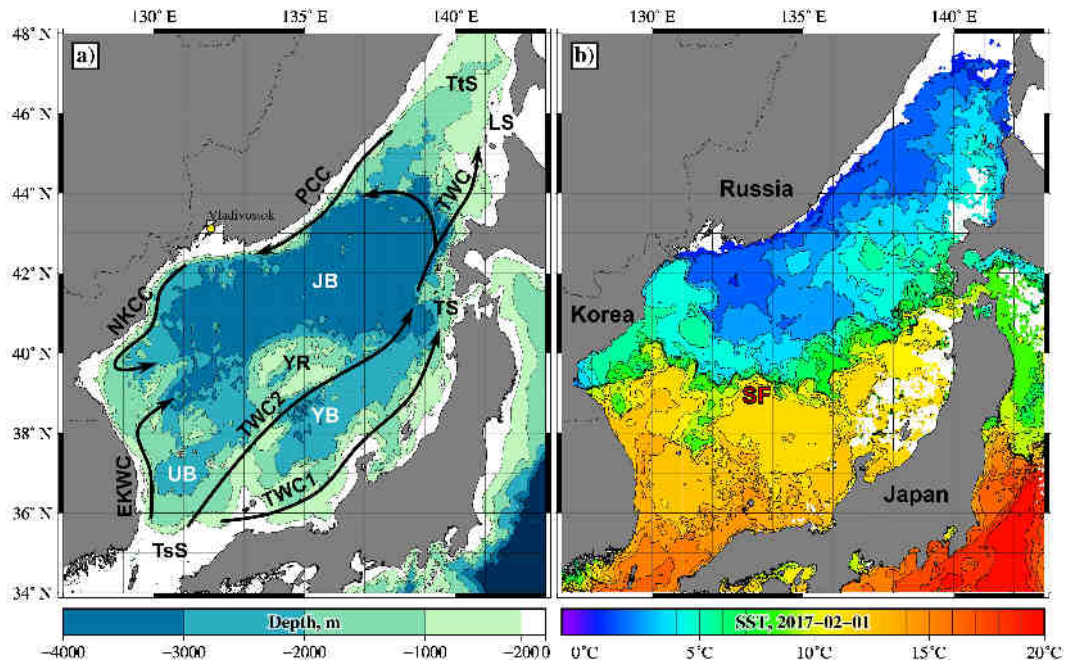


Рис. 4.1: а) Батиметрия Японского моря со схемой основных течений (чёрные стрелки). Обозначения: JB (Японская котловина), YB (котловина Ямато), UB (котловина Уллындо), YR (поднятие Ямато), TsS (Цусимский пролив), TS (Сангарский пролив), LS (пролив Лаперуза), TtS (Татарский пролив), EKWC (Восточно-Корейское тёплое течение), НКСС (Северо-Корейское холодное течение), РСС (Приморское холодное течение), TWC1 и TWC2 (1-я и 2-я ветви тёплого течения Цусима), SF (Субполярный фронт). б) Температура поверхности моря (SST) 2 января 2017 г. по данным MODIS Aqua/Terra, демонстрирующая положение Субполярного фронта по концентрации изотерм. Взято из [125].

ку от Корейского полуострова, с глубинами дна свыше 2000 м.

Подводные возвышенности, такие как поднятие Ямато, играют важную роль в стабилизации течений и генерации вихрей [61; 80; 88; 118].

Циркуляция поверхностных вод в Японском море определяется системой ветвей Цусимского теплого течения (TWC), которые переносят теплые и соленые субтропические воды из Тихого океана. После входа в море через Цусимский пролив, течение разделяется на две основные ветви: восточную (Восточно-Корейское теплое течение – EKWC) и западную (течение вдоль побережья Японии) (рис. 4.1а). Во внутренних районах моря формируется субполярный циркуляционный контур, включающий Приморское (Лиманское) течение, несущее холодные субарктические воды с севера, и его продолжение – Северо-Корейское холодное течение, текущее в южном направлении вдоль западного побережья [19; 80; 137].

Ключевым динамическим элементом, делящим море на субтропическую и субарктическую части, является Субполярный фронт (SF), расположенный между  $39^\circ$  и  $41^\circ$  северной широты и простирающийся через весь бассейн от корейского побережья до японских островов (рис. 4.1b). Наличие этого фронта подтверждается не только градиентами температуры и солености, но и различиями в гидробиологических характеристиках и биогеохимических процессах [118; 129]. По данным спутниковых наблюдений, фронт проявляется в виде концентрации изотерм с резким градиентом температуры. Восточно-западное течение вдоль SF характеризуется высокой изменчивостью с сезонной миграцией и интенсивной вихревой активностью [13]. С северной стороны фронта преобладают холодные ( $4-8^\circ\text{C}$ ), малосоленые (33.8-34.0) воды субарктического происхождения, а с южной стороны — теплые ( $8-15^\circ\text{C}$ ), более соленые (34.1-34.3) воды субтропического происхождения [20].

Ключевой особенностью циркуляции является крупномасштабный циклонический круговорот над Японской котловиной. Он формируется под действием

отрицательного ротора напряжения ветра, особенно сильного в период зимнего муссона, и представляет собой баротропную циркуляционную ячейку [121; 144]. Этот круговорот охватывает всю субарктическую часть моря и влияет на движения мезомасштабных вихрей. Траектории некоторых течений подвержены сезонным колебаниям и межгодовой изменчивости [134].

Климатические условия региона определяются муссонной циркуляцией. Зимой (ноябрь-март) преобладают холодные континентальные воздушные массы с северо-западными и северными ветрами, создающими отрицательный вихрь напряжения ветра, благоприятный для генерации антициклонических вихрей. Летом (июнь-сентябрь) преобладают южные и юго-восточные муссонные ветра, формирующие положительный вихрь напряжения, благоприятный для циклонических вихрей. Это приводит к выраженной сезонной изменчивости вихревой активности в различных районах моря [137]. Кроме того, в зимний период в северных районах ЯМ наблюдается интенсивное льдообразование, особенно в заливе Петра Великого и вдоль российского побережья, что влияет на вертикальный обмен и формирование водных масс [52; 118].

Особое экологическое значение имеет высокая биологическая продуктивность ЯМ, особенно в районах с интенсивной вихревой активностью. Вихри способствуют транспорту питательных веществ, формируя продуктивные зоны, привлекательные для рыбных стай. Это делает ЯМ важным регионом для промысла, особенно для минтая, лососевых и скумбрии. Некоторые вихри, такие как Уллюнгский и Окинский антициклоны (Рис. 4.2), образуют квазистационарные структуры, которые на протяжении десятилетий поддерживают высокую продуктивность определенных районов [68; 104]. Кроме того, ЯМ включает несколько природоохранных территорий, таких как заповедник "Дальневосточный морской", где изучение вихревой динамики имеет важное значение для сохранения биоразнообразия и управления рыбными ресурсами [33].

Таким образом, Японское море представляет собой сложную динами-

ческую систему с уникальными физико-географическими характеристиками, определяющими его роль в региональном климате, океанской циркуляции и экосистемных процессах. Понимание закономерностей циркуляции и вихревой динамики в этом регионе имеет как фундаментальное научное значение, так и практическую важность для прогнозирования климатических изменений, управления рыбными ресурсами и охраны морской среды.

## **4.2. Вихри Японского моря: статистика, распределение и механизмы формирования**

Японское море является одним из наиболее вихреактивных морей Мирового океана, где мезомасштабные вихри играют ключевую роль в переносе тепла, соли, биогенных элементов и биоты, а также в формировании регионального климата и продуктивности экосистем [88; 124]. Наличие чётко выраженного термохалинного Субполярного фронта, разделяющего субтропические и субарктические водные массы, создаёт благоприятные условия для генерации вихрей различных типов и размеров. Долгосрочные спутниковые наблюдения и развитие автоматических алгоритмов детекции позволили провести детальную перепись вихрей (см., например, ранние работы по спутниковым ИК-изображениям [155; 156], а также более поздние альтиметрические исследования [149]) и выявить особенности их пространственно-временного распределения и эволюции. В настоящей работе на основе алгоритма AMEDA и расширенного временного ряда (1993–2024 гг.) представлена уточнённая статистика вихрей с акцентом на их кинематические характеристики и лагранжев анализ состава водных масс.

Для идентификации и отслеживания мезомасштабных вихрей в настоящей работе использовались ежедневные спутниковые альтиметрические данные (AVISO/CMEMS) [6] за период 1993–2024 гг. с пространственным разрешением  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ . Обработка данных проводилась с помощью алгоритма AMEDA [60], что позволило получить многолетнюю статистику по вихрям, включая их кинематические характеристики.

матические характеристики и события взаимодействия (слияние и разделение) [112; 125].

Статистический анализ, проведённый в работах [124; 125], показал, что за период 1993–2024 гг. в ЯМ было идентифицировано 2717 АЕ и 3823 СЕ с продолжительностью жизни более 30 суток. Это соответствует среднегодовому количеству приблизительно 85 АЕ и 120 СЕ. Полученные количества вихрей (при пороге времени жизни больше 30 суток) превышают оценки, приведённые в работе [149] для вихрей с временем жизни больше 90 суток (273 антициклона и 305 циклонов), что связано с различиями в алгоритмах детектирования (AMEDA vs METAS.1exp) и более низким порогом продолжительности жизни в нашем анализе. Общее распределение частоты встречаемости вихрей выявило чётко выраженные места их повышенной активности, которые можно разделить на три основные категории (Рис. 4.2):

1. **Субтропические вихри** — локализованы к югу от  $40^\circ$  с.ш., в котловинах Уллындо (UB) и Ямато (YB). К ним относятся квазистационарные антициклоны: Уллонгский (UE), Окинский (OE) и Вонсанский (WE) АЕ, а также циклонический вихрь Док (DE) [19; 40; 61; 108].
2. **Субарктические (фронтальные) вихри** — формируются в непосредственной близости от SF и к северу от него. Их образование тесно связано с меандрированием фронтальных струй и взаимодействием течений с подводной топографией [13; 88; 115; 124].
3. **Вихри северо-восточной части моря** — ранее малоизученная группа вихрей, регулярно формирующихся в районе разветвления Цусимского течения, к западу от острова Хоккайдо [125].

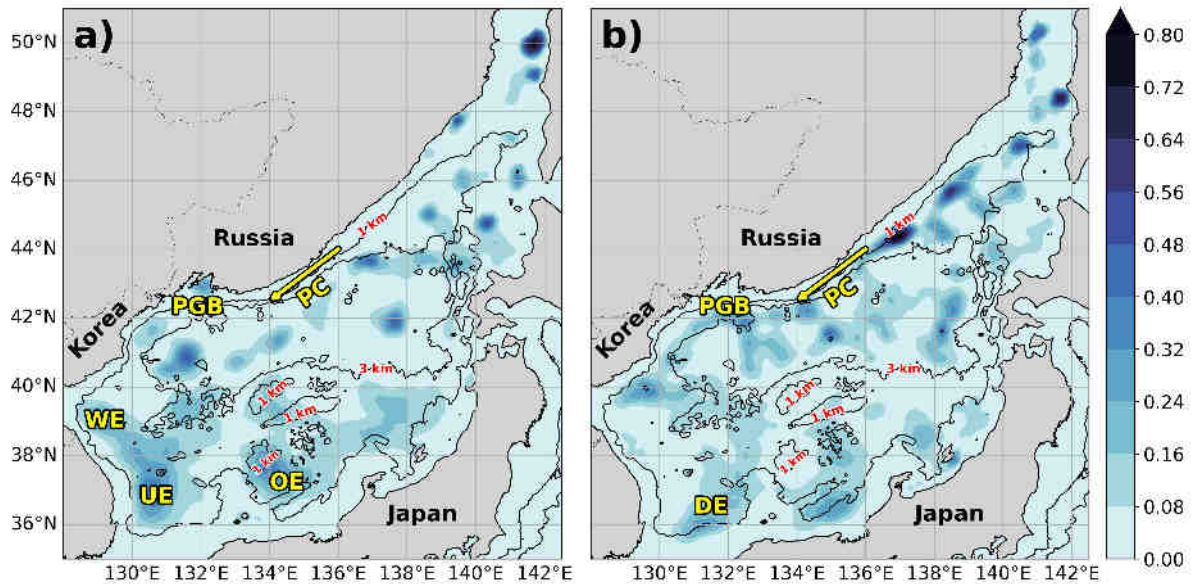


Рис. 4.2: Частота встречаемости мезомасштабных а) антициклонов и б) циклонов с жизненным циклом более 30 суток в Японском море за период 1993–2024 гг. по данным альтиметрии и алгоритма AMEDA. Обозначения: UE – Уллуонгский антициклон (Ulleung AE), OE – Окинский антициклон (Oki AE), WE – Вонсанский антициклон (Wonsan AE), DE – циклон Док (Dok CE), PGB – залив Петра Великого, PC – Приморское течение. На основе [125].

Количественный анализ, основанный на разделении моря по 40° с.ш. (приблизительное положение Субполярного фронта), выявил существенное преобладание циклонических вихрей над антициклоническими в обоих регионах. Для вихрей с жизненным циклом более 30 дней общее количество CE превышает количество AE примерно в 1.4 раза. При этом в субарктической части было обнаружено 1671 AE и 2161 CE, что значительно больше, чем в субтропической (1046 AE и 1662 CE соответственно), несмотря на меньшую площадь северной части моря. Это указывает на более высокую интенсивность вихреобразования к северу от фронта. Интересно, что доля долгоживущих вихрей (более 90 дней) в субарктике выше (36% для AE и 40% для CE), чем на юге (25% и 22%), что может свидетельствовать о различных механизмах, поддерживающих их устойчивость, например, о связи с топографией и пограничными течениями [125].

Сравнительный анализ характеристик вихрей в субтропической и субарк-

тической частях моря выявил ряд важных различий [125]. Хотя распределения по продолжительности жизни (в основном 1–12 месяцев) схожи, субтропические вихри, особенно АЕ, в среднем являются более долгоживущими и крупными, что связано с их топографической привязанностью и устойчивостью (Рис. 4.3). Субарктические вихри, как правило, мельче (радиус 20–80 км) и обладают меньшей амплитудой (редко превышают 5–8 см по уровню моря), что обусловлено меньшим радиусом деформации Россби и слабыми термохалинными контрастами в северной части моря [125].

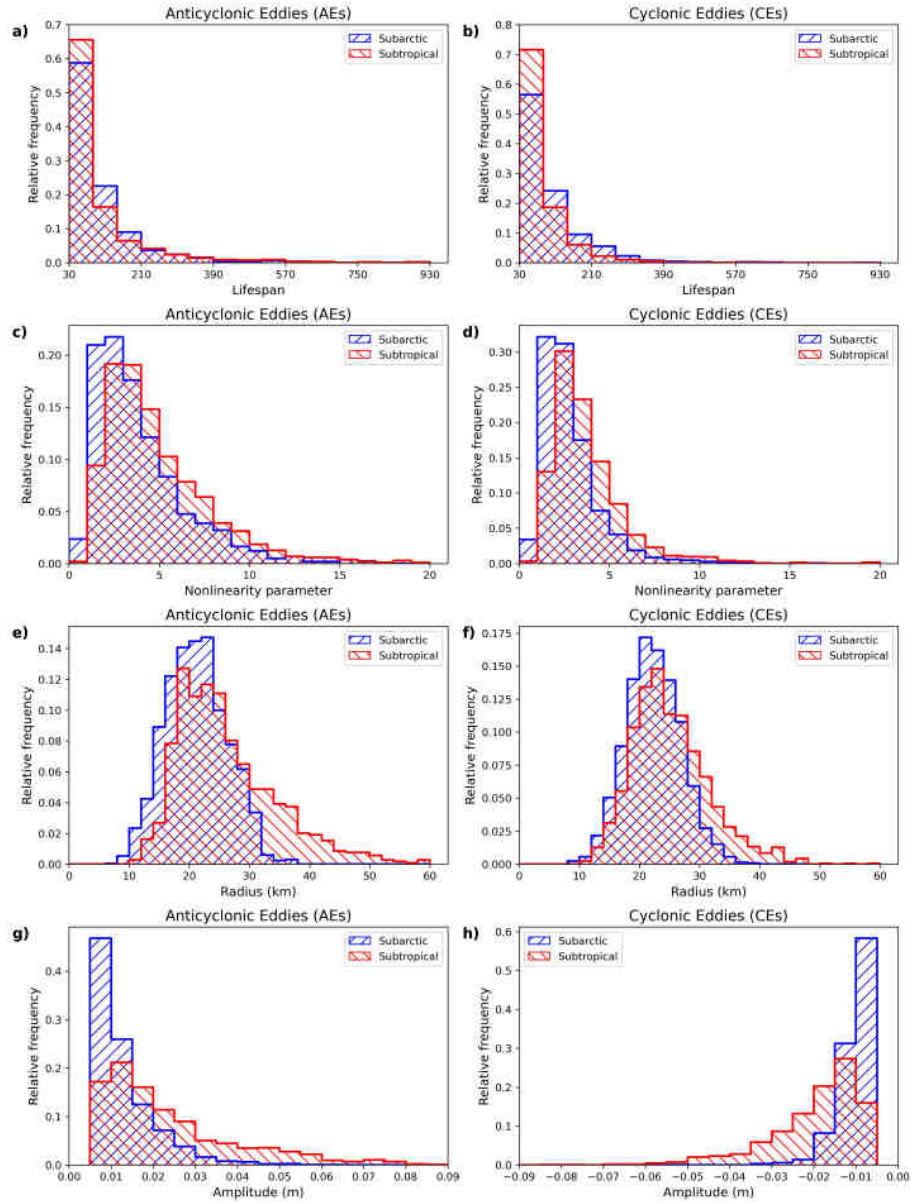


Рис. 4.3: Сравнение распределений параметров субтропических и субарктических вихрей. Верхний ряд: распределение по времени жизни для (a) АЕ и (b) СЕ. Второй ряд: распределение по параметру нелинейности для (c) АЕ и (d) СЕ. Третий ряд: распределение по радиусу для (e) АЕ и (f) СЕ. Нижний ряд: распределение по амплитуде для (g) АЕ и (h) СЕ.

Ключевым параметром, определяющим способность вихря переносить водные массы, является параметр нелинейности ( $\eta = V/c$ , отношение максимальной скорости вращения к скорости перемещения). Распределение этого параметра (Рис. 4.3с,d) демонстрирует, что подавляющее большинство вихрей в ЯМ

являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), однако АЕ в среднем обладают большей нелинейностью по сравнению с СЕ. Это особенно характерно для квазистационарных субтропических АЕ в котловинах Уллындо и Ямато, которые являются "ловушками" для водных масс. В субарктической зоне также обнаружены области с высоконелинейными АЕ, например, в северо-восточной части моря, что ранее не было известно [125].

Более детальную пространственную картину нелинейности вихревой активности в Японском море демонстрирует Рис. 4.4. На нем показаны карты среднего значения параметра нелинейности  $\eta$  для АЕ и СЕ, рассчитанные на основе данных спутниковой альтиметрии за 1993–2024 гг. Цветом на картах кодируется средняя величина  $\eta$  в каждой точке, где когда-либо наблюдался вихрь (алгоритм построения карты подробно описан в разделе 1.3.2).

