

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Выпускная квалификационная работа  
**Мезомасштабные вихри Северо-западной части  
Тихого океана**

Уровень образования:

Направление 05.03.04 *«Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа СВ.5021.2018 *«Океанология»*

Выполнил:

студент 4 курса

Иванов Кирилл Денисович

Научный руководитель:

Профессор кафедры океанологии,

доктор географических наук

Белоненко Татьяна Васильевна

Рецензент: доцент кафедры

прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК

и комплексного управления прибрежными зонами

Института гидрологии и океанологии РГГМУ,

кандидат географических наук

Гордеева Светлана Михайловна

Санкт-Петербург

2022

# Оглавление

Введение.....	3
1. Данные и методы.....	7
1.1 ETOPO1.....	7
1.2 GLORYS12V1.....	7
1.3. Массив Челтона.....	8
2. Объект исследования.....	9
3. Цели и задачи.....	9
4. Анализ океанологических параметров.....	10
4.1 Общая информация о вихрях.....	10
4.2 Орбитальные скорости на поверхности и питание.....	12
4.3 Аномалии уровня (SSH).....	19
4.4 Разрезы через антициклон.....	20
4.5 Разрезы через циклон.....	23
4.6 Орбитальные скорости на глубине.....	27
Основные выводы.....	28
Список литературы.....	29

## Введение

В своей работе [Broecker et al., 1982] авторы вводят понятие «глобальный океанический конвейер». Данная система представляет собой совокупность в меридиональном и горизонтальном направлениях. «Конвейер» выступает связующим звеном всех океанов и климатических зон. Он уменьшает контраст между меридиональными характеристиками водных масс [Richards et al., 2015; Алексеев и др., 2016].

В исследуемом в данной работе районе, расположенном между  $42-48^{\circ}$  с.ш. и  $150-160^{\circ}$  в.д. В него входят некоторые острова, являющиеся частью Курильского архипелага, среди них такие как: Росшуа, острова Ушишир, Симушир, Кетой, острова Черные братья, и частично остров Итуруп (рис. 1).

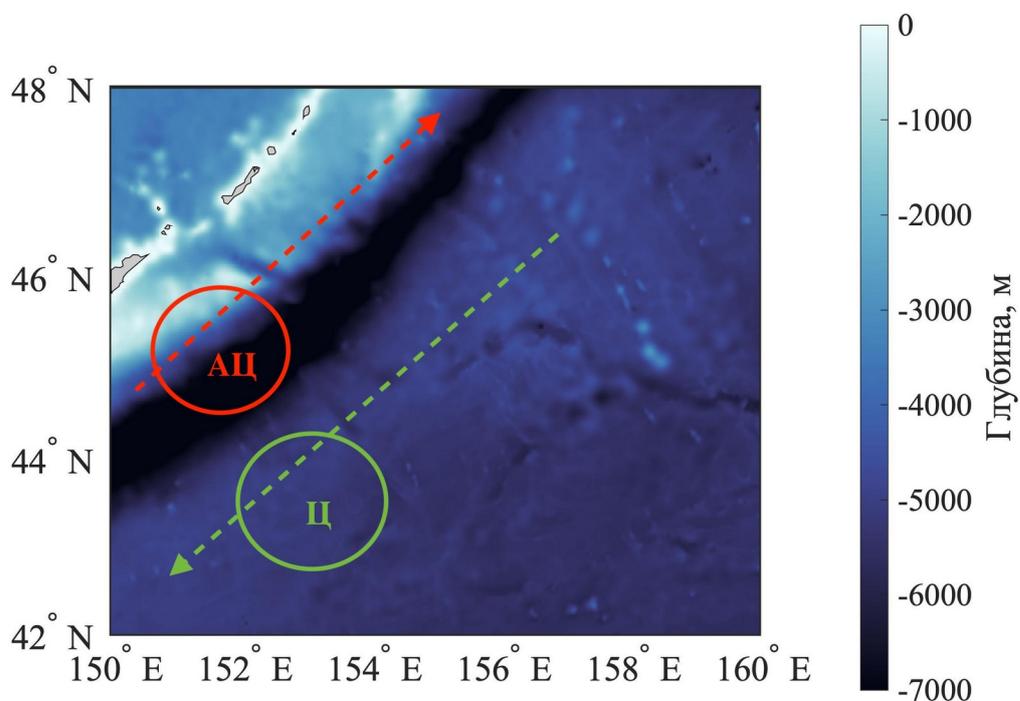


Рисунок 1. Район исследования. Цветом показана топография (м). Кругами обозначено примерное расположение мезомасштабных вихрей: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 15 октября 2015 года. Стрелками обозначено направление движения вихрей.