Анализ карт на Рис. 4.4 подтверждает и визуализирует сделанные ранее выводы. Наиболее высокие значения параметра нелинейности ( $\eta > 4$ ) характерны для квазистационарных антициклонов в южной части моря: в котловине Уллындо (район Уллыонгского АЕ) и, особенно, в котловине Ямато (район Окинско-го АЕ). Эти вихри, будучи привязанными к подводной топографии, обладают низкой скоростью перемещения, что и обеспечивает их высокую нелинейность и способность эффективно удерживать и транспортировать водные массы.

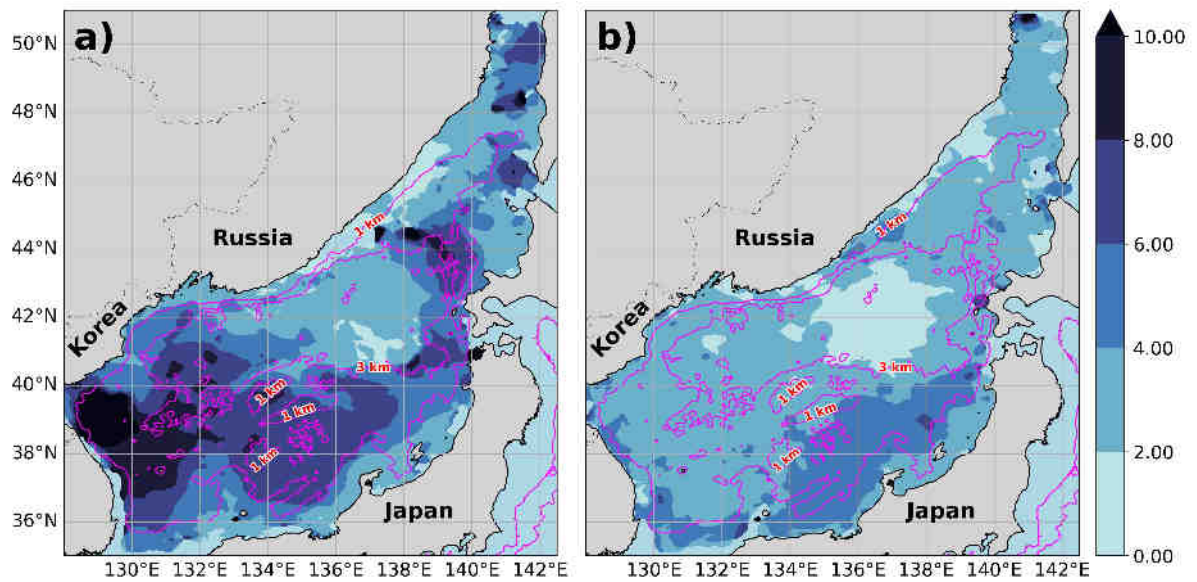


Рис. 4.4: Карты со значениями параметра нелинейности  $\eta$  для детектированных (а) антициклонов и (б) циклонов в Японском море за период 1993–2024 гг. Цветом закодированы средние значения параметра нелинейности, рассчитанные для каждой точки, где наблюдались вихри. Адаптировано из [125]

В субарктической зоне, к северу от  $40^\circ$  с.ш., значения параметра нелинейности в целом ниже, что согласуется с меньшими размерами и амплитудой этих вихрей. Тем не менее, здесь также прослеживаются отдельные очаги повышенной нелинейности, особенно для АЕ, что подтверждает наличие когерентных структур, способных к переносу субтропических вод в высокие широты. Обращает на себя внимание пространственная неоднородность: зоны с наиболее нелинейными АЕ и СЕ пространственно разнесены, что, вероятно, связано с разными механизмами их генерации. Так, для СЕ зона с относительно высокими значениями  $\eta$  прослеживается вдоль западного побережья Хонсю и Хоккайдо, в области взаимодействия Цусимского течения с водами субарктического круговорота.

Рассмотренные выше различия в нелинейности между АЕ и СЕ имеют фундаментальное динамическое объяснение, связанное с сохранением потенциальной завихренности. Абсолютная завихренность в ядре АЕ ( $f - |\zeta|$ ) меньше, чем в СЕ ( $f + |\zeta|$ ). Следовательно, для сохранения потенциальной завихренности

$PV = (f + \zeta)/h$ , стратификация и, как следствие, градиент  $PV$  на периферии АЕ оказываются более резкими. Это создает прочный динамический барьер, который препятствует обмену свойствами с окружающими водами и делает антициклоны более когерентными и устойчивыми структурами по сравнению с СЕ [87; 125].

Генерация мезомасштабных вихрей в ЯМ обусловлена комплексом динамических процессов, которые различаются в зависимости от региона.

**Субтропическая зона.** Основным механизмом является бароклинная и баротропная неустойчивость ветвей Цусимского течения (ТВС), усиленная влиянием подводной топографии (Рис. 4.1). Например, Окинский антициклон (ОЕ) формируется над склоном поднятия Оки (Oki Spur) вследствие отрыва меандра ТВС [40; 47]. Уллюнгский антициклон (УЕ) генерируется в результате взаимодействия Восточно-Корейского тёплого течения (ЕКВС) с крутыми склонами котловины Уллындо [19; 108].

**Фронтальная и субарктическая зона.** К северу от SF доминируют два механизма:

1. **Взаимодействие с топографией.** При прохождении потока с антициклоническим сдвигом над подводными горами (например, гайотами Габбас и Кольцо в северо-западной части моря) сохранение потенциальной завихренности  $(f + \zeta)/H = const$  приводит к увеличению значения абсолютной завихренности в числителе и генерации антициклонических вихрей (АЕ) над вершинами или в следе за возвышенностью [124].

2. **Неустойчивость пограничных течений.** На внешней (глубоководной) стороне таких течений, как Приморское течение (РСС), происходит растяжение водных столбов. Для сохранения потенциальной завихренности это требует увеличения положительного относительного завихренности, что приводит к регулярному срыву циклонических вихрей (СЕ) [125]. Этим объясняется высокая концентрация СЕ вдоль материкового склона в северо-западном ЯМ (Рис. 4.2b).

**Северо-восточная зона.** В районе разветвления ТWC у западного побережья Хоккайдо формирование вихрей связано с обтеканием сложной береговой линии (п-ов Осима, залив Исикари) и влиянием глубоководной Японской котловины. Здесь наблюдается чёткая пространственная сегрегация: АЕ регулярно образуются над глубокой частью котловины и на шельфе в заливе Исикари, в то время как СЕ формируются вдоль её восточного склона, где происходит растяжение водных столбов северной ветвью ТWC [125].

Процессы слияния и разделения вихрей являются важными компонентами их жизненного цикла, влияющими на общее количество, размеры и долговечность вихревых структур. Алгоритм AMEDA позволяет детектировать эти события по образованию общих замкнутых линий тока вокруг двух взаимодействующих вихрей одинаковой полярности [60; 125].

Анализ за период 1993–2024 гг. показал, что СЕ в ЯМ в среднем подвержены слиянию и разделению чаще, чем АЕ. Для вихрей с жизненным циклом больше 30 суток зафиксировано 291 событие разделения АЕ и 672 события разделения СЕ, а также 217 событий слияния АЕ и 632 события слияния СЕ. Частота разделений на один вихрь составляет 0.18 для СЕ и 0.11 для АЕ. Поскольку каждое разделение увеличивает общее количество вихрей, эта диспропорция частично объясняет наблюдаемое превышение числа СЕ над АЕ (в 1.6 раза более высокая частота разделений ЦВ согласуется с наблюдаемым превышением их общего количества в 1.4 раза) [125].

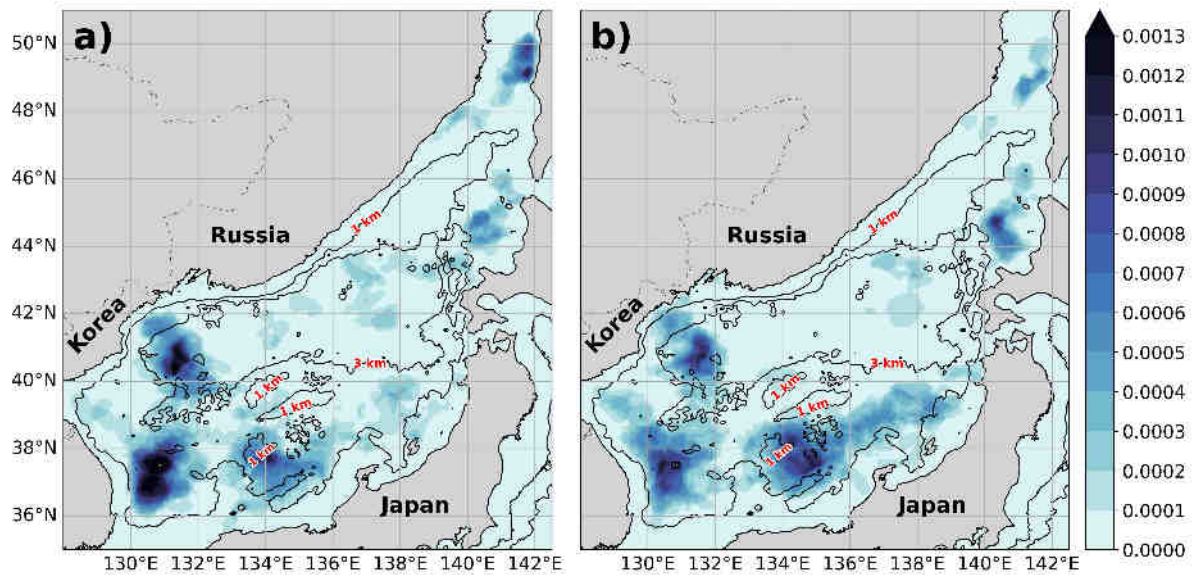


Рис. 4.5: Частота встречаемости событий разделения(а) и слияния(б) для антициклонов в Японском море (1993–2024 гг.). Активные зоны взаимодействия вихрей совпадают с основными местами их встречаемости. Из работы [125].

Пространственное распределение этих событий неравномерно (Рис. 4.5 и 4.6). Активное взаимодействие АЕ характерно для районов их квазистационарного стояния: котловины Уллындо и области к северу от западного сегмента SF. Долгоживущие АЕ в этих районах, существуя длительное время, активно поглощают (сливаются с) меньшие вихрями, что способствует поддержанию их устойчивости и размеров. Для СЕ основной зоной интенсивного взаимодействия (как слияния, так и разделения) является северо-западная часть моря ( $40^{\circ}$ – $42^{\circ}$ N,  $130^{\circ}$ – $135^{\circ}$ E), где они регулярно генерируются Приморским течением. Здесь часто наблюдается картина, когда один СЕ, двигаясь на юго-запад вдоль склона, догоняет и сливается с другим, что приводит к высокой концентрации событий слияния [125].

Интересно отметить, что отсутствие событий слияния и разделения АЕ вдоль внутренней стороны Приморского течения согласуется с низким количеством АЕ в этом регионе. Напротив, значительная активность, включая слияние, разделение и высокую частоту встречаемости АЕ, наблюдается к северо-западу от залива Исикари в северо-восточной части моря [125].

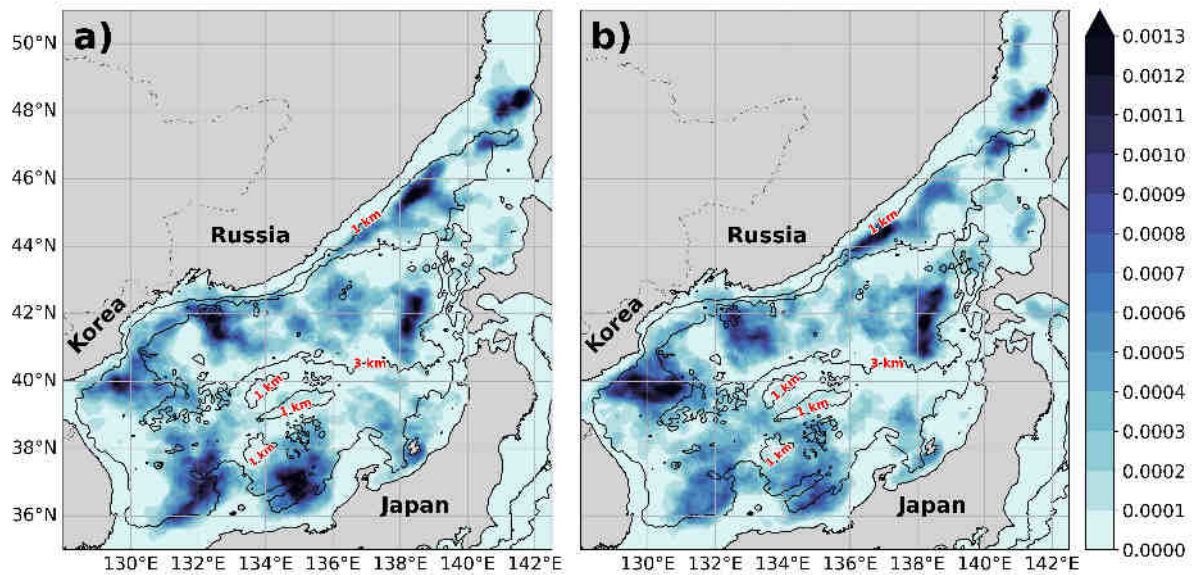


Рис. 4.6: Частота встречаемости событий разделения(а) и слияния(б) для циклонов в Японском море (1993–2024 гг.). Активные зоны взаимодействия вихрей совпадают с основными местами их встречаемости. Из работы [125].

Таким образом, мезомасштабная вихревая активность представляет собой неотъемлемый элемент динамики Японского моря. Статистический анализ, проведённый по многолетним спутниковым данным, выявил устойчивые пространственные закономерности в распределении вихрей, связанные с особенностями циркуляции и топографии. Показано, что субарктические и субтропические вихри обладают различными кинематическими характеристиками, а механизмы их генерации определяются региональными особенностями: топографией, неустойчивостью пограничных течений и положением Субполярного фронта. Процессы слияния и разделения вихрей играют ключевую роль в поддержании их численности и размеров, причем циклоны вовлечены в эти процессы значительно интенсивнее антициклонов. Понимание этих механизмов необходимо для построения адекватных моделей климата, прогнозирования состояния экосистем и управления морскими ресурсами региона.

### **4.3. Исследование вихрей в северо-западной части Японского моря. Лагранжев анализ и судовые измерения**

Северо-западная часть Японского моря (в координатах  $38^{\circ}$ – $43^{\circ}$  с.ш.,  $130^{\circ}$ – $136^{\circ}$  в.д.) представляет собой уникальный полигон для изучения мезомасштабных вихрей (Рис. 4.2). Как было показано в предыдущем разделе, этот район характеризуется повышенной частотой встречаемости как антициклонических (АЕ), так и циклонических вихрей (СЕ). Здесь происходит взаимодействие разнородных водных масс: теплых и соленых субтропических вод, переносимых ответвлениями Цусимского течения, и холодных, распресненных субарктических вод Приморского и Северо-Корейского течений [118; 153]. Зона контакта этих вод формирует северо-западный рукав Субполярного фронта, который является областью интенсивного вихреобразования [80; 155]. Понимание механизмов генерации, эволюции и роли вихрей в этом регионе имеет ключевое значение для описания процессов межфронтального обмена и переноса свойств в масштабах всего бассейна.

#### **4.3.1. Статистический обзор и кинематические характеристики вихрей**

Детальный анализ многолетних альтиметрических данных с помощью алгоритма AMEDA позволил провести подробную перепись мезомасштабных вихрей в северо-западной части Японского моря [124]]. Ранее в этом районе вихри изучались по спутниковым ИК-изображениям [153; 156] и данным альтиметрии [149], однако комплексный лагранжев анализ состава вод в ядрах вихрей выполняется впервые. За период 1993–2022 гг. здесь было идентифицировано 394 АЕ и 417 СЕ без ограничения по времени жизни. Для долгоживущих вихрей с продолжительностью жизни более 30 суток эти числа составили 79 АЕ и 116

СЕ. Таким образом, даже в этом районе, расположенном к северу от фронта, наблюдается преобладание циклонов над антициклонами, что согласуется с общей тенденцией для субарктической зоны, отмеченной в разделе 4.2.

Пространственное распределение вихрей неравномерно. Для антициклонов выделяются два основных очага повышенной встречаемости: западный ( $40^{\circ}$ – $41.5^{\circ}$  с.ш.,  $131^{\circ}$ – $132^{\circ}$  в.д.) и восточный ( $41^{\circ}$ – $42^{\circ}$  с.ш.,  $133^{\circ}$ – $134^{\circ}$  в.д.) (Рис. 4.7). Для циклонов обнаружены три таких очага: западный ( $40.8^{\circ}$ – $42^{\circ}$  с.ш.,  $130^{\circ}$ – $131.5^{\circ}$  в.д.), центральный ( $40.5^{\circ}$ – $41.5^{\circ}$  с.ш.,  $132.5^{\circ}$ – $133.5^{\circ}$  в.д.) и восточный ( $41^{\circ}$ – $42^{\circ}$  с.ш.,  $134.5^{\circ}$ – $135.5^{\circ}$  в.д.) (Рис. 4.8) [124]. Важно отметить, что места формирования и разрушения вихрей (зеленые и красные точки на рисунках) также тяготеют к этим районам, что свидетельствует о локальном характере их генерации и диссипации.

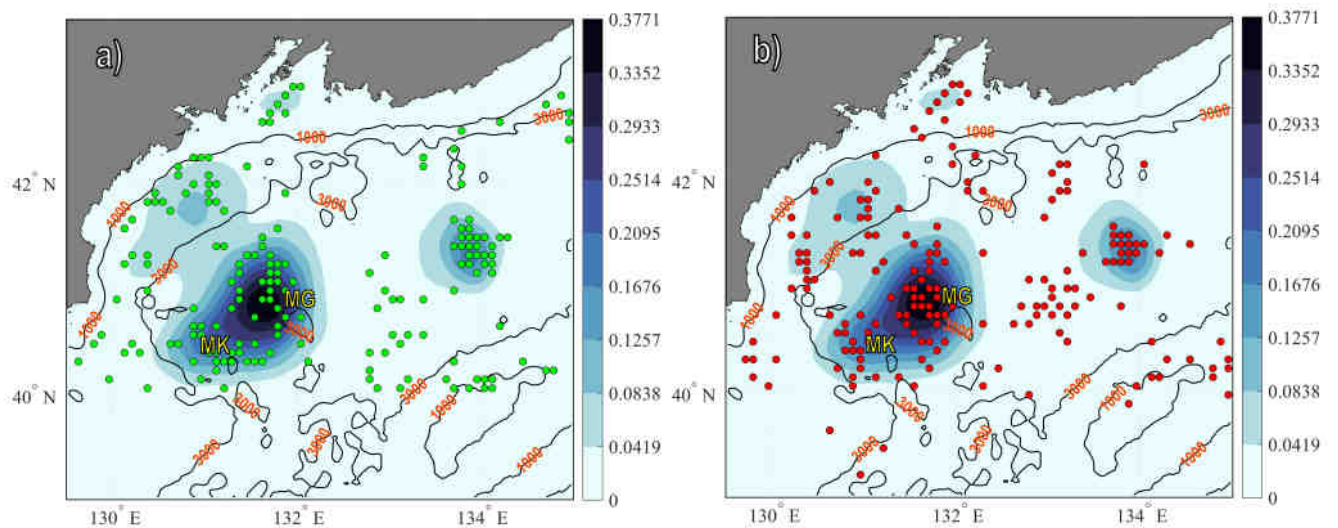


Рис. 4.7: Частота встречаемости антициклонов с временем жизни более 30 суток в северо-западной части Японского моря за 1993–2022 гг. с наложенными местами формирования (а) и разрушения (б). Зеленые кружки – формирование, красные – разрушение. Показаны положения гайотов Габбас (MG) и Кольцо (МК). Адаптировано из [124].

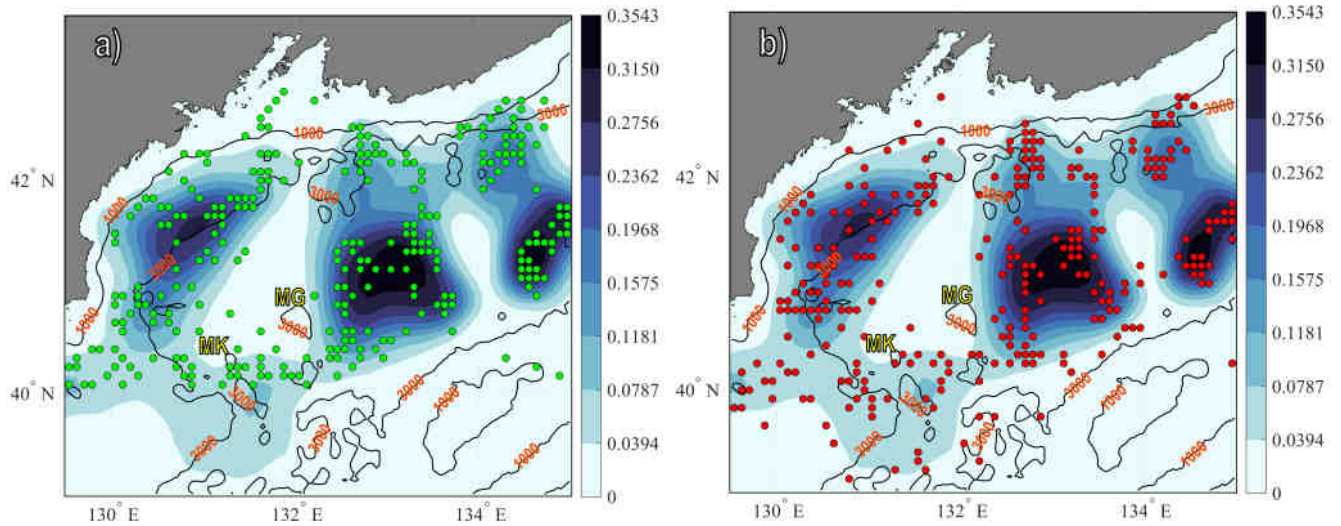


Рис. 4.8: То же, что на Рис. 4.7, но для циклонов. Адаптировано из [124].

Дополнительную информацию о пространственной локализации дает распределение числа вихрей по долготе формирования и разрушения (Рис. 4.9). Видно, что основная масса как АЕ, так и СЕ формируется и разрушается в двух основных диапазонах:  $131^{\circ}$ – $132^{\circ}$  в.д. и  $133^{\circ}$ – $134^{\circ}$  в.д., что соответствует западному и восточному очагам.

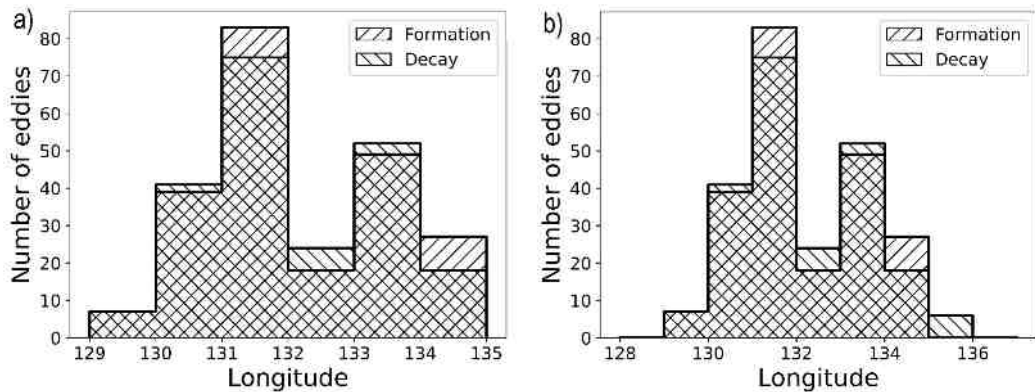


Рис. 4.9: Распределение числа долгоживущих антициклонов (а) и циклонов (б) по долготе мест формирования (зеленые столбцы) и разрушения (красные столбцы). Адаптировано из [124].

Кинематические характеристики вихрей в северо-западном районе имеют свои особенности. Абсолютное смещение центров за время жизни редко превышает 150 км, причем средние значения составляют около 65 км для АЕ и 64 км

для СЕ (Рис. 4.10а) [124]. Средняя скорость вращения составляет 7 см/с для АЕ и 5 см/с для СЕ, с максимумами до 35 см/с и 20 см/с соответственно (Рис. 4.10б). Это указывает на то, что вихри в данном районе являются достаточно энергичными, но при этом медленно перемещающимися структурами.

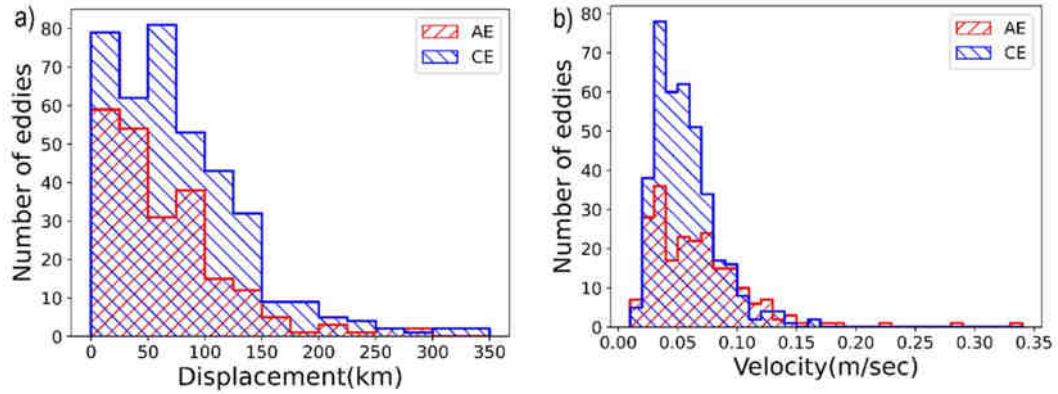


Рис. 4.10: Распределение абсолютного смещения (а) и средней скорости вращения (б) для долгоживущих антициклонов (АЕ) и циклонов (СЕ) за время их жизни. Адаптировано из [124].

Среднее время жизни для АЕ составляет 3.1 месяца, для СЕ – 2.7 месяца, при этом максимальные значения достигают года и более (Рис. 4.11а и 4.12а) [124]. Радиус вихрей варьируется от 15 до 70 км, со средними значениями 31 км для АЕ и 36 км для СЕ (Рис. 4.11б и 4.12б). Средняя поступательная скорость составляет 4.7 км/сут для АЕ и 6.5 км/сут для СЕ (Рис. 4.11с и 4.12с). Эти характеристики подтверждают, что вихри являются квазистационарными структурами, циркулирующими в ограниченных областях размером порядка  $100 \times 150$  км.

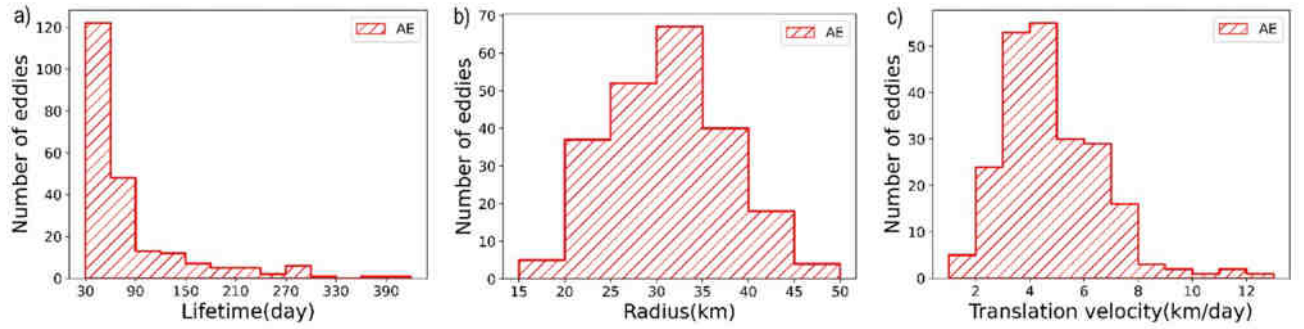


Рис. 4.11: Распределение долгоживущих антициклонов по времени жизни (а), радиусу (б) и средней поступательной скорости (в). Адаптировано из [124].

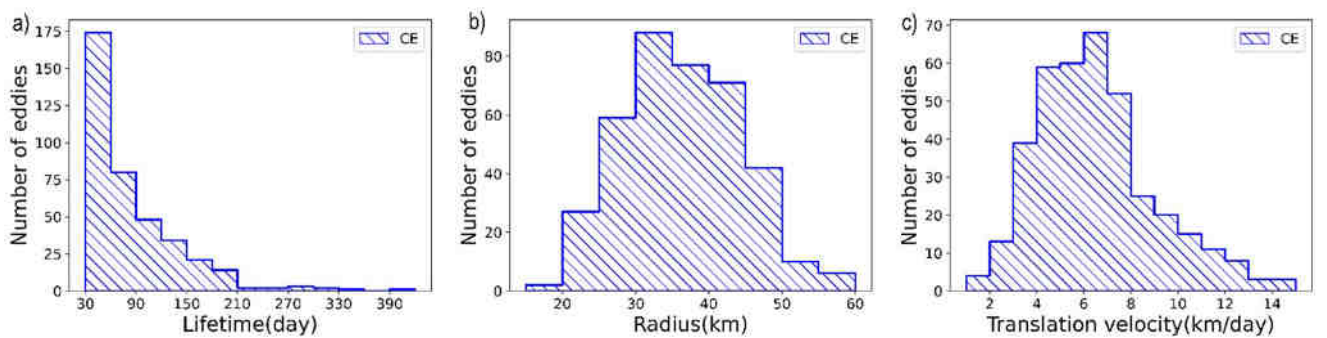


Рис. 4.12: То же, что на Рис. 4.11, но для циклонов. Адаптировано из [124].

Анализ параметра нелинейности ( $\eta = V/c$ ) показал, что 85% АЕ и 65% СЕ в этом районе являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), то есть способны захватывать и удерживать водные массы в своем ядре при перемещении (Рис. 4.13) [124]. При этом АЕ в среднем более нелинейны, чем СЕ, что согласуется с общими выводами раздела 4.2 о большей когерентности антициклонических структур. Наибольшие значения параметра нелинейности характерны для АЕ западного очага, формирующихся в районе гайотов Габбас и Кольцо (Рис. 4.7а). Эти подводные горы высотой более 2000 м играют ключевую роль в генерации топографически-привязанных АЕ. При натекании потока с антициклоническим сдвигом на возвышенность, сохранение потенциальной завихренности  $(f + \zeta)/H$  приводит к уменьшению относительной завихренности  $\zeta$  над вершиной и, как следствие, к формированию устойчивого АЕ [124]. Этот механизм полностью согласуется с качественными аргументами, основанными на законе сохранения

потенциальной завихренности, которые обсуждались в разделе 4.2 для пограничных течений.

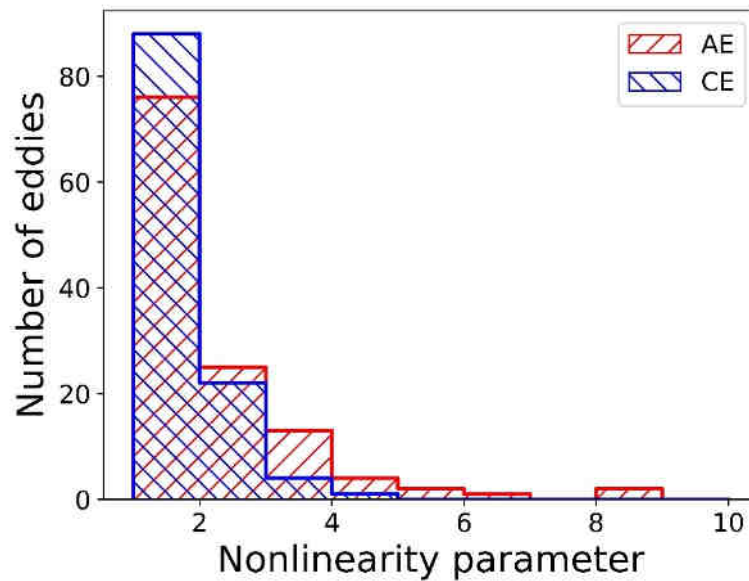


Рис. 4.13: Распределение параметра нелинейности для долгоживущих антициклонов и циклонов. Адаптировано из [124].

#### 4.3.2. Детальный анализ эволюции антициклонического вихря А в 2004 г.

Для более глубокого понимания динамики и эволюции вихрей, а также их роли в переносе водных масс, в дополнение к эйлерову статистическому анализу был применен лагранжев подход. Этот метод позволяет не просто фиксировать положение вихря в данный момент, но и проследить историю водных частиц, составляющих его ядро, выявить источники этих вод и зафиксировать ключевые события жизненного цикла, такие как формирование, разделение, слияние, захват и потерю вод [86; 97].

В качестве примера детального лагранжева анализа рассмотрим эволюцию мощного антициклонического вихря А, который наблюдался в северо-западной части моря в 2004 г. Этот вихрь был впервые идентифицирован по спутниковым инфракрасным изображениям (Рис. 4.14а) и впоследствии детально опробурован в ходе 33-го рейса НИС "Академик М.А. Лаврентьев" в мае 2004 г. [13]. По

данным альтиметрического трекинга, время жизни вихря составило 9 месяцев (с 9 января по 10 октября 2004 г.), а максимальный диаметр достигал 120 км, что значительно превышает средние размеры для этого района.

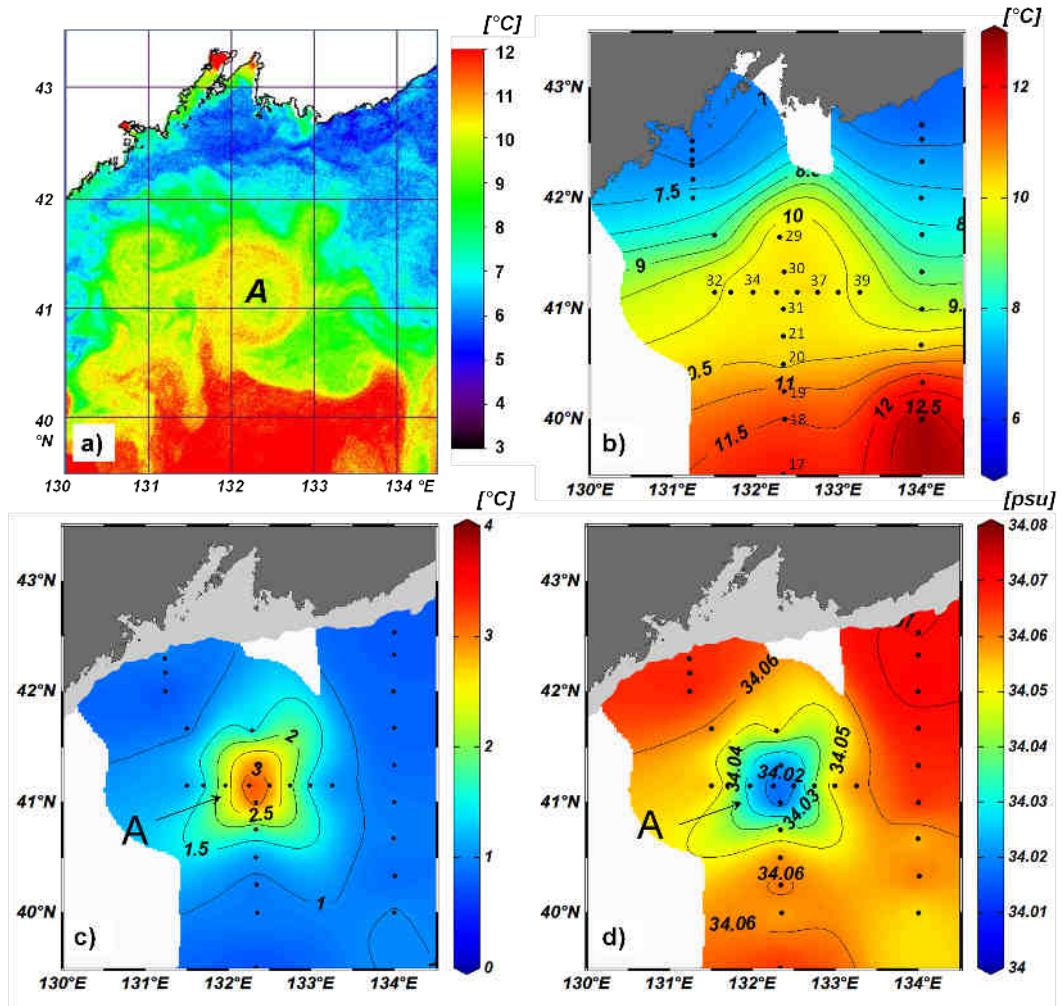


Рис. 4.14: (а) Инфракрасное изображение со спутника NOAA-12 от 13 мая 2004 г., 20:46, и распределение (б) температуры поверхности, (с) температуры на глубине 300 м и (д) солёности на глубине 300 м по данным судовых CTD-наблюдений в период 11–16 мая 2004 г. Местоположения CTD-станций 17–21 и 29–39 поперек исследуемого вихря А обозначены черными точками. Адаптировано из [13].

На Рис. 4.15 представлена динамическая топография поверхности относительно 1500 м и вертикальное распределение меридиональной компоненты геострофической скорости вдоль разреза по  $41^{\circ}09'$  с.ш., пересекающего вихрь.

Максимальные скорости в поверхностном слое достигали 50 см/с, а на глубине 300 м превышали 15 см/с, что свидетельствует о значительной энергии вихря и его глубоком проникновении.