«Глобальный конвейер» представлен теплым течением Курошио и холодным западно-камчатским течением, которое южнее переходит в течение Ойясио (рис. 2 (а), (б)).

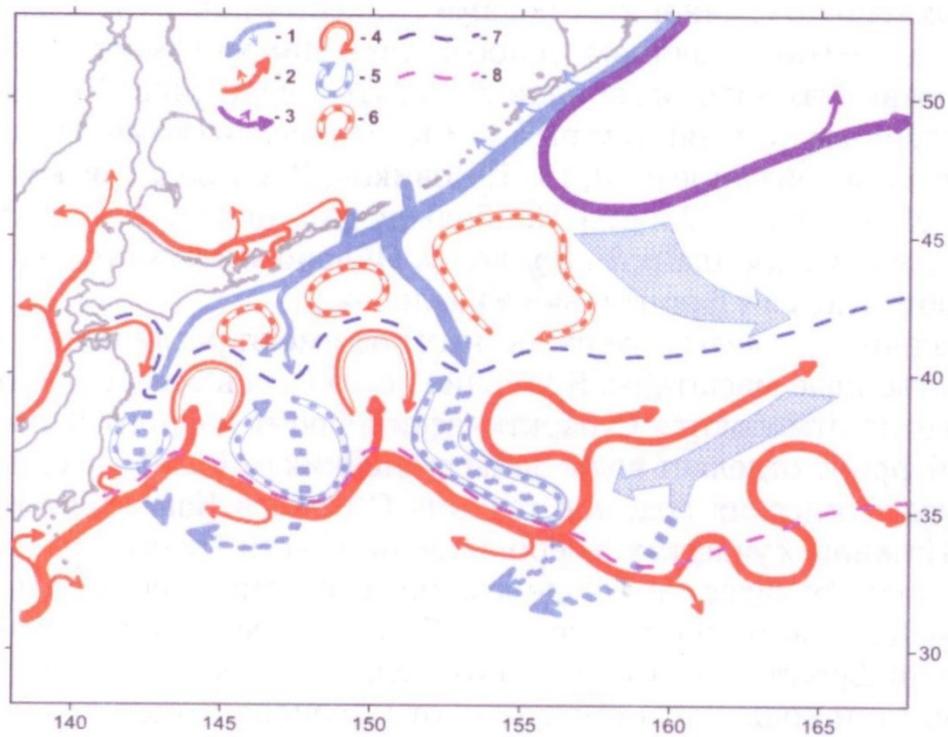


Рисунок 2 (а). Схема основных течений и вихрей в северо-западной части Тихого океана.

1 – течение Ойясио и его ветви,

2 – теплые течения,

3 – западная периферия Алеутского круговорота,

4 – вихри вод течения Куроисио,

5 – вихри ветвей холодных течений,

6 – вихри ветвей Куроисио,

7 – Субарктический фронт,

8 – фронт Куроисио,

9 – трансформированные субарктические воды [Филатов, 2015].