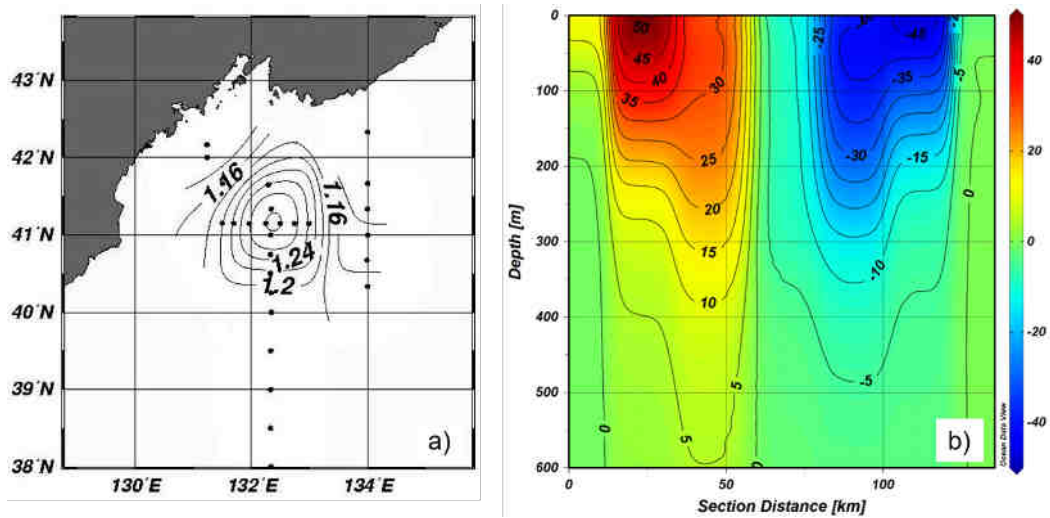


Рис. 4.15: Динамическая топография поверхности (а) и вертикальное распределение меридиональной компоненты геострофической скорости (б) вдоль разреза по  $41^{\circ}09'$  с.ш. Красный цвет – северное направление, синий – южное. Адаптировано из [13].

Вертикальные разрезы температуры и солёности вдоль меридионального (Рис. 4.16) и зонального (Рис. 4.17) сечений выявили многослойную структуру вихря. Выделяются три основные аномалии: верхний высокосолёный слой (HS1, 34.03–34.05 psu) на глубинах 30–230 м, сформированный захваченными субтропическими водами; промежуточный слой пониженной солёности (LS, < 33.98 psu) на глубинах 250–400 м, возможно, реликт зимней конвекции или захваченных вод промежуточного слоя; и заглубленное ядро высокосолёной промежуточной воды (HS2) на глубинах 700–1100 м [13; 118]. Эти аномалии хорошо видны на TS-диаграмме и вертикальных профилях солёности (Рис. 4.18).

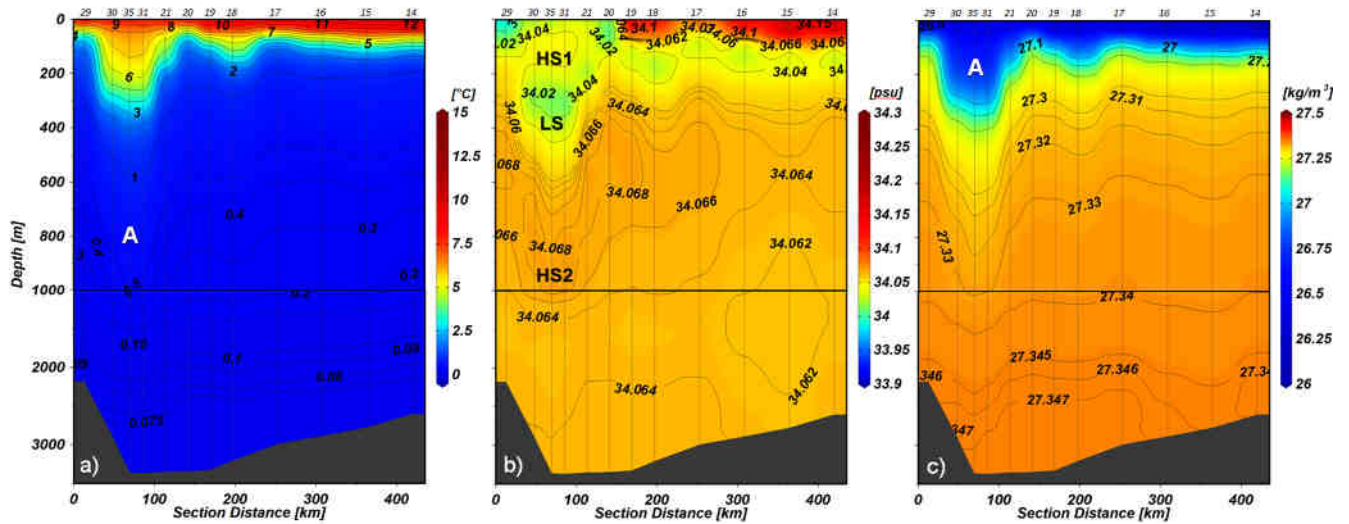


Рис. 4.16: Вертикальное распределение потенциальной температуры (а), солености (б) и потенциальной плотности (в) вдоль меридионального разреза по  $132^{\circ}20'$  в.д. HS1 – верхний высокосоленный слой, LS – слой пониженной солености, HS2 – нижний высокосоленный слой. Адаптировано из [13].

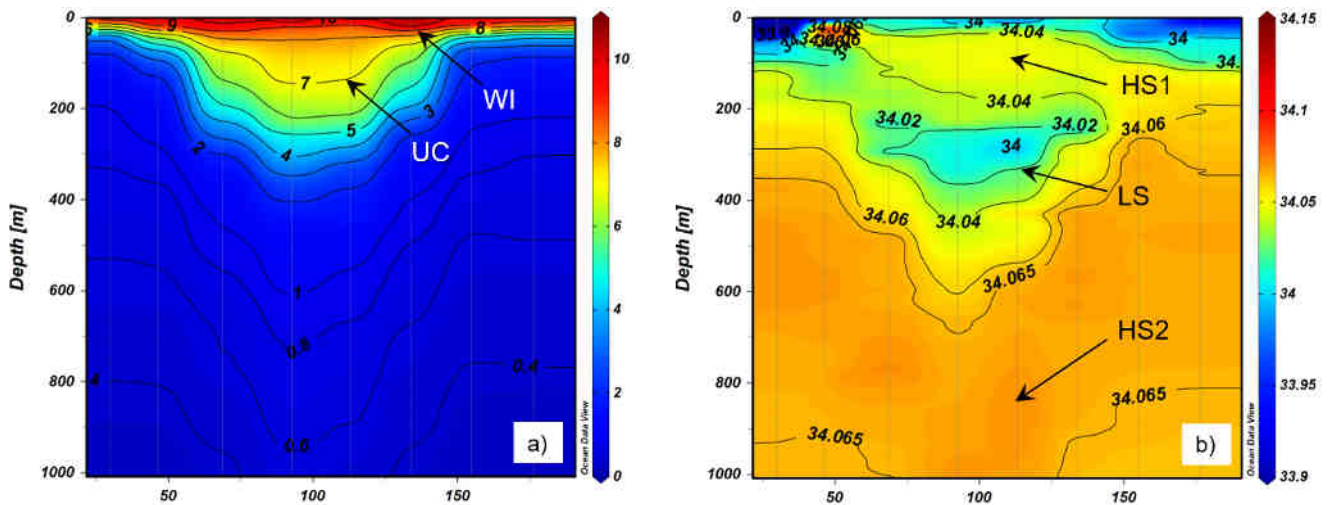


Рис. 4.17: Вертикальное распределение температуры (а) и солености (б) вдоль зонального разреза по  $41^{\circ}09'$  с.ш. WI – теплая интрузия, UC – однородное ядро, HS1, LS, HS2 – обозначения как на Рис. 4.16. Адаптировано из [13].

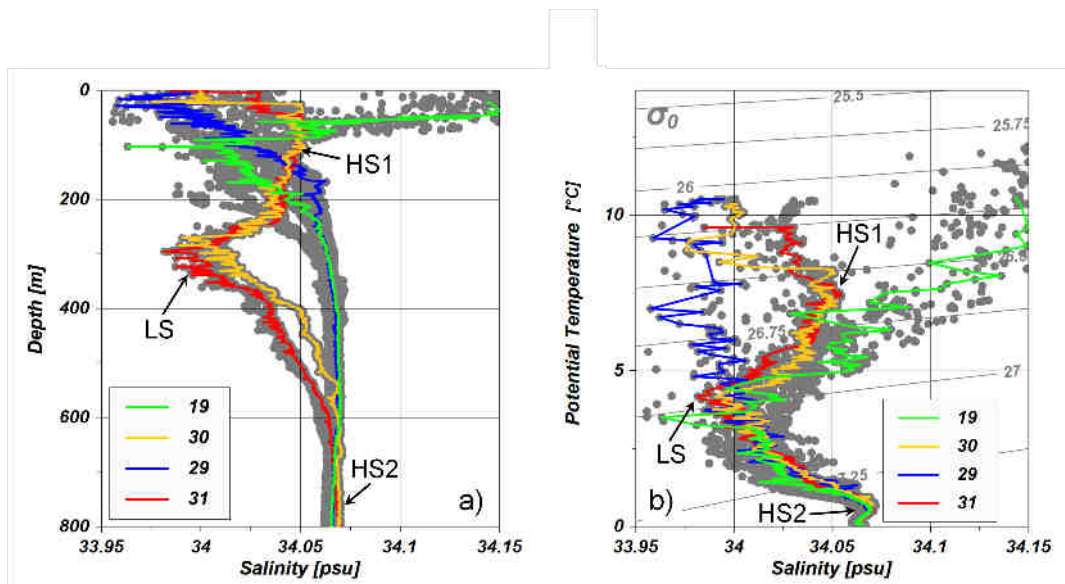


Рис. 4.18: (а) Вертикальные профили солёности на всех станциях разреза вдоль  $132^{\circ}20'$  в.д. и (b) TS-диаграмма для этих станций. Профили на двух станциях внутри вихря А (№30 и №31) и двух станциях сразу за пределами вихря (№19 и №29) выделены разными цветами. Расположение станций показано на Рис. 4.14. Адаптировано из [13].

Лагранжев анализ, основанный на расчете траекторий виртуальных частиц назад во времени (так называемые О-карты, или карты происхождения вод), позволил реконструировать всю историю вихря А (Рис. 4.19 и 4.20). Было установлено, что вихрь сформировался 9 января 2004 г. в западном очаге ( $40.4^{\circ}$  с.ш.,  $131.2^{\circ}$  в.д.) в результате меандрирования струи Субполярного фронта. Его ядро с самого начала было заполнено преимущественно субтропическими водами (красный цвет на О-картах), поступавшими с юга. В середине февраля, после интенсивного захвата прибрежных вод (розовый цвет), вихрь увеличился в размерах и разделился на две части (Рис. 4.20а,б). Однако уже в начале марта произошло обратное слияние, и вихрь восстановил свою целостность, продолжая наращивать массу за счет захвата субтропических вод (Рис. 4.21).

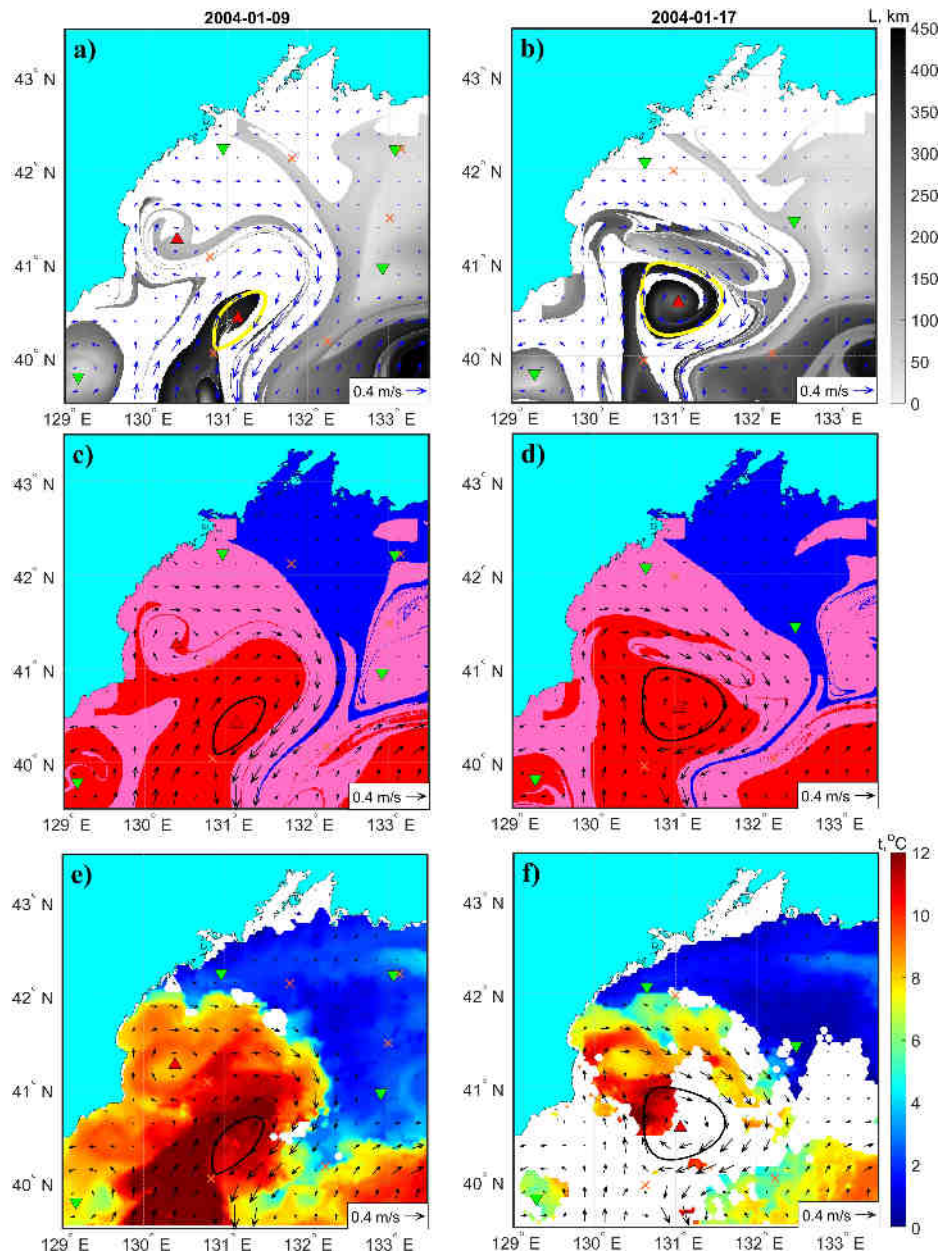


Рис. 4.19: (a) и (b) L-карты, (c) и (d) O-карты с наложенным полем скоростей AVISO. Градация серого цвета на этих и других L-картах показывает длину пути, пройденного виртуальными частицами за 30 дней в прошлом до указанной даты. Белые области на L-картах и розовые области на O-картах соответствуют частицам, которые пришли из прибрежных районов в конечные положения на картах. Красный и синий цвета на O-картах кодируют субтропические и субарктические воды, соответственно. Черные кривые на (c),(d),(e) и (f) представляют собой характерные контуры исследуемого вихря А. (e) и (f) Изображения SST (белый цвет означает облачность). Направленные вверх (вниз) красные (зеленые) треугольники обозначают эллиптические точки, соответствующие местоположению центров антициклонов (циклонов). Крестиками обозначены гиперболические точки. Адаптировано из [13].

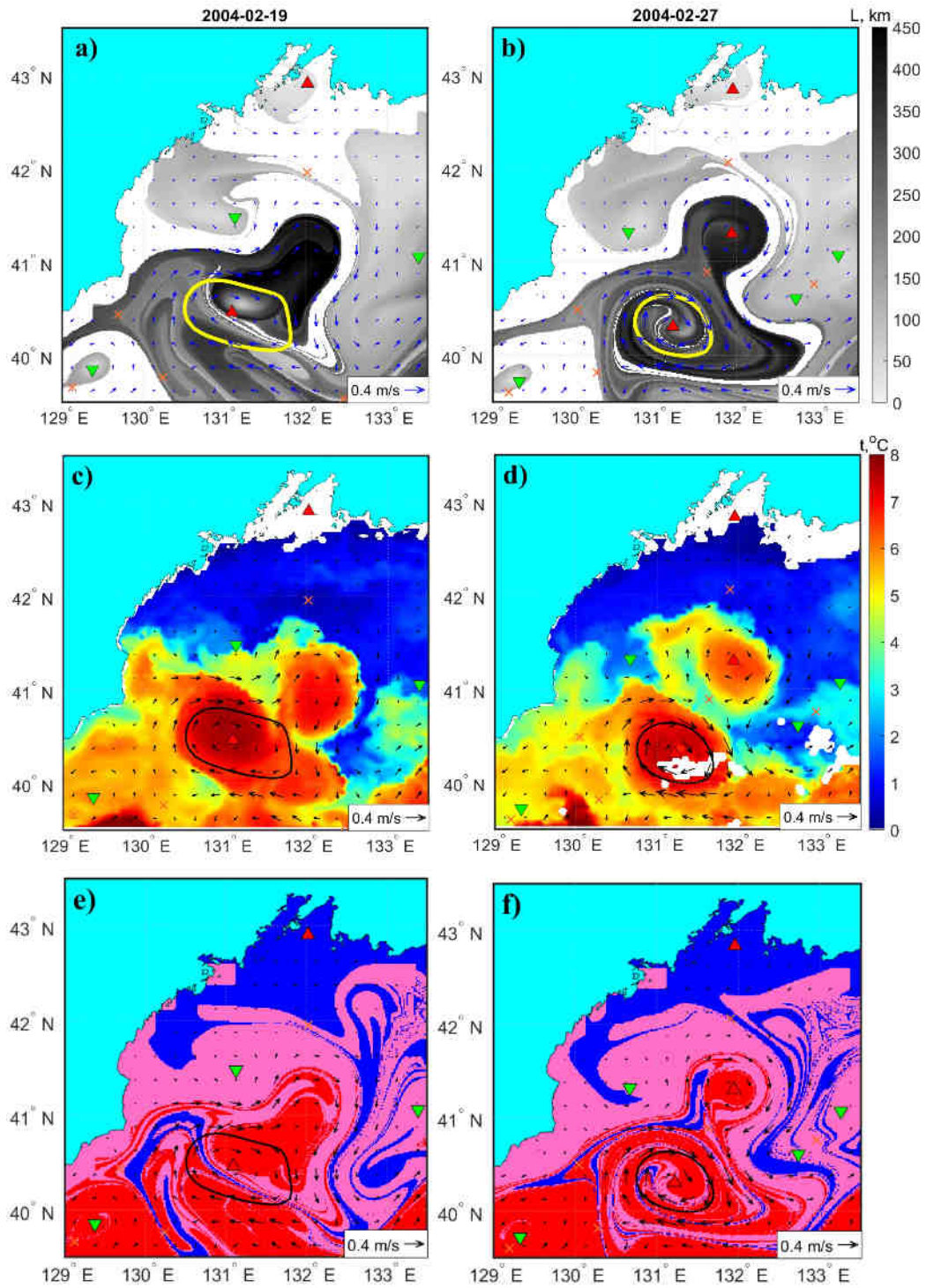


Рис. 4.20: L-карты (a,b), SST-изображения (c,d) и O-карты (e,f), показывающие разделение вихря А в феврале 2004 г. Адаптировано из [13].

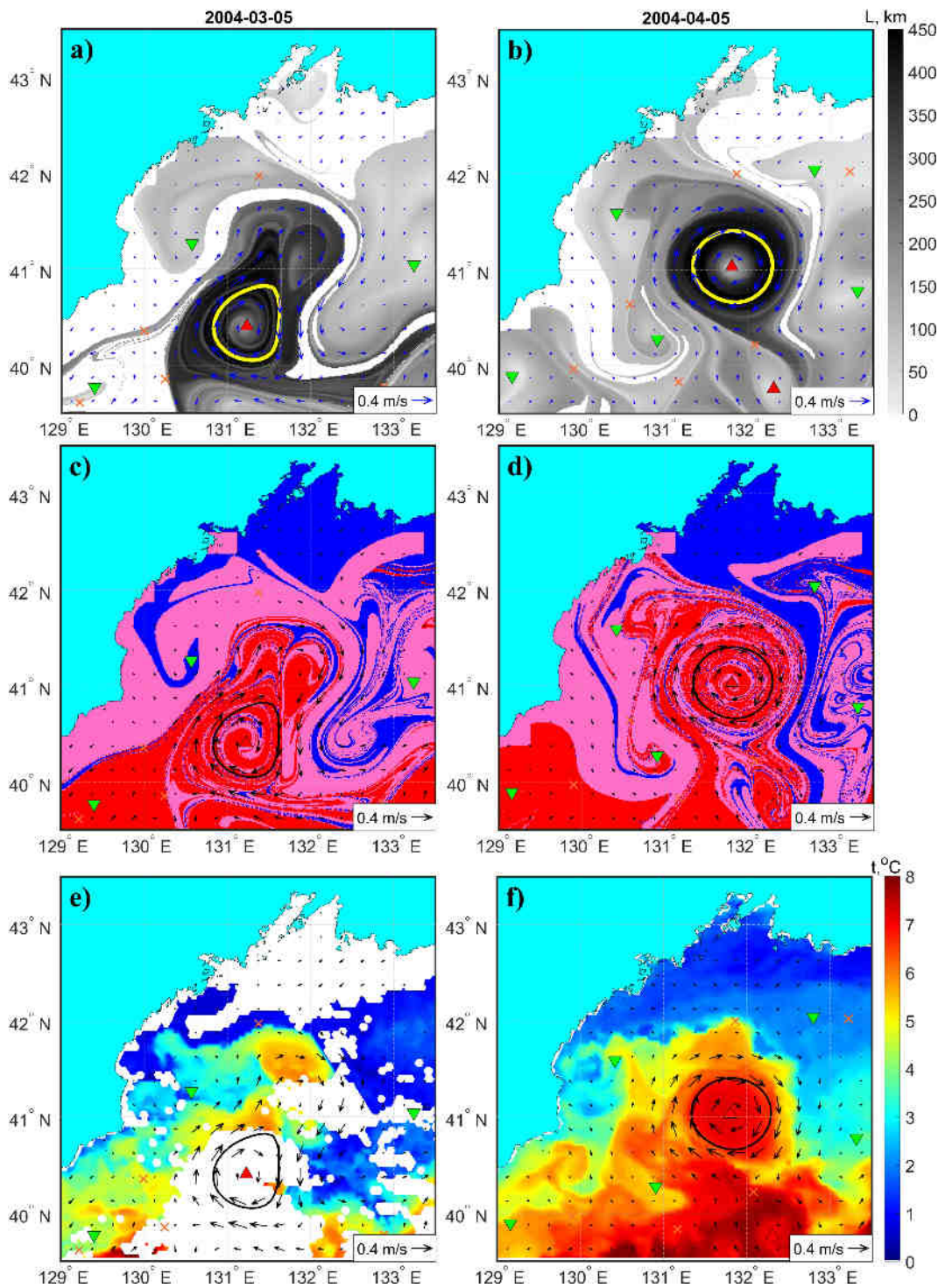


Рис. 4.21: L-карты (a,b), O-карты (c,d) и SST-изображения (e,f), показывающие рост вихря А в марте 2004 г. за счет захвата вод разного происхождения. Адаптировано из [13].

К моменту судовых наблюдений в середине мая (Рис. 4.22) вихрь достиг максимальных размеров. Лагранжев анализ показал, что непосредственно перед съемкой произошел захват стримера теплых вод с юга, что сформировало

наблюдаемую на спутниковых снимках структуру "кольца" с более теплой периферией и несколько более холодным ядром. Расчет "возраста" вод (Т-карты) показал, что воды в ядре вихря провели в районе от 100 до 200 дней, прежде чем были захвачены (Рис. 4.23а), что подтверждает их субтропическое происхождение и долгое время адвекции.

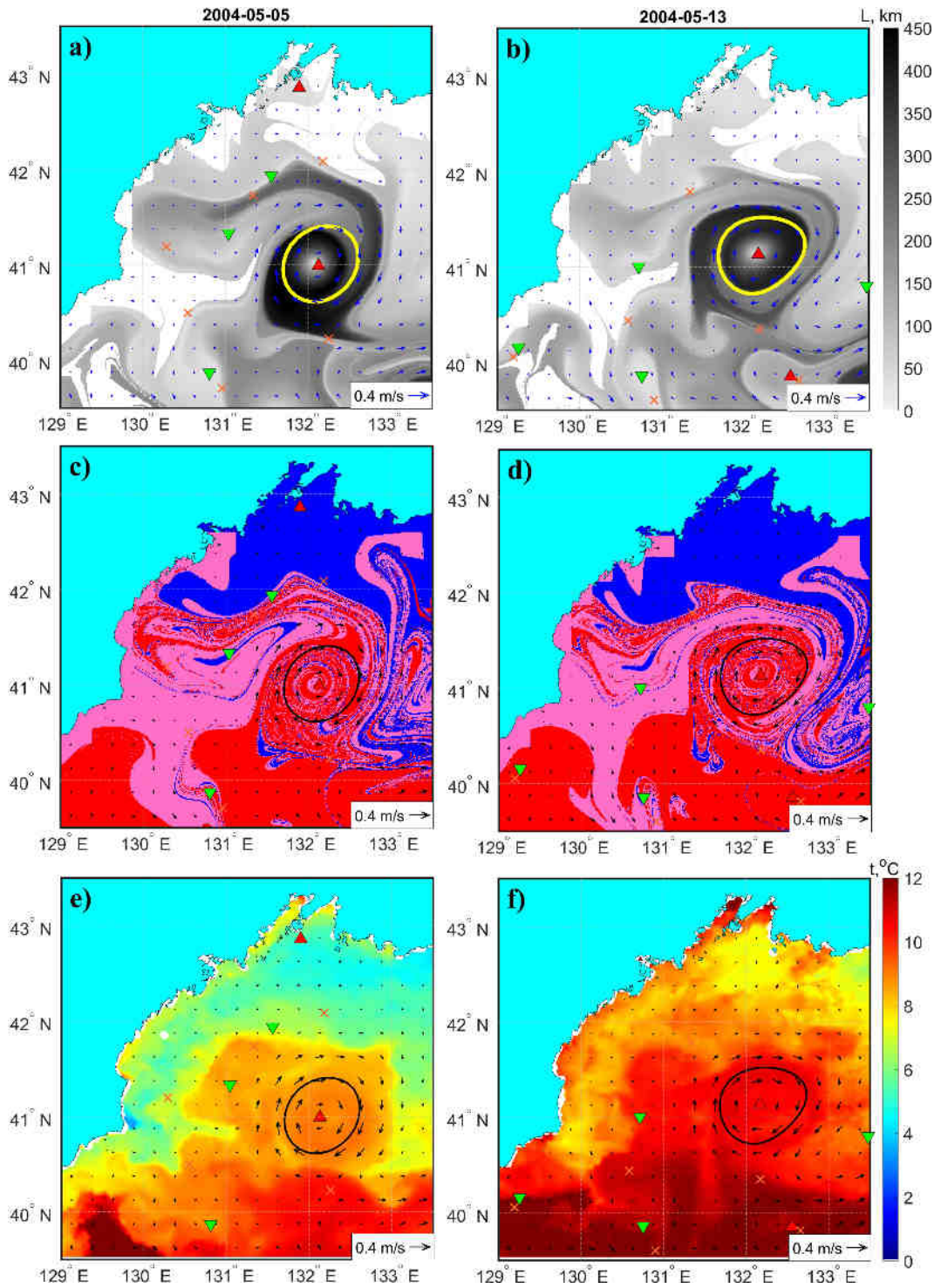


Рис. 4.22: L-карты (a,b), O-карты (c,d) и SST-изображения (e,f), показывающие захват субтропических и прибрежных вод вихрем А в мае 2004 г. Адаптировано из [13].

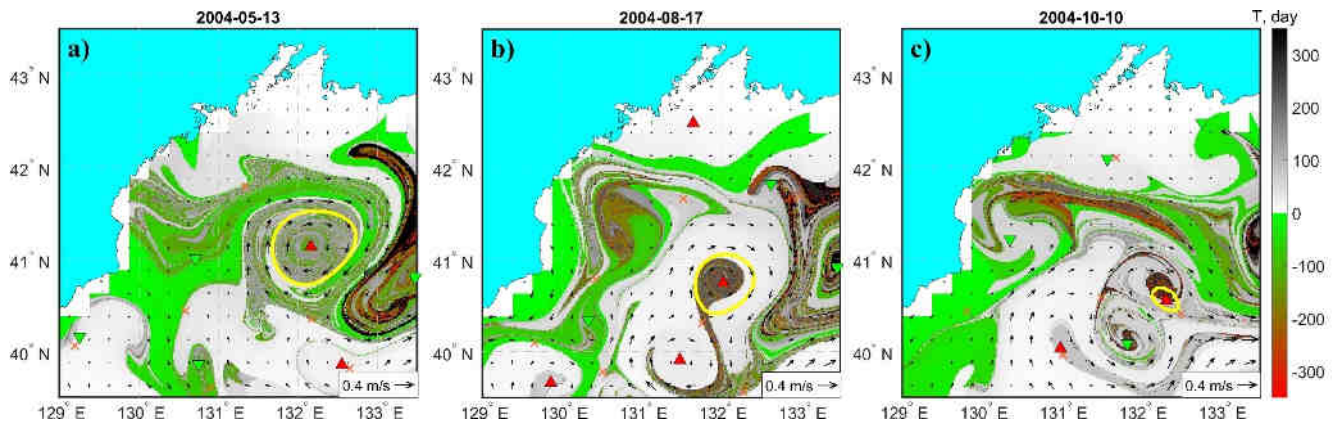


Рис. 4.23: T-карты (“возраст” вод) для трех стадий эволюции вихря А: (а) стадия зрелости 13 мая, (б) взаимодействие с другим антициклоном 17 августа, (с) разрушение 10 октября. Оттенки серого – возраст субтропических вод (дни), зеленые/розовые тона – возраст прибрежных вод. Адаптировано из [13].

Количественный анализ, проведенный в работе [13], позволил рассчитать суточную долю вод разного происхождения внутри вихревого ядра (Рис. 4.24а). Было показано, что на протяжении всей жизни вихря субтропические воды составляли от 70% до 90% его объема, в то время как доля субарктических вод никогда не превышала 10%. Прибрежные воды эпизодически (во время событий интенсивного захвата в феврале и мае) проникали в ядро, но их доля быстро снижалась. Площадь ядра вихря быстро росла после формирования, достигла максимума в феврале, затем несколько снизилась после разделения и вновь увеличилась к маю, после чего началась эрозия (Рис. 4.24б). Эти результаты наглядно демонстрируют роль подобных вихрей как эффективных механизмов транспорта субтропических вод далеко на север, в субарктическую зону.

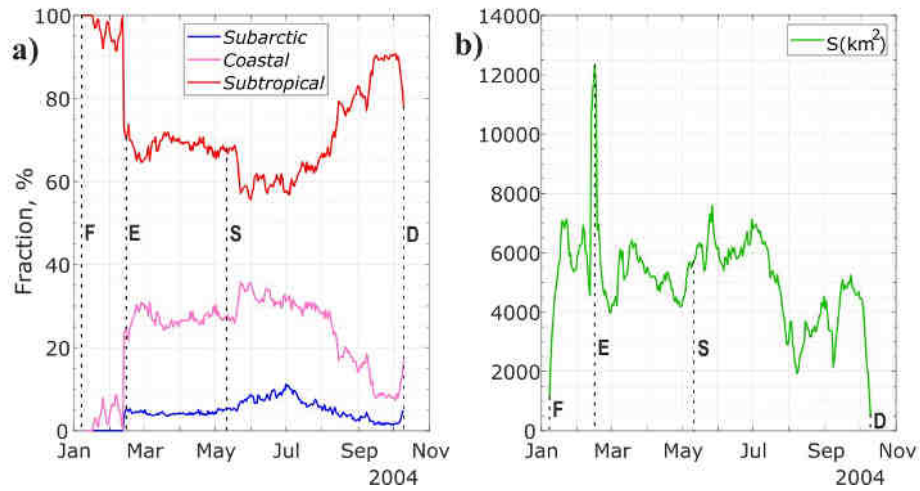


Рис. 4.24: Эволюция долей вод разного происхождения в ядре вихря А (а) и площади его поверхности (b) в течение жизни. Вертикальные линии: F – формирование, E – захват вод и разделение вихря, S – съемка, D – разрушение. Адаптировано из [13].

Верификация лагранжевых расчетов проводилась путем сопоставления с данными судовых CTD-измерений и спутниковыми инфракрасными изображениями. Совпадение координат центра вихря, определенного по лагранжевым картам (положение эллиптической точки), с координатами, полученными из анализа поля динамической топографии по CTD-данным в мае 2004 г., оказалось весьма точным:  $41^{\circ}08'$  с.ш.,  $131^{\circ}11'$  в.д. против  $41^{\circ}09'$  с.ш.,  $131^{\circ}15'$  в.д. [13]. Эволюция параметра Окубо-Вейса (Рис. 4.25) также подтвердила, что вихрь сохранял высокую завихренность на протяжении большей части жизни, за исключением периодов интенсивного взаимодействия.

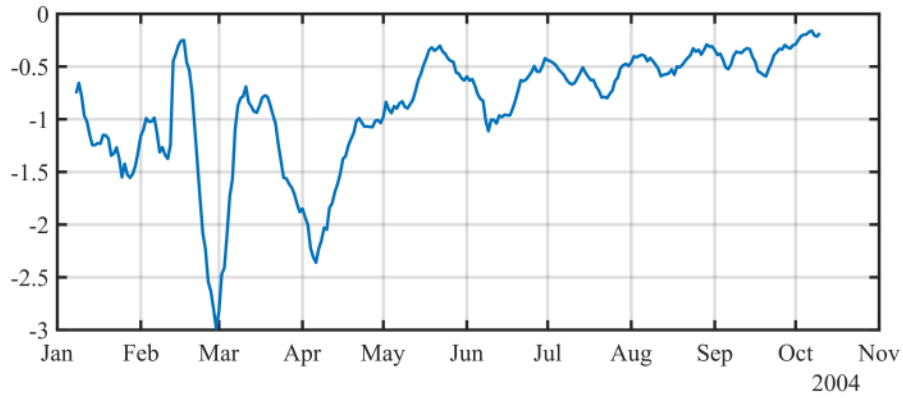


Рис. 4.25: Эволюция параметра Окубо-Вейса в ядре вихря А в течение его жизни. Отрицательные значения соответствуют преобладанию завихренности над деформацией. Адаптировано из [13].

Таким образом, комплексный подход, сочетающий статистический анализ многолетних спутниковых данных (эйлеров подход) с детальным лагранжевым анализом траекторий отдельных вихрей, позволил не только выявить районы повышенной вихревой активности в северо-западной части Японского моря и описать их статистические характеристики, но и раскрыть физические механизмы, управляющие эволюцией этих вихрей. Показано, что квазистационарные вихри в этом районе, особенно АЕ, являются эффективными переносчиками субтропических вод в субарктическую зону. Процессы захвата, удержания и последующего смешения водных масс внутри этих вихрей, детально прослеженные с помощью лагранжевых методов, вносят существенный вклад в формирование термохалинной структуры и общей циркуляции Японского моря. Полученные результаты подчеркивают необходимость совместного использования спутниковой альтиметрии, лагранжева моделирования и натурных наблюдений для всестороннего изучения мезомасштабной вихревой динамики.

## 4.4. Исследование вихрей в северо-восточной части Японского моря

Северо-восточная часть Японского моря (в координатах  $40^{\circ}$ – $46^{\circ}$  с.ш.,  $137^{\circ}$ – $142^{\circ}$  в.д.), прилегающая к западному побережью островов Хоккайдо и Хонсю, долгое время оставалась наименее изученной. Отдельные наблюдения вихрей в этом районе по спутниковым ИК-изображениям представлены в работах [153; 155], однако систематическая статистика на основе альтиметрии отсутствовала. В то же время, как показано в разделе 4.2 (Рис. 4.2), этот район характеризуется повышенными значениями частоты встречаемости как антициклонических (АЕ), так и циклонических (СЕ) вихрей. Здесь происходит разветвление Цусимского течения: одна его ветвь поворачивает на восток и через Сангарский пролив выходит в Тихий океан, а другая продолжает движение на север вдоль побережья Хоккайдо [22; 134]. Сложная береговая линия (полуостров Осима, залив Исикари) и наличие глубоководной Японской котловины создают благоприятные условия для генерации и длительного существования вихревых структур.

### 4.4.1. Статистика и пространственное распределение

Применение алгоритма AMEDA к альтиметрическим данным за период 1993–2024 гг. позволило получить количественные оценки вихревой активности в этом регионе [125]. В среднем за год здесь образуется около 26 АЕ и 30 СЕ без ограничения по времени жизни; для вихрей с продолжительностью жизни более 30 суток эти числа составляют 21.7 АЕ и 25.9 СЕ (Таблица 4.1). Преобладание циклонов над антициклонами сохраняется, что согласуется с общей тенденцией для субарктической зоны.

Таблица 4.1: Количество антициклонических (АЕ) и циклонических (СЕ) вихрей, детектированных в северо-восточной части Японского моря за 1993–2024 гг. [125].

| Продолжительность жизни | АЕ  | СЕ  |
|-------------------------|-----|-----|
| Без ограничения         | 847 | 945 |
| $\geq 30$ суток         | 695 | 831 |
| $\geq 90$ суток         | 279 | 334 |

Распределение вихрей по параметру нелинейности (Рис. 4.26а) показывает, что более 95% всех вихрей в этом районе являются нелинейными ( $\eta > 1$ ). При этом АЕ в среднем обладают более высокими значениями  $\eta$  (среднее 4.12, медиана 3.24) по сравнению с СЕ (среднее 2.7, медиана 2.36). Это указывает на их высокую когерентность и способность эффективно захватывать и переносить водные массы [125]. Время жизни вихрей редко превышает один год, средние значения составляют около 65 суток для обоих типов (Рис. 4.26б). Радиусы вихрей варьируются в пределах 10–40 км (средние значения  $\approx 22$  км), а амплитуда перепада уровня моря редко превышает 3 см, что несколько ниже, чем в других районах моря [125].