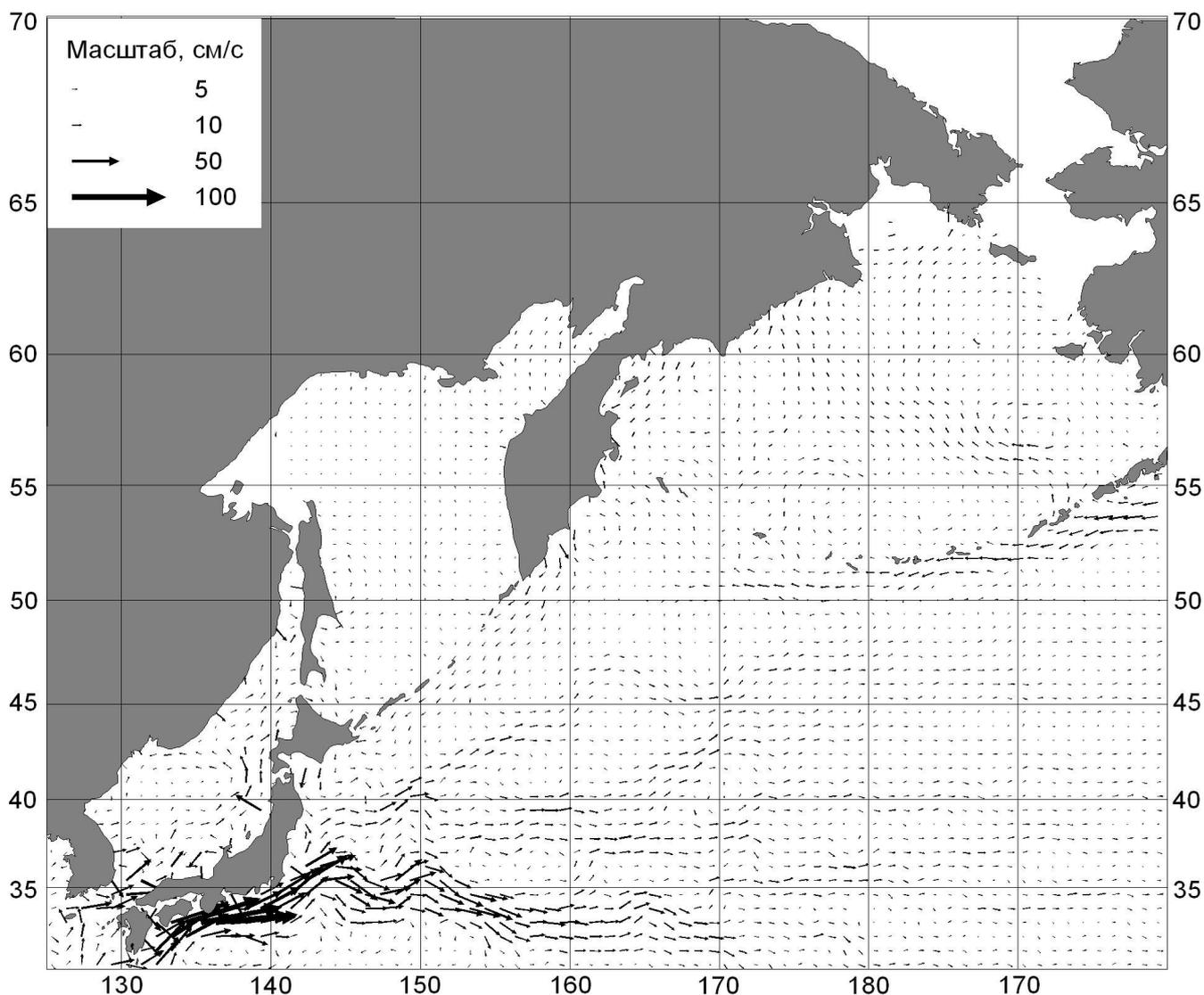


Рисунок 2 (б). Карта средних геострофических течений, построенная по данным спутниковой альтиметрии.

Течение Куроисио сильно влияет на свойства и динамику вод исследуемого района. Так меандры Куроисио, отделяясь, образуют ринги. Восточные ветви Цусимского течения, проходящие через Сангарский пролив и пролив Лаперуза, значительно влияют на режим в Южно-Курильском районе.

Западно-Камчатское течение движется на юг, и, при проходе через северные Курилы, частично заворачивает в Охотское море, где образует циклонический круговорот. После этого, часть воды через пролив Буссоль вливается обратно в основное течение. В проливе находится мощное приливное течение, которое перемешивает воды вплоть до глубоких слоев [Ono et al., 2007]. К югу от пролива Буссоль Западно-Камчатское течение начинает называться Ойясио, так как воды, Охотского моря иные по структуре, относительно проходящего севернее Западно-Камчатское

течения. Примером такого различия может служить отсутствие в Ойясио отмеченного в последнем подповерхностном максимуме температуры в слое галоклина на глубине 150-200 м. Также, содержание растворенного кислорода к Западно-Курильском течении ограничивается слоем галоклина, а в течении Ойясио оно может быть обнаружено на глубине до 700 м [Qiu, 2001].

В ширину Ойясио у берегов Курильских островов достигает 300 миль, стрежень течения со скоростями 15-65 см/с наблюдается в пределах 10-20 миль. Вертикальная мощность течения составляет не более 1500 м [Истоки, 1997].