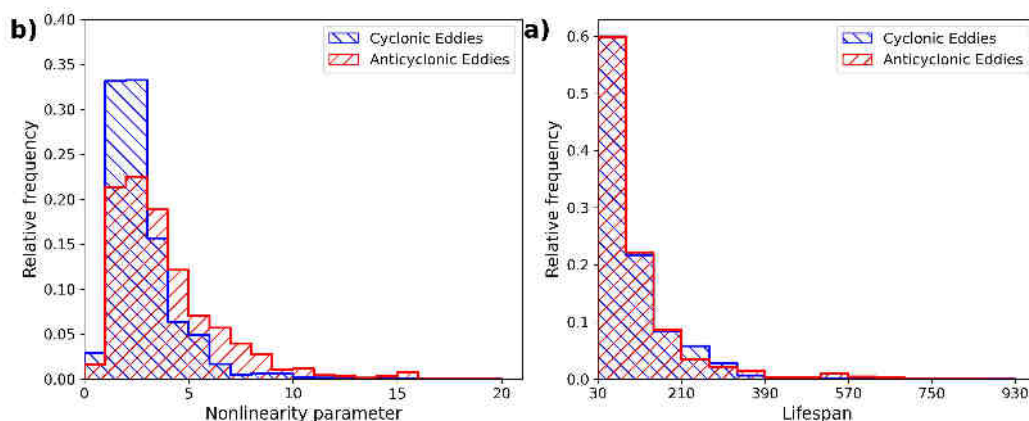


Рис. 4.26: Распределение северо-восточных АЕ и СЕ по параметру нелинейности (а) и по времени жизни (б). Адаптировано из [125].

Карты частоты встречаемости вихрей с временем жизни более 30 суток (Рис. 4.27) демонстрируют четко выраженную пространственную сегрегацию АЕ и СЕ. Антициклоны концентрируются в двух основных областях: над глубокой частью Японской котловины ( $41.5^{\circ}$ – $42.5^{\circ}$  с.ш.,  $137^{\circ}$ – $138^{\circ}$  в.д.) и в заливе Исикари вблизи побережья Хоккайдо. Циклоны, напротив, локализованы вдоль восточного склона Японской котловины в полосе  $40.5^{\circ}$ – $43^{\circ}$  с.ш.,  $138^{\circ}$ – $139^{\circ}$  в.д. Количественная оценка перекрытия этих областей с помощью индекса Жаккара показала, что для наиболее интенсивных очагов (выше 90-го перцентиля) перекрытие составляет всего 1–3% [125]. Эта сегрегация сохраняется как в холодный, так и в теплый сезоны, что подтверждается расчетами для зимних и летних месяцев (Рис. S14 и S15 в [125]).

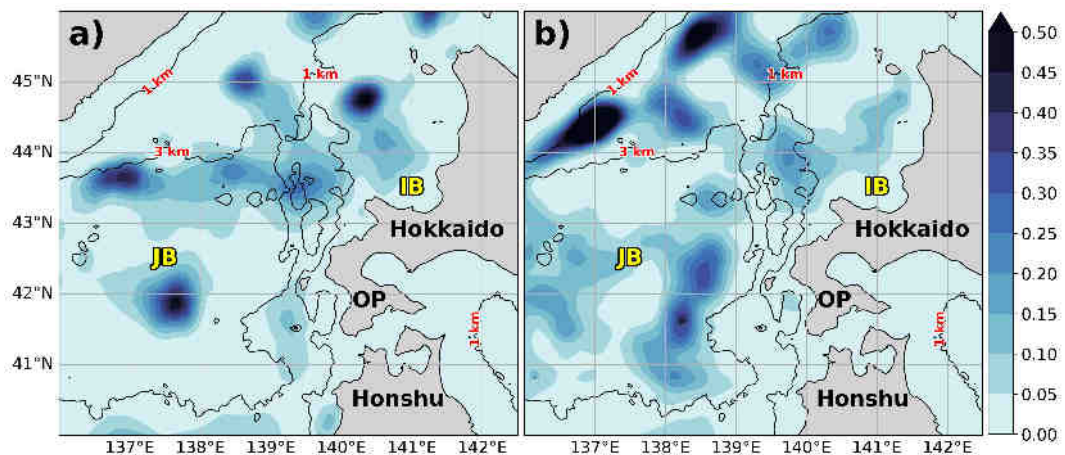


Рис. 4.27: Частота встречаемости антициклонов (а) и циклонов (б) с временем жизни более 30 суток в северо-восточной части Японского моря за 1993–2024 гг. OP – полуостров Осима, IB – залив Исикари. Адаптировано из [125].

Такое разделение объясняется динамикой пограничных течений. На внешней (глубоководной) стороне северной ветви Цусимского течения происходит растяжение водных столбов, что в соответствии с законом сохранения потенциальной вихренности способствует генерации СЕ. На внутренней стороне, особенно в районах с изрезанной береговой линией, столбы сжимаются, формируя АЕ [125]. Дополнительным подтверждением служат карты средней относительной

завихренности и ее зонального градиента (Рис. 4.28), а также карты деформации поля скорости (Рис. 4.29), которые показывают повышенные значения в областях регулярного вихреобразования.

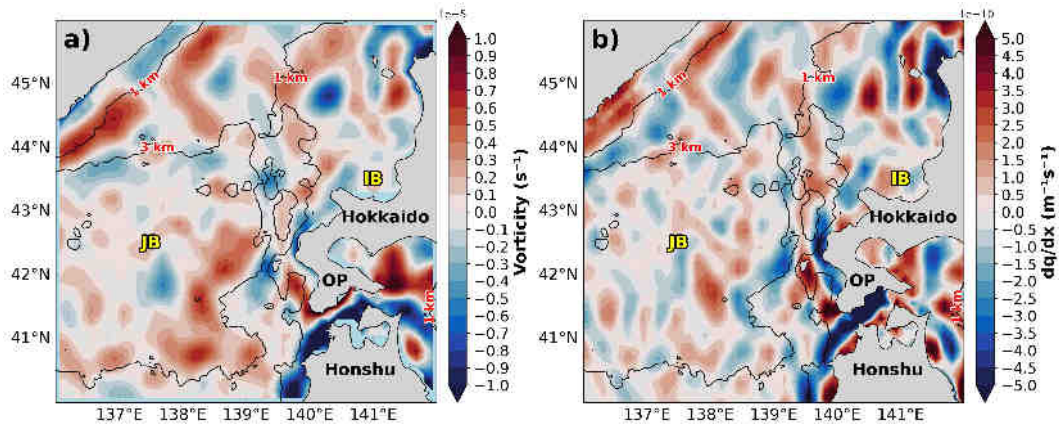


Рис. 4.28: Поле относительной завихренности (а) и зональная компонента ее градиента (б) в северной части Японского моря, осредненные за 1993–2024 гг. Адаптировано из [125].

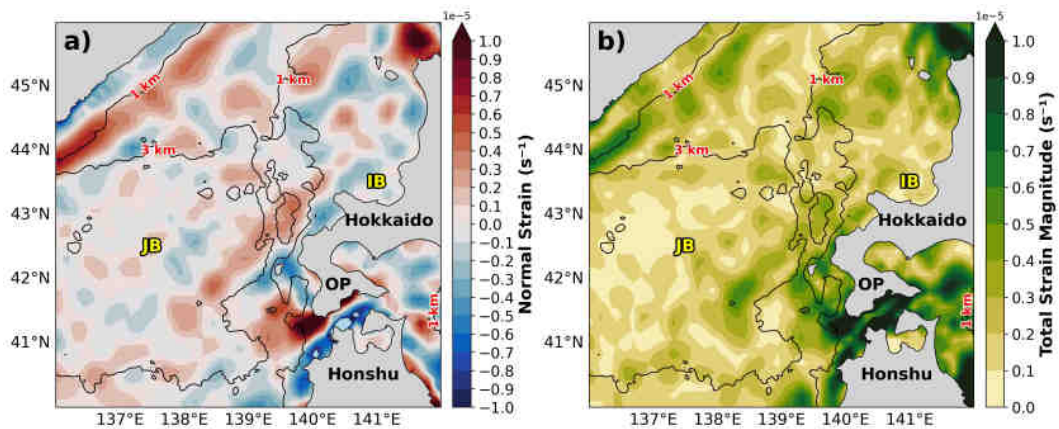


Рис. 4.29: Нормальная деформация (а) и полная деформация (б) в северо-восточной части Японского моря, осредненные за 1993–2024 гг. Адаптировано из [125].

Траектории вихрей (Рис. 4.30) подтверждают их квазистационарный характер: центры вихрей смещаются на расстояние, редко превышающее 150 км, а места формирования и разрушения концентрируются в тех же районах, где наблюдается повышенная встречаемость. Это означает, что вихри циркулируют

ют в ограниченных областях, не покидая их на протяжении всего жизненного цикла.

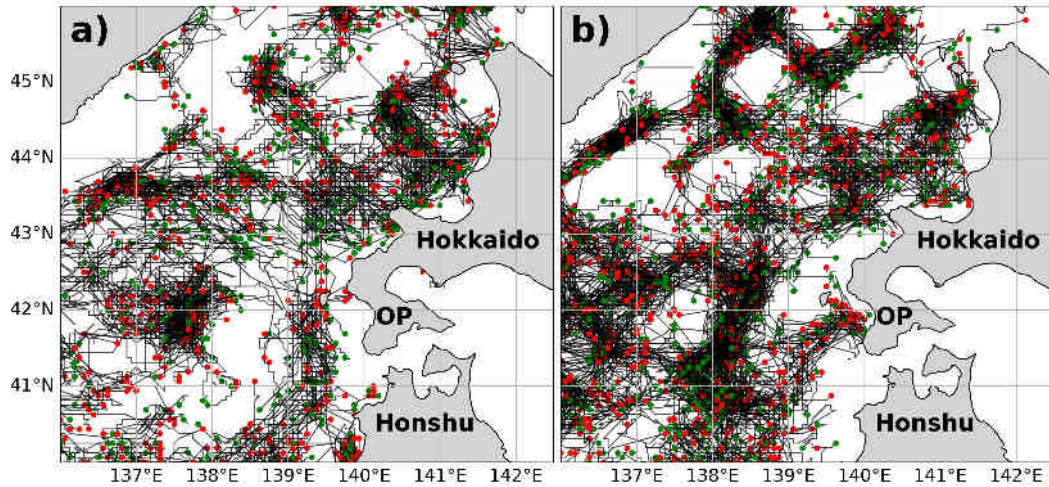


Рис. 4.30: Траектории антициклонов (а) и циклонов (b) в северо-восточной части Японского моря. Зеленые точки – места формирования, красные – места разрушения. Адаптировано из [125].

Анализ распределения центров вихрей по глубине моря (Рис. 4.31) показывает, что АЕ часто встречаются как над наибольшими глубинами Японской котловины, так и над шельфом, тогда как СЕ более равномерно распределены над глубоководной частью, но практически отсутствуют в районах регулярного образования АЕ.

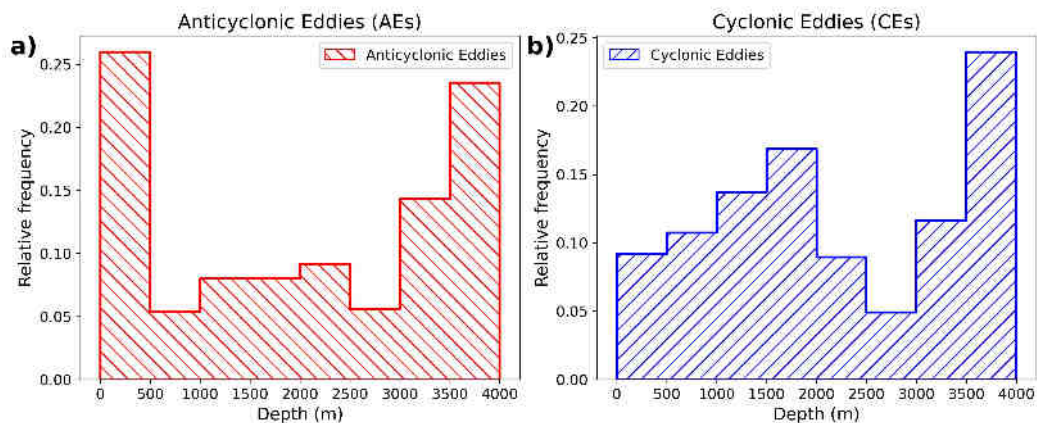


Рис. 4.31: Распределение суточных положений центров антициклонов и циклонов по глубине моря в северо-восточной части Японского моря. Адаптировано из [125].

#### 4.4.2. Регулярные вихревые структуры

Наиболее интересным является район над глубокой частью Японской котловины ( $41.5^{\circ}$ – $42.5^{\circ}$  с.ш.,  $137^{\circ}$ – $138^{\circ}$  в.д.), где регулярно наблюдается квазистационарный антициклон. Его существование подтверждается как спутниковыми данными, так и траекториями дрейфующих буюв (Рис. 4.32). Например, дрейфующий буй №35660 осенью 2003 г. был захвачен этим вихрем и совершал внутри него инерционные колебания, прежде чем покинуть его с потоком на север [125]. Ранее, в июне 1999 г., подобный антициклон был опробован в ходе экспедиции R/V Roger Revelle; его вертикальная структура прослеживалась до глубины 2000 м, а в ядре фиксировались повышенные значения солёности, указывающие на присутствие вод Цусимского течения [119; 153].

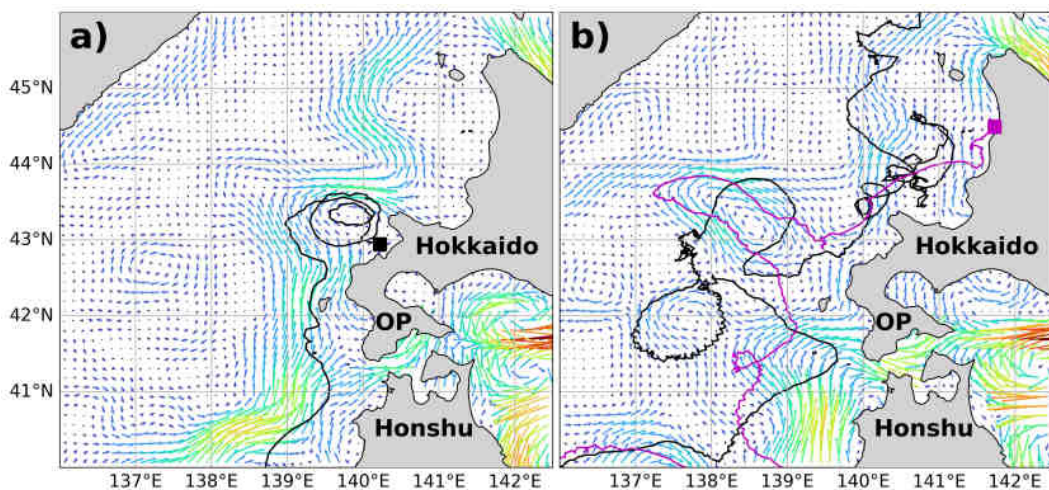


Рис. 4.32: Поле альтиметрической скорости 30 сентября 1998 г. (а) и 22 октября 2003 г. (б) с наложенными траекториями дрейфующих буюв (черная и фиолетовая кривые). Квадратами отмечены конечные точки траекторий. Адаптировано из [125].

Таким образом, северо-восточная часть Японского моря представляет собой район с интенсивной, но пространственно упорядоченной вихревой активностью. Выявленная сегрегация вихрей разной полярности и их квазистационарный характер свидетельствуют о важной роли локальных топографических и динамических факторов в формировании циркуляции. Регулярные вихревые

структуры, такие как антициклон над Японской котловиной, служат эффективными проводниками субтропических вод в субарктическую зону, что имеет существенное значение для перераспределения тепла, соли и биогенных элементов в масштабах всего бассейна.

#### 4.5. Выводы к главе 4

В результате комплексного анализа многолетних спутниковых альтиметрических данных (1993–2024 гг.) с применением автоматического алгоритма детекции вихрей AMEDA, а также с использованием лагранжевых методов и данных судовых наблюдений, были получены следующие основные результаты, характеризующие мезомасштабную вихревую динамику северной части Японского моря:

Проведена детальная перепись мезомасштабных вихрей в Японском море за 32-летний период (1993–2024 гг.) с использованием алгоритма AMEDA. Полученные оценки (2717 антициклонов и 3823 циклона с временем жизни больше 30 суток) согласуются с предыдущими альтиметрическими исследованиями [149] и дополняют их за счёт более длительного временного ряда и применения лагранжевых методов. Установлено, что в среднем ежегодно в море образуется около 85 долгоживущих (с временем жизни более 30 суток) антициклонических и 120 циклонических вихрей. Общее количество циклонов превышает количество антициклонов примерно в 1.4 раза, что связано с более высокой частотой разделений циклонических вихрей (0.18 событий на вихрь против 0.11 у антициклонов).

Выявлены устойчивые пространственные закономерности в распределении вихревой активности. В субтропической зоне выделяются квазистационарные антициклонические вихри в котловинах Уллындо и Ямато (Уллынский, Окинский и Вонсанский антициклоны), а также циклон Док. В субарктической зоне к северу от Субполярного фронта обнаружены два очага повышенной встреча-

емости антициклонов и три очага для циклонов, связанные с динамикой пограничных течений и подводной топографией.

Проведен сравнительный анализ характеристик субтропических и субарктических вихрей. Показано, что субарктические вихри многочисленнее, но мельче (радиус 20–80 км) и обладают меньшей амплитудой (редко превышающей 5–8 см) по сравнению с субтропическими. Доля долгоживущих вихрей (более 90 суток) в субарктике выше (36% для АЕ и 40% для СЕ), чем на юге (25% и 22%). Параметр нелинейности для антициклонов в среднем выше, чем для циклонов, что объясняется различиями в распределении потенциальной вихренности и, как следствие, большей когерентностью антициклонических структур.

Установлены основные механизмы генерации вихрей в различных регионах:

- В субтропической зоне доминирует бароклинная и баротропная неустойчивость ветвей Цусимского течения, усиленная влиянием подводной топографии.
- В субарктической зоне ключевую роль играют два механизма: топографическая генерация антициклонов над подводными горами (гайоты Габбас и Кольцо) за счет сохранения потенциальной вихренности, а также неустойчивость пограничных течений (Приморское течение), приводящая к генерации циклонов на внешней стороне течения и антициклонов на внутренней.
- В северо-восточной части моря, в районе разветвления Цусимского течения, выявлена четкая пространственная сегрегация вихрей разной полярности (индекс Жаккара для наиболее интенсивных очагов составляет всего 1–3%), сохраняющаяся в течение всего года. Антициклоны регулярно формируются над глубокой частью Японской котловины и в заливе Исикари, тогда как циклоны локализованы вдоль восточного склона котловины.

Впервые для северо-западной части Японского моря проведен детальный лагранжев анализ эволюции долгоживущего антициклонического вихря (вихрь А, время жизни 9 месяцев). Показано, что на протяжении всего жизненного цикла ядро вихря было заполнено преимущественно (70–90%) субтропическими водами, поступавшими с юга. Задokumentированы ключевые события эволюции: формирование, разделение, слияние, захват вод различного происхождения и разрушение. Подтверждена высокая точность лагранжевых методов верификацией с данными судовых СТД-измерений и спутниковыми изображениями.

Для северо-восточной части моря впервые получены количественные оценки вихревой активности: в среднем за год здесь образуется 21.7 долгоживущих антициклонов и 25.9 циклонов. Установлено, что более 95% вихрей в этом районе являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), причем антициклоны характеризуются более высокими значениями параметра нелинейности. Подтверждено существование квазистационарного антициклона над глубокой частью Японской котловины, который играет важную роль в транспорте субтропических вод в высокие широты.