Исследования у юго-восточного берега острова Хоккайдо показали, что течение Ойясио имеет годовой цикл. Например, зимой-весной оно распространяется от поверхности до дна, а объемный расход составляет 20-30 Sv (Sv – единица измерения, применяемая в океанологии для измерения общего расхода (транспорта) течений. Эквивалентна 0,001 км<sup>3</sup>/с.); летом-осенью течение ослабевает, останавливаясь на глубинах 2 км с объемным расходом в 3-4 Sv (Qiu, 2001).

Течение Ойясио, состоит из вод Охотского моря и Западно-Камчатского течения. Оно продолжает идти вдоль восточного берега острова Хоккайдо. На широте 42° с.ш. течение делится на две ветви: одна поворачивает от обратную от берега сторону, на восток, и соединяется с Субарктическим течением. Из-за того, что Ойясио доставляет субарктические воды на юг, Субарктическое течение сопровождается особым термохалинным фронтом между холодными, пресными водами с севера и теплыми, солеными водами субтропического происхождения с юга. Фронт имеет уникальные значения температуры (5°C) и солености (33,8 PSU) на глубине 100 м [Qiu, 2001]. Вторая ветвь Ойясио продолжает движение вдоль восточного побережья Хонсю и в районе 36° параллели с.ш, достигая северного края Куроисио, поворачивает в восточном направлении [Reddy, 2001].

На юго-западе северной циклонической циркуляции прослеживается конвергенция потоков Куроисио и Ойясио, в результате, возникает широкая Субарктическая фронтальная зона, в которой идет интенсивное образование вихрей и перемешивание вод Ойясио и Куроисио. Воды данной зоны движутся в восточном направлении со скоростями около 4-8 см/с.

В течение Ойясио хорошо выражены сезонные колебания, которые связаны как с сезонными колебаниями в истоках Ойясио, так и с сезонной изменчивостью поля ветра над океаном, а также сезонными изменениями в системе Куроисио [Истоки, 1997].

## **Климат**

Регион расположен в умеренном климатическом поясе и общими закономерностями зонального поступления солнечной радиации, циркуляцией атмосферы и влиянием Азиатского материка. Ключевым барическим центром в зимой становится алеутский минимум давления. Соответственно распределению основных барических центров происходит формирование ветровых полей. Зимой характерны северные и северо-восточные муссонные ветры, летом — южные муссоны.

Частые циклоны приводят к тропическим ураганам (тайфунам), которые образуются восточнее Филиппин, и двигаются на северо-запад мимо Тайваня, и Японии. Перед Беринговым морем они затухают [Рябчиков, 1988].

## **1. Данные и методы**

### **1.1 ETOPO1**

Для построения батиметрической карты района исследования была использована модель ETOPO1 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>). Обновленная версия данной модели является батиметрический-топографической цифровой моделью поверхности Земли.

Пространственное разрешение данной модели составляет 1' как по широте, так и по долготе. Модель включает в себя батиметрию земной поверхности и океана.

### **1.2 GLORYS12V1**

В работе использовались ежедневные данные, солёности, температуры,  $u$  и  $v$  компоненты скоростей, реанализа GLORYS12V1. Данные доступны на ресурсе CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Продукт GLORYS12V1 – представляет собой вихреразрешающий реанализ Мирового океана с пространственным разрешением  $1/12^\circ$  на 50 горизонтах.

**Реанализ** — модельные данные. Модель NEMO с форсингом ECMWF ERA-interim. Это совместная ассимиляция спутниковой альтиметрии, температуры поверхности моря (Reynolds  $0.25^\circ$  AVHRR), концентрации морского льда и *in situ*, вертикальные профили температуры и солёности. Для ассимиляции использован фильтр Калмана. Временная дискретность составляет 1 сутки.

### 1.3. Массив Челтона

Для построения траекторий долгоживущих вихрей был использован «Продукт атласа мезомасштабных вихревых траекторий», доступный по адресу <https://www.avisio.altimetry.fr>. Он представляет собой данные высоты поверхности моря, SSH, полученные при помощи спутниковой альтиметрии с использованием алгоритма идентификации и отслеживания вихрей [Chelton et al., 2011].