Таким образом, в главе впервые дана комплексная характеристика мезомасштабной вихревой динамики северной части Японского моря, основанная на сочетании статистического анализа многолетних спутниковых данных, лагранжева моделирования и натурных наблюдений. Выявленные закономерности пространственного распределения, механизмы генерации и эволюции вихрей, а также их роль в переносе водных масс имеют существенное значение для понимания циркуляции, формирования термохалинной структуры и функционирования экосистемы Японского моря в целом. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования климатических моделей, прогнозирования промысловой обстановки и решения задач морского природопользования.

## Заключение

В диссертационной работе впервые проведено комплексное исследование мезомасштабных вихрей в трёх ключевых районах северо-западной части Тихого океана — Курило-Камчатском желобе, Курильской котловине Охотского моря и северной части Японского моря — на основе единой методологии. Сочетание автоматического алгоритма детектирования и отслеживания вихрей AMEDA с лагранжевым анализом траекторий виртуальных частиц и верификацией по натурным данным (судовые измерения, данные дрейфующих буев и спутниковая радиометрия MODIS) позволило получить новые фундаментальные знания о роли вихревых структур в динамике вод, переносе тепла, соли и биогенных элементов, а также в формировании гидрологической структуры исследуемых акваторий.

**Курило-Камчатский желоб — зона концентрации долгоживущих вихрей.**

За период спутниковой альтиметрии 1993–2021 гг. идентифицировано 2520 вихрей. Установлено устойчивое преобладание циклонов над антициклонами (1528 против 992), обусловленное, в частности, более высокой частотой разделения циклонов. Показано, что долгоживущие вихри концентрируются преимущественно в пределах желоба: антициклоны располагаются вдоль его оси с максимумом частоты встречаемости в районе пролива Буссоль, тогда как циклоны чаще наблюдаются на океанической стороне, над поднятием Хоккайдо. Более 90% долгоживущих вихрей являются нелинейными ( $\eta > 1$ ), что подтверждает их способность к эффективному адвективному переносу вод на расстояния до 1000 км и более.

С помощью разработанной методики лагранжева анализа впервые количественно оценены доли вод разного происхождения в ядрах вихрей. Установлена закономерная смена состава вод в зависимости от места формирования вихря. Вихри западных субзон содержат преимущественно субарктические воды (Ойя-

сио, Аляскинского течения, Охотского моря). В вихрях восточных субзон доля субтропических вод (Курисио, Японского моря) возрастает, но даже в наиболее юго-восточной части желоба не превышает 6%, что доказывает их преимущественно субарктическое происхождение.

### **Курильская котловина Охотского моря: опровержение устоявшегося мнения.**

Впервые проведена систематическая перепись вихрей в Курильской котловине (1993–2021 гг.). Вопреки существовавшим представлениям, основанным на визуальных наблюдениях, установлено количественное преобладание долгоживущих циклонов над антициклонами (366 против 243 при времени жизни более 30 суток). Это связано, в том числе, с более высокой частотой разделения циклонов. Определены зоны генерации и повышенной встречаемости вихрей: антициклоны тяготеют к южной части котловины (районы проливов Буссоль и Крузенштерна), а циклоны – к центральным глубоководным районам.

Лагранжевый анализ показал, что ядра вихрей обоих знаков на 60–80% заполнены водами открытого океана, доля которых возрастает в холодный сезон. Вклад вод Восточно-Сахалинского течения и теплого течения Соя существенно ниже и характеризуется сезонной изменчивостью. Наличие разреженного ледового покрова (среднегодовая заполненность льдом 20–40%) не препятствует детектированию вихрей алгоритмом AMEDA, так как в котловине сохраняются обширные участки открытой воды. Верификация с данными дрейфующих буев Argo, спутниковыми изображениями MODIS и реанализа GLORYS12V1 подтвердила адекватность лагранжевых карт происхождения для реконструкции состава вод в вихревых ядрах.

### **Японское море: всесторонняя статистика и лагранжевый анализ.**

На основе альтиметрических данных за 1993–2024 гг. проведена детальная перепись мезомасштабных вихрей в северной части Японского моря. Полученные оценки (2717 антициклонов и 3823 циклона с временем жизни больше 30 суток) согласуются с предыдущими альтиметрическими исследованиями [149] и

дополняют их за счёт более длительного временного ряда, расчёта расширенного набора кинематических характеристик и применения лагранжевых методов. Общее количество циклонов превышает количество антициклонов в 1.4 раза, что коррелирует с более высокой частотой разделений циклонов (0.18 против 0.11 событий на вихрь).

Выявлена устойчивая пространственная сегрегация вихрей разной полярности, наиболее ярко проявляющаяся в северо-восточной части моря (индекс Жаккара для интенсивных очагов составляет 1–3%), обусловленная топографией и динамикой пограничных течений. Впервые закартированы зоны регулярного вихреобразования в северо-восточной части моря и детально описаны механизмы генерации вихрей в различных регионах: бароклинная неустойчивость ветвей Цусимского течения в субтропической зоне, топографическая генерация над подводными горами (гайоты Габбас и Кольцо) и неустойчивость пограничных течений (Приморское течение) в субарктической зоне.

#### **Детальный лагранжевый анализ эволюции долгоживущего антициклонического вихря.**

На примере вихря «А» (время жизни 9 месяцев) впервые количественно продемонстрирована способность антициклонических вихрей захватывать и удерживать в ядре субтропические воды (60–90% объёма на протяжении всей жизни) и осуществлять их транспорт через Субполярный фронт в субарктическую зону. Прослежены ключевые стадии жизненного цикла: формирование, рост за счёт захвата вод разного происхождения, разделение, стадия максимального развития и разрушение. Показано, что захваченные субтропические воды могут сохраняться в ядре вихря до его диссипации, что подтверждает их значимую роль в формировании термохалинной структуры северной части моря.

#### **Методологический вклад.**

Разработан и верифицирован метод посуточной количественной оценки происхождения вод в ядрах мезомасштабных вихрей, основанный на совмест-

ном применении алгоритма детектирования вихрей AMEDA и лагранжева анализа ансамблей траекторий пассивных маркеров. В отличие от существующих подходов, метод позволяет не только идентифицировать вихри, но и количественно оценивать вклад вод разного происхождения с суточным разрешением на протяжении всего жизненного цикла. Работа выполнена в условиях обработки больших объёмов данных (Big Data): за 30-летний период использованы ежедневные глобальные поля спутниковой альтиметрии, массивы траекторий дрейфующих буев, а также результаты лагранжевого моделирования, включающего расчёт траекторий сотен тысяч виртуальных частиц.

### **Научная и практическая значимость.**

Полученные результаты имеют существенное значение для понимания механизмов межширотного переноса тепла и вещества, формирования гидрологической структуры и поддержания высокой биологической продуктивности дальневосточных морей России и прилегающей части Тихого океана. Количественные оценки долей вод различного происхождения в ядрах вихрей могут быть использованы для совершенствования климатических моделей, прогнозирования распространения загрязнений (нефтяных, радионуклидных), оптимизации рыбопромысловой разведки и планирования научных экспедиций. Разработанные подходы и полученные базы данных о вихрях могут служить основой для системы оперативного мониторинга вихревой активности в регионе.

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы решена актуальная научная задача – дана комплексная характеристика мезомасштабной вихревой динамики трёх важнейших в промышленном и климатическом отношении районов дальневосточных морей России и прилегающей части Тихого океана. Разработанная и верифицированная методология, сочетающая автоматическое детектирование вихрей с лагранжевым анализом переноса водных масс, может быть применена для исследований в других регионах Мирового океана.

## Список литературы

1. *Abernathy R., Haller G.* Transport by Lagrangian Vortices in the Eastern Pacific // *Journal of Physical Oceanography*. — 2017. — Vol. 48. — P. 667–685.
2. *Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Detection of stable synoptical features of sea surface from a series of infrared satellite images // *Pattern Recognit. Image Anal.* — 2007. — Vol. 17. — P. 480–486.
3. *Alfultis M. A., Martin S.* Satellite passive microwave studies of the Sea of Okhotsk ice cover and its relation to oceanic processes, 1978–1982 // *Journal of Geophysical Research*. — 1987. — Vol. 92, no. C12. — P. 13013–13028.
4. *Allshouse M.R., Peacock T.* Lagrangian based methods for coherent structure detection // *Chaos*. — 2015. — Vol. 25. — P. 097617.
5. *Andreev A.* Investigations into the Soya Current in the Southern Part of the Okhotsk Sea Based on the Satellite Data // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2023. — Vol. 58. — P. 965–974.
6. AVISO+ - Data and products for ocean and ice. — URL: <https://www.aviso.altimetry.fr> (дата обр. 09.11.2025).
7. *Bashmachnikov I., Kozlov Igor, Petrenko Larisa, Glok N., Wekerle Claudia.* Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait From Satellite Altimetry, SAR and High-Resolution Model Data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2020. — Vol. 125. — e2019JC015832.
8. *Belonenko T. V., Budyansky M. V., Akhtyamova A. F., Udalov A. A.* Investigation of the Benguela upwelling eddies using Lagrangian modeling methods // *Ocean Dynamics*. — 2024. — Vol. 74, no. 5. — P. 373–390.

9. *Belonenko T. V., Budyansky M. V., Malysheva A. A., Udalov A. A.* Observing the Agulhas Leakage Source in the Water Mixing Area // Pure and Applied Geophysics. — 2023. — Vol. 180, no. 9. — P. 3401–3421.
10. *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. — Vol. 20. — ES6011.
11. *Bowen R., D. Ruelle.* Equilibrium States and the Ergodic Theory of Anosov Diffeomorphisms. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. — C. 76. — (Lecture Notes in Mathematics).
12. *Budyansky M. V., Kulik V. V., Kivva K. K., Uleysky M. Yu., Prants S. V.* Lagrangian Analysis of Pacific Waters in the Sea of Okhotsk Based on Satellite Data in Application to the Walleye Pollock Fishery // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2022. — Vol. 58. — P. 1427–1437.
13. *Budyansky M. V., Ladychenko S. Yu., Lobanov V. B., Prants S. V., Udalov A. A.* Evolution and Structure of a Mesoscale Anticyclonic Eddy in the Northwestern Japan Sea and Its Exchange with Surrounding Waters: In Situ Observations and Lagrangian Analysis // Ocean Dynamics. — 2024. — Vol. 74. — P. 901–917.
14. *Budyansky M.V., Prants S.V., Uleysky M.Yu.* Odyssey of Aleutian eddies // Ocean Dynamics. — 2022. — Vol. 72. — P. 455–476.
15. *Bulatov N.V., Kurennaya L.A., Muktepavel L.S., Aleksanina M.G., Gerbek E.E.* Eddy water structure in the southern Okhotsk Sea and its seasonal variability (results of satellite monitoring) // Oceanology. — 1999. — Vol. 39. — P. 29–37.
16. *Carnevale G.F., Kloosterziel R.C., Van Heijst G.J.F.* Propagation of barotropic vortices over topography in a rotating tank // J. Fluid Mech. — 1991. — Vol. 233. — P. 119.

17. *Chaigneau A., Gizolme A., Grados C.* Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns // *Progress in Oceanography*. — 2008. — Vol. 79. — P. 106–119.
18. *Chaigneau A., Pizarro O.* Eddy characteristics in the eastern South Pacific // *Journal of Geophysical Research-Oceans*. — 2005. — Vol. 110. — P. C06005.
19. *Chang K.-I., Teague W., Lyu S., Perkins H., Lee D.-K., Watts D., Kim Y.-B., Mitchell D., Lee C., Kim K.* Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review // *Progress in Oceanography*. — 2004. — Vol. 61. — P. 105–156.
20. *Chang K.I., Zhang C.I., Park C., Kang D.J., Ju S.J., Lee S.H., Wimbush M.* *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*. — Switzerland : Springer International Publishing, 2015. — C. 460.
21. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. — 2011. — Vol. 91. — P. 167–216.
22. *Danchenkov M. A., Lobanov V. B., Riser S. C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H.* A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea // *Oceanology*. — 2006. — Vol. 19. — P. 18–31.
23. *Demchenko A. Y., Budyansky M. V., Bashmachnikov I. L., Udalov A. A.* Lagrangian Analysis of Fast-Transported Recirculating Atlantic Water in the Fram Strait // *Oceanology*. — 2026. — Vol. 66. — P. 10–19.
24. *Dijkstra H. A.* *Nonlinear Physical Oceanography*. T. 22. — Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2000. — (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library).

25. *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 // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* — 2007. — Vol. 112. — P. C05043.
26. *Dong C., Liu L., Nencioli F., Bethel B., Liu Yu, xu Guangjun, Ma J., Ji J., Sun W., Shan H., Lin X., Zou B.* The near-global ocean mesoscale eddy atmospheric-oceanic-biological interaction observational dataset // *Scientific Data.* — 2022. — Vol. 9. — P. 436.
27. *Ebuchi N.* Seasonal and interannual variations of the East Sakhalin Current observed by the TOPEX/POSEIDON altimeter // *J. Oceanogr.* — 2006. — Vol. 62. — P. 171–183.
28. *Ebuchi N., Fukamachi Y., Ohshima K.I., Wakatsuchi M.* Subinertial and seasonal variations in the Soya Warm Current revealed by HF ocean radars, coastal tide gauges, and bottom-mounted ADCP // *J. Oceanogr.* — 2009. — Vol. 65. — P. 31–43.
29. *Faghmous J. H., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V.* A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // *Scientific Data.* — 2015. — Vol. 2. — P. 35.150028.
30. *Favorite F., Dodimead A.J., Nasu K.* Oceanography of the subarctic pacific region, 1960 – 71 // *Bull. Int. North Pac. Comm.* — 1976. — Vol. 33. — P. 187.
31. *Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* New circulation features in the Okhotsk Sea from a numerical model // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* — 2020. — Vol. 56. — P. 618–631.
32. *Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Simulated pathways of the northwestern pacific water in the Okhotsk Sea and ocean-

- sea exchange transport // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* — 2021. — Vol. 57. — P. 329–340.
33. *Fayman P.A., Salyuk P.A., Budyansky M.V., Burenin A.V., Didov A.A., Lipinskaya N.A., Ponomarev V.I., Udalov A.A., Morgunov Yu.N., Uleyskiy M.Yu., Shkramada S.S., Pichugin M.K.* Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // *Marine Pollution Bulletin.* — 2023. — Vol. 194. — P. 115414.
34. *Filatov V.N., Startsev A.V., Ustinova E.I., Eremin Yu.V.* Pacific saury. Scientific and information support for fishing expeditions. — Rostov-on-Don : SSC RAS Publishing, 2011. — P. 120.
35. *Flierl G.R.* Particle motions in large-amplitude wave fields // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics.* — 1981. — Vol. 18. — P. 39–74.
36. *Gaube P., McGillicuddy D. J., Moulin A. J.* Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally // *Geophysical Research Letters.* — 2019. — Vol. 46. — P. 1505–1512.
37. *Gladyshev S., Martin S., Riser S., Figurkin A.* Dense water production on the northern Okhotsk shelves: comparison of shipbased spring-summer observations for 1996 and 1997 with satellite observations // *J. Geophys. Res.* — 2000. — Vol. 105 (C11). — P. 281–299.
38. Global Ocean Physical Reanalysis GLORYS12V1. — URL: <https://data.marine.copernicus.eu> (дата обр. 09.11.2025) ; Global Ocean Physics Reanalysis with hourly output at  $1/12^\circ$  horizontal resolution.
39. *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: Oceans.* — 1992. — Vol. 97. — P. 7223–7240.

40. *Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C.M., Furey H.H., Bower A., Talley L.* Japan/East Sea intrathermocline eddies // *J. Phys. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 32. — P. 1960–1974.
41. *Grebogi C., Hammel S.M., Yorke J.A., Sauer T.* Shadowing of physical trajectories in chaotic dynamics: Containment and refinement. // *Physical Review Letters.* — 1990. — Vol. 65. — P. 1527–1530.
42. *Haller G.* Lagrangian Coherent Structures // *Annual Review of Fluid Mechanics.* — 2015. — Vol. 47. — P. 137–162.
43. *Haller G., Beron-Vera F. J.* Geodesic theory of transport barriers in two-dimensional flows // *Physica D: Nonlinear Phenomena.* — 2012. — Vol. 241. — P. 1680–1702.
44. *Haller G., Hadjighasem A., Farazmand M., Huhn F.* Defining coherent vortices objectively from the vorticity // *Journal of Fluid Mechanics.* — 2016. — Vol. 795. — P. 136–173.
45. *Isern-Fontanet J., Garcia-Ladona E.* Vortices of the Mediterranean Sea: An Altimetric Perspective // *Journal of Physical Oceanography.* — 2006. — Vol. 36. — P. 87–103.
46. *Isern-Fontanet J., Garcia-Ladona E., Font J.* Identification of marine eddies from altimetry // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* — 2003. — Vol. 20. — P. 772–778.
47. *Isoda Y.* Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // *J. Oceanogr.* — 1994. — Vol. 50. — P. 1–16.
48. *Isoguchi O., Kawamura H., Oka E.* Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111. — P. 10003.

49. *Japan Meteorological Agency*. JMA Observation Lines and Monitoring Data. — 2025. — URL: <https://www.data.jma.go.jp>; Упоминание А-линии, используемой для определения южной границы исследовательского домена. Официальный веб-сайт Японского метеорологического агентства.
50. *Katsumata K., Yasuda I.* Estimates of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific // *J. Oceanogr.* — 2010. — Vol. 66. — P. 489–504.
51. *Kida S., Qiu B.* An exchange flow between the Okhotsk Sea and the North Pacific driven by the East Kamchatka Current // *J. Geophys. Res.: Oceans.* — 2013. — Vol. 118. — P. 1–12.
52. *Kim S.-Y., Park Y.-G., Kim Y. H., Seo S., Jin H., Pak G., Lee H. J.* Origin, variability, and pathways of East Sea Intermediate Water in a high-resolution ocean reanalysis // *J. Geophys. Res.: Oceans.* — 2021. — Vol. 126. — e2020JC017158.
53. *Kolonchin K.V., Pavlova A.O., Betin O.I., Yanovskaya N.V.* Walleye pollock as an object of Russian and world fishery // *Trudy VNIRO.* — 2022. — Vol. 189. — P. 5–15.
54. *Kubryakov A., Stanichny S.* Mesoscale Eddies in the Black Sea from Altimetry Data // *Oceanology.* — 2015. — Vol. 55. — P. 56–67.
55. *Kuga M., Ohshima K., Kimura N., Nakata K., Fukamachi Y.* Particle-tracking experiments of coastal-origin sea ice that could induce high biological productivity in the Sea of Okhotsk // *Journal of Oceanography.* — 2022. — Vol. 79. — P. 145–159.
56. *Kuhn H.W.* The Hungarian Method for the Assignment Problem : Jünger, M., et al. 50 Years of Integer Programming 1958-2008. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2010.

57. *Kulik V.V., Ovsyannikov E.E., Varkentin A.I., Ilyin O.I., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Prants S.V.* Catch efficiency and biomass estimates of Wall-eye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in relation to Lagrangian indicators and surface temperature of water in the Okhotsk Sea // *Fisheries Oceanography*. — 2026. — Vol. 35. — P. 430–444.
58. *Kusakabe M., Andreev A., Lobanov V., Zhabin I., Kumamoto Y., Murata A.* Effects of the anticyclonic eddies on water masses, chemical parameters and chlorophyll distributions in the Oyashio current region // *J. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 58. — P. 691–701.
59. *Lapko V. V., Radchenko V. I.* Sea of Okhotsk // *Marine Pollution Bulletin*. — 2000. — Vol. 41, no. 1–6. — P. 179–187.
60. *Le Vu B., Stegner A., Arsouze T.* Angular momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and its application to Coastal Eddy formation // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 2018. — Vol. 35, no. 4. — P. 739–762.
61. *Lee D.-K., Niiler P.P.* The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // *Deep Sea Res. Part II*. — 2005. — Vol. 52, no. 11–13. — P. 1547–1563.
62. *Lobanov V. B., Danchenkov M. A., Nikitin A. A.* On the role of mesoscale eddies in the Japan Sea water mass transport and modification // *Journal of Oceanography*. — 1998. — Vol. 11, no. 2. — P. 46.
63. *Mancho A.M., Small D., Wiggins S.* A comparison of methods for interpolating chaotic flows from discrete velocity data // *Comput. Fluid*. — 2006. — Vol. 35. — P. 416–428.
64. *Martínez-Moreno J., Hogg A. McC., England M. H.* Climatology, Seasonality, and Trends of Spatially Coherent Ocean Eddies // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2022. — Vol. 127 (7). — e2021JC017453.

65. *McWilliams J. C.* The vortices of two-dimensional turbulence // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1990. — Vol. 219. — P. 361–385.
66. *Mendoza C., Mancho A., Wiggins S.* Lagrangian descriptors and the assessment of the predictive capacity of oceanic data sets // *Nonlinear Processes in Geophysics*. — 2014. — Vol. 21. — P. 677–689.
67. *Mensah V., Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S.* Seasonal changes of water mass, circulation and dynamic response in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk // *Deep Sea Res. Oceanogr. Res. Pap.* — 2019. — Vol. 144 (2). — P. 115–131.
68. *Mikaelyan A.S., Zatsepin A.G., Kubryakov A.A.* Effect of Mesoscale Eddy Dynamics on Bioproductivity of the Marine Ecosystems (Review) // *Physical Oceanography*. — 2020. — Vol. 27, no. 6. — P. 590–618.
69. *Mundo R., Matsunaka T., Nakanowatari T., Taniuchi Y., Inoue M., Kasai H., Mashita K., Mitsunushi H., Nagao S.* A review of the oceanographic structure and biological productivity in the southern Okhotsk Sea // *Progress in Oceanography*. — 2023. — T. 221. — C. 103194.
70. *Nakamura T., Awaji T.* Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: a three-dimensional nonhydrostatic model experiment // *J. Geophys. Res.* — 2004. — Vol. 109. — C09S07.
71. *NASA Ocean Biology Processing Group.* Sea Surface Temperature Data from Satellites MODIS Aqua/Terra. — 2025. — URL: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directdataaccess/Level-3%20Binned/Aqua-MODIS/> ; 2025-11-09. Online.
72. *Nencioli F., Dong C., Dickey T., Washburn L., McWilliams J. C.* A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface ve-

- localities in the Southern California Bight // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 2010. — Vol. 27. — P. 564–579.
73. *Nihashi S., Ohshima K.I., Tamura T., Fukamachi Y., Saitoh S.* Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E // *J. Geophys. Res.* — 2009. — T. 114. — C. C10025.
74. *Novoselova E.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. and Udalov A.A., Belonenko T.V.* Lagrangian Eddy Boundary Delineation Algorithm—LEBDA: A case study of the Lofoten Vortex // *Physics of Fluids*. — 2025. — Vol. 37. — P. 076657.
75. *Ohshima K., Fukamachi Y., Mutoh T., Wakatsuchi M.* A generation mechanism for mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea: baroclinic instability caused by enhanced tidal mixing // *J. Oceanogr.* — 2005. — Vol. 61. — P. 247.
76. *Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S., Wakatsuchi M.* Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific // *Deep-Sea Res.* — 2010. — Vol. 57. — P. 1247–1256.
77. *Ohshima K.I., Wakatsuchi M., Fukamachi Y., Mizuta G.* Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters // *J. Geophys. Res.* — 2002. — Vol. 107. — P. 3195.
78. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. — 1970. — Vol. 17. — P. 445–454.
79. *Okunishi T., Ito S., Hashioka T., Sakamoto T.T., Yoshie N., Sumata H., Yara Y., Okada N., Yamanaka Y.* Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific // *Clim. Change*. — 2012. — Vol. 115. — P. 485–503.

80. *Park K.-A., Chung J.Y., Kim K.* Sea surface temperature fronts in the east (Japan) sea and temporal variations // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — Vol. 31. — P. L07304.
81. *Pedlosky J.* *Geophysical Fluid Dynamics.* — Springer-Verlag New York Inc., 1987. — C. 710.
82. *Pegliasco C., Delepouille A., Mason E., Morrow R., Faugere Y., Dibarboure G.* META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // *Earth System Science Data.* — 2022. — Vol. 14. — P. 1087–1107.
83. *Peng Y., Xu X., Shao Q., Weng H., Niu H., Li Z., Zhang C., Li P., Zhong X., Yang J.* Applications of Finite-Time Lyapunov Exponent in detecting Lagrangian Coherent Structures for coastal ocean processes: a review // *Frontiers in Marine Science.* — 2024. — Vol. 11. — P. 1345260.
84. *Petkilev P.* Review of mesoscale eddy detection and tracking algorithms // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa.* — 2017. — Vol. 14. — P. 27–47.
85. *Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V.* Modeling mean month thermohaline patterns and water circulation on southwestern shelf of Sakhalin // *Izv. TINRO.* — 2017. — Vol. 191(4). — P. 160–175.
86. *Ponomarev V.I., Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu.* Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea // *Ocean Model.* — 2018. — Vol. 126. — P. 43–55.
87. *Prants S.* Dynamical systems theory approach in oceanography: a review on achievements, limitations, verification and validation of Lagrangian methods // *Frontiers in Marine Science.* — 2025. — Vol. 12. — P. 1621820.

88. *Prants S., Ponomarev V., Budyansky M., Uleysky M., Fayman P.* Lagrangian analysis of the vertical structure of eddies simulated in the Japan Basin of the Japan/East Sea // *Ocean Model.* — 2015. — Vol. 86. — P. 128–140.
89. *Prants S.V.* Backward-in-time methods to simulate chaotic transport and mixing in the ocean // *Phys. Scripta.* — 2015. — Vol. 90. — P. 074054.
90. *Prants S.V.* Trench eddies in the northwest pacific: An overview // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* — 2021. — Vol. 57, no. 4. — P. 341–353.
91. *Prants S.V., Andreev A.G., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* Impact of the Alaskan Stream flow on surface water dynamics, temperature, ice extent, plankton biomass, and walleye pollock stocks in the eastern Okhotsk Sea // *Journal of Marine Systems.* — 2015. — Vol. 151. — P. 47–56.
92. *Prants S.V., Budyansky M.V., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Uleysky M.Y.* Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trench eddies // *J. Geophys. Res.* — 2020. — Vol. 125. — P. 1–21.
93. *Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I., Uleysky M.Y.* Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // *Ocean Modell.* — 2011. — Vol. 38. — P. 114–125.
94. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // *Nonlinear Processes in Geophysics.* — 2017. — Vol. 24. — P. 89–99.
95. *Prants S.V., Fayman P.A., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Simulation of winter deep slope convection in peter the great bay (Japan sea) // *Fluid.* — 2022. — Vol. 7. — P. 134.

96. *Prants S.V., Koshel K.V.* Chaotic advection in the ocean // *Physics-Uspekhi*. — 2006. — Vol. 49, no. 11. — P. 1151–1178.
97. *Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V.* Lagrangian Oceanography : Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. — Springer-Verlag, 2017. — C. 273.
98. *Qiu B.* Kuroshio and Oyashio currents // *Encyclopedia of Ocean Sciences* / под ред. John H. Steele, Steve A. Thorpe, Karl K. Turekian. — 1st. — San Diego : Academic Press, 2001. — C. 1413–1425.
99. *Qiu B.* The Kuroshio extension System: its large-scale variability and role in the midlatitude ocean-atmosphere interaction // *J. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 58. — P. 57–75.
100. *Robinson I.S.* Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography. — Springer, 2010. — C. 684.
101. *Rogachev K.A.* Recent variability in the Pacific western subarctic boundary currents and Sea of Okhotsk // *Prog. Oceanogr.* — 2000. — Vol. 47. — P. 299–336.
102. *Russell R.W., Harrison N., Hunt G.L.* Foraging at a front: Hydrography, zooplankton, and avian planktivory in the northern Bering Sea // *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER.* — 1999. — Vol. 182. — P. 77–93.
103. *Sadarjoen A., Post F.H.* Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry // *Computers and Graphics*. — 2000. — Vol. 24. — P. 333–341.
104. *Sakurai Y.* An overview of the Oyashio ecosystem // *Deep-Sea Research II*. — 2007. — Vol. 54. — P. 2526–2542.

105. *Sandalyuk N., Khachatryan E.* Automatic eddy detection in the MIZ based on YOLO algorithm and SAR images // *Science of Remote Sensing*. — 2025. — Vol. 11. — P. 100228.
106. *Shcherbina A.Y., Talley L.D., Rudnick D.L.* Direct observations of North Pacific ventilation: brine rejection in the Okhotsk Sea // *Science*. — 2003. — Vol. 302. — P. 1952–1955.
107. *Shevchenko G.V., Chastikov V.N., Tsoy A.T.* Eddies off the southeastern coast of Sakhalin island // *Geosystems of Transition Zones*. — 2020. — Vol. 4. — P. 35–45.
108. *Shin C.-W.* Characteristics of a Warm Eddy observed in the Ulleung Basin in July 2005 // *Ocean Polar Res.* — 2009. — Vol. 31. — P. 283–296.
109. *Sokolovskiy Mikhail, Verron Jacques.* Dynamics of vortex structures in a stratified rotating fluid. — Springer, 2014. — C. 382.
110. *Sorokin Y.I., Sorokin P.Y.* Production in the Sea of Okhotsk // *J. Plankton Res.* — 1999. — Vol. 21. — P. 201–230.
111. *Souza J., Boyer Montégut C. de, Traon P.* Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean // *Ocean Science Discussions*. — 2011. — Vol. 8. — P. 483–531.
112. *Stegner A., Le Vu B., Dumas F., Ghannami M.A., Nicolle A., Durand C., Faugere Y.* Cyclone anticyclone asymmetry of eddy detection on gridded altimetry product in the Mediterranean Sea // *J. Geophys. Res.: Oceans*. — 2021. — Vol. 126 (9). — e2021JC017475.
113. *Stepanov D.V.* Estimating the baroclinic Rossby radius of deformation in the Sea of Okhotsk // *Russ. Meteorol. Hydrol.* — 2017. — Vol. 9. — P. 601–606.

114. *Tadokoro K., Chiba S., Ono T., Midorikawa T., Saino T.* Interannual variations of neocalanus biomass in the Oyashio waters of the western North Pacific // *Fish. Oceanogr.* — 2005. — Vol. 14. — P. 210–222.
115. *Takematsu M., Ostrovski A.G., Nagano Z.* Observations of Eddies in the Japan Basin Interior // *J. Oceanogr.* — 1999. — Vol. 55. — P. 237–246.
116. *Takizawa T.* Characteristics of the Soya warm current in the Okhotsk Sea // *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* — 1982. — Vol. 38. — P. 281–292.
117. *Talley L.D.* An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North pacific // *Deep-Sea Res.* — 1991. — Vol. 38A. — P. 171–190.
118. *Talley L.D., Min D.-H., Lobanov V.B., Luchin V.A., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Shcherbina A.Y., Tishchenko P.Y., Zhabin I.A.* Japan/East Sea water masses and their relation to the sea's circulation // *Oceanogr.* — 2006. — Vol. 19. — P. 32–49.
119. *Talley L.D., Tishchenko P., Luchin V., Nedashkovskiy A., Sagalaev S., Kang D.-J., Warner M., Min D.H.* Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999 // *Prog. Oceanog.* — 2004. — Vol. 61. — P. 277–348.
120. *Thomson R.E., LeBlond P.H., Rabinovich A.B.* Oceanic odyssey of a satellite tracked drifter: North Pacific variability delineated by a single drifter trajectory // *J. Oceanogr.* — 1997. — Vol. 53. — P. 81–87.
121. *Trusenkova O., Ishida H.* Seasonal variation of surface and deep currents in the Japan Sea // *Doboku Gakkai Ronbunshu.* — 1997. — Vol. 796. — P. 93–111.
122. *Uchimoto K., Mitsudera H., Ebuchi N.* Anticyclonic eddy caused by the Soya warm current in an Okhotsk OGCM // *J. Oceanogr.* — 2007. — Vol. 63. — P. 379–391.

123. *Udalov A. A., Budyansky M. V., Prants S. V., Didov A. A.* Census and properties of mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2024. — Vol. 212. — P. 104374.
124. *Udalov A. A., Lobanov V. B., Prants S. V., Ladychenko S. Yu., Budyansky M. V., Salyuk A. N.* Census of mesoscale eddies in the Northwestern Japan Sea based on Lagrangian analysis and ship observations // Progress in Oceanography. — 2025. — Vol. 236. — P. 103513.
125. *Udalov A. A., Prants S. V.* Mesoscale eddies in the northern Japan/East Sea: census, dynamics and properties // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2026. — Vol. 229. — P. 104694.
126. *Udalov A.A., Budyansky M.V., Prants S.V.* A census and properties of mesoscale Kuril eddies in the altimetry era // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2023. — Vol. 200. — P. 104129.
127. United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030). — URL: <https://www.unesco.org/en/decades/ocean-decade> (дата обр. 09.11.2025).
128. *Vasil'ev A.S., Khrapchenkov F. F.* Seasonal variability of water circulation and exchange between the Sea of Okhotsk and the Pacific // Russian Meteorology and Hydrology. — 1998. — Vol. 6. — P. 44–49.
129. *Wagawa T., Kawaguchi Y., Igeta Y., Honda N., Okunishi T., Yabe I.* Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from an underwater glider // J. Mar. Syst. — 2020. — Vol. 201. — P. 103242.
130. *Wakatsuchi M., Martin S.* Satellite observations of the ice cover over the Kuril Basin region the Okhotsk Sea and its relation to the regional oceanography // J. Geophys. Res. — 1990. — Vol. 95. — P. 13, 393–13, 410.

131. *Wakatsuchi M., Martin S.* Water circulation of the Kuril Basin of the Okhotsk Sea and its relation to eddy formation // J. Oceanogr. Soc. Jpn. — 1991. — Vol. 47. — P. 152–168.
132. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // Physica D. — 1991. — Vol. 48. — P. 273–294.
133. *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. — Vol. 17. — P. 2088–2095.
134. *Yabe I., Kawaguch Y., Wagawa T., Fujio S.* Anatomical study of Tsushima Warm Current: Determination of principal pathways and its variation // Prog. in Oceanogr. — 2021. — Vol. 194. — P. 102590.
135. *Yasuda I.* Hydrographic structure and variability in the Kuroshio-Oyashio transition areas // J. Oceanogr. — 2003. — Vol. 59. — P. 389–402.
136. *Yi J., du Yunyan, He Z., Zhou C.* Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly // Ocean Science Discussions. — 2013. — Vol. 10. — P. 825–851.
137. *Yoon J.-H., Kim Y.-J.* Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea // J. Mar. Syst. — 2009. — Vol. 78. — P. 226–236.
138. *Zavala Sansón L., Heijst G. van, Doorschoot J.* Reflection of barotropic vortices from a step-like topography // Il Nuovo Cimento C. — 1999. — Ho-яб. — T. 22. — C. 909–929.
139. *Zi Nannan, Li Xiaoming, Gade Martin, Fu Han, Min Sisi.* Ocean eddy detection based on YOLO deep learning algorithm by synthetic aperture

- radar data // Remote Sensing of Environment. — 2024. — Vol. 307. — P. 114139.
140. *Александрин А.И., Александрина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. — 2004. — Т. 1. — С. 382—386.
141. *Александрин А.И., Александрина М.Г., Н.В. Булатов, Э.Э Гербек.* Методологические аспекты выделения вихрей по спутниковым и судовым измерениям // Известия ТИНРО. — 1997. — Т. 122. — С. 2—11.
142. *В.А. Лучин.* Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов // Тр. ДВНИГМИ. — 1987. — Т. 36. — С. 3—13.
143. *В.А. Лучин, А.А. Круц.* Характеристики ядер водных масс Охотского моря // Известия ТИНРО. — 2016. — Т. 184. — С. 204—218.
144. *В.Г. Ярчин.* Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Труды ДВНИГМИ. — 1980. — Т. 80. — С. 46—61.
145. *В.Ф. Козлов, А.Ю. Гурулев.* Циркуляция вод Охотского моря и особенности ее внутригодовой изменчивости по результатам диагностических расчетов // Метеорология и гидрология. — 1994. — Т. 6. — С. 70—78.
146. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Т. IX. — СПб. : Гидрометеиздат, 2003. — С. 398. — (Гидрометеорология и гидрохимия морей ; 1).
147. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Т. VIII. — СПб. : Гидрометеиздат, 2003. — С. 398. — (Гидрометеорология и гидрохимия морей ; 1).
148. *Жабин И.А., Андреев А.Г.* Взаимодействие мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. — 2014. — Т. 4. — С. 75—86.

149. *Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Таранова С.Н., Лобанов В.Б.* Циркуляция вод и мезомасштабные вихри в Японском море по данным спутниковой альтиметрии // Исследование Земли из космоса. — 2023. — № 6. — С. 52—71.
150. *Жмур В.В.* Мезомасштабные вихри океана. — Москва : ГЕОС, 2011. — С. 384.
151. *Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. — 2-е, перераб. и доп. — Л. : Гидрометеиздат, 1987. — С. 509.
152. *Леонов А.К.* Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1960. — С. 765. — (Региональная океанография).
153. *Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д.* Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Книга 1. Океанологические исследования. — Москва : Наука, 2007. — С. 450—473.
154. *Малинин В. Н.* Общая океанология : Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Гидрометеорология спец. "Океанология". Т. 1. — М-во общ. и проф. образования РФ. Рос. гос. гидрометеорол. ун-т. - Санкт-Петербург : Изд. РГГМУ, 1998. — С. 684.
155. *Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И.* Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Известия ТИНРО. — 2009. — Т. 157. — С. 158—167.
156. *Никитин А.А., Юрасов Г.И.* Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. — 2008. — № 5. — С. 42—57.

157. Новоселова Е.В., Травкин В.С., Лебедева М.А., Удалов А.А., Будянский М.В., Белоненко Т.В. Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. — 2024. — Т. 69. — С. 372—388.
158. Основные результаты научно-исследовательских работ за 2023 г. / под ред. Г.И. Долгих. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2024. — С. 129.
159. Основные результаты научно-исследовательских работ за 2024 г. / под ред. Г.И. Долгих. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2025. — С. 95.
160. Основные результаты научно-исследовательских работ за 2025 г. / под ред. Г.И. Долгих. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2026. — С. 115.
161. Пономарев В.И., Файман П.А., Машкина И.В., Дубина В.А. Моделирование циркуляции синоптического масштаба в северо-западной части Японского моря // Морской гидрофизический журнал. — 2013. — Т. 5. — С. 51—63.
162. Рабинович А. Б. Топографические вихри в районе Курило-Камчатского желоба // Доклады Академии наук СССР. — 1984. — Т. 277 (4). — С. 976—979.