Данный алгоритм позволяет выделить изолированные водовороты на ежедневных картах. После этого происходит процесс отслеживания для изучения движения водоворотной массы. Данные хранятся в одном файле, содержащем несколько полей, среди которых: радиус, амплитуда, скорость и тип вращения, время наблюдения, идентификатор трека и некоторые другие поля, относящиеся к вихрям. Вихри обнаруживаются при помощи наборов данных многократной альтиметрии с определением местоположения за каждый день в течение всего периода калориметрических наблюдений (с 1993 г. по настоящее время). В основу этого алгоритма положено деление анализируемого поля аномалий уровня моря с дискретностью 1 сутки по времени и 1 пиксель по пространству. Далее, происходит выделение мезомасштабных вихрей. Алгоритм производит идентификацию вихрей как кластеров пикселей (максимальный размер вихря 2000 пикселей), которые удовлетворяют определенному набору критериев, таких как: компактность, наличие экстремума аномалий уровня моря в пределах этого кластера, согласованность значений аномалий внутри контура этого кластера с его экстремумом. В итоге, используется информация о следующих параметрах за период 1993–2017 гг.:

- Амплитуда, вычисляемая как разность между экстремальным значением аномалии уровня моря внутри замкнутого контура СШ и средним значением аномалии уровня моря вне этого контура. Измеряется в сантиметрах. Данная величина положительна как для циклонических, так и для антициклонических вихрей;
- Радиус (радиус круга), площадь которого равна площади самого внешнего замкнутого контура, где орбитальная скорость вихря достигает максимальных значений. Измеряется в километрах;
- Орбитальная скорость. Она определяется как значение средней гипертрофической скорости крайнего замкнутого контура СКС. Измеряется в сантиметрах в секунду;
- Время жизни. Это количество дней, в течение которых вихрь наблюдался в поле SSH.

## 2. Объект исследования

Роли вихрей в Мировом океане очень велика. Данные образования способствуют транспорту тепла, соли, различных растворенных веществ. Температура вихрей оказывает значительное влияние на локальную погоду побережья и на климат в целом. Вихри способствуют изменению гидрофизических полей океана, а также такие его характеристики как: оптические, акустические, гидрохимические. Сильные вихри способны становиться причиной вторичных электромагнитных полей. Вихри оказывают влияние на формирование внутренних волн, а также на поведение живых организмов [Жмур, 2011].

Объектом исследования в данной работе являются мезомасштабные вихри как циклонического, так и антициклонического характера. К мезомасштабным относятся те вихри, которые имеют горизонтальные размеры больше глубины, но, при этом, больше бароклинного радиуса деформации Россби. Бароклинный радиус деформации Россби рассчитывается по следующей

формуле:  $L = \frac{NH}{f\pi}$ , где  $L$  — бароклинный радиус деформации Россби,  $N$  — характерное значение частоты Вайсяля-Брента,  $H$  — глубина океана,  $f$  — параметр Кориолиса [Иванов и др., 1986; Новоселова и др., 2020].

## 3. Цели и задачи

Целью работы является эмпирическое описание мезомасштабных вихрей Северо-Западной части Тихого океана и оценки термохалинных и динамических параметров циклона и антициклона.

Указанная цель достигается путем решения следующих задач:

1. Анализ траекторий долгоживущих вихрей в исследуемом районе по данным массива Челтона.
2. Анализ карт горизонтального распределения скоростей течений, вертикальных профилей температуры и температуры.
3. Определения направления и скоростей горизонтального движения мезомасштабных вихрей различного характера.
4. Определение глубины нахождения ядра вихрей различного характера.
5. Анализ характера изопикн, построенных по значениям температуры и солёности с использованием уравнения TEOS-10.

6. Определения горизонта, на который распространяется динамический сигнал в зоне мезомасштабных вихрей как циклонического, так и антициклонического характера.

#### 4. Анализ океанологических параметров.

##### 4.1 Общая информация о вихрях

Обычно, вихревое движение возникает на сравнительно небольших глубинах, а именно — до 200 метров. Крупные вихри могут распространяться до 1000 метров [Латун, 1989; Кубряков, 2018; Oguz, 1993; Korotaev et al., 2006; Oguz, 1994]. По направлению движения водных масс вихри делятся на циклонические и антициклонические. При этом, антициклонические вихри, как правило более крупные и имеют более продолжительный срок жизни, по сравнению с циклоническими [Кубряков и др., 2015]. Антициклонические вихри преобладают летом, а циклонические — зимой [Zatsepin, 2003; Kubryakov et al., 2015].

В ходе данной работы были построены траектории всех вихрей в исследуемом районе по данным массива Челтона (рис. 3).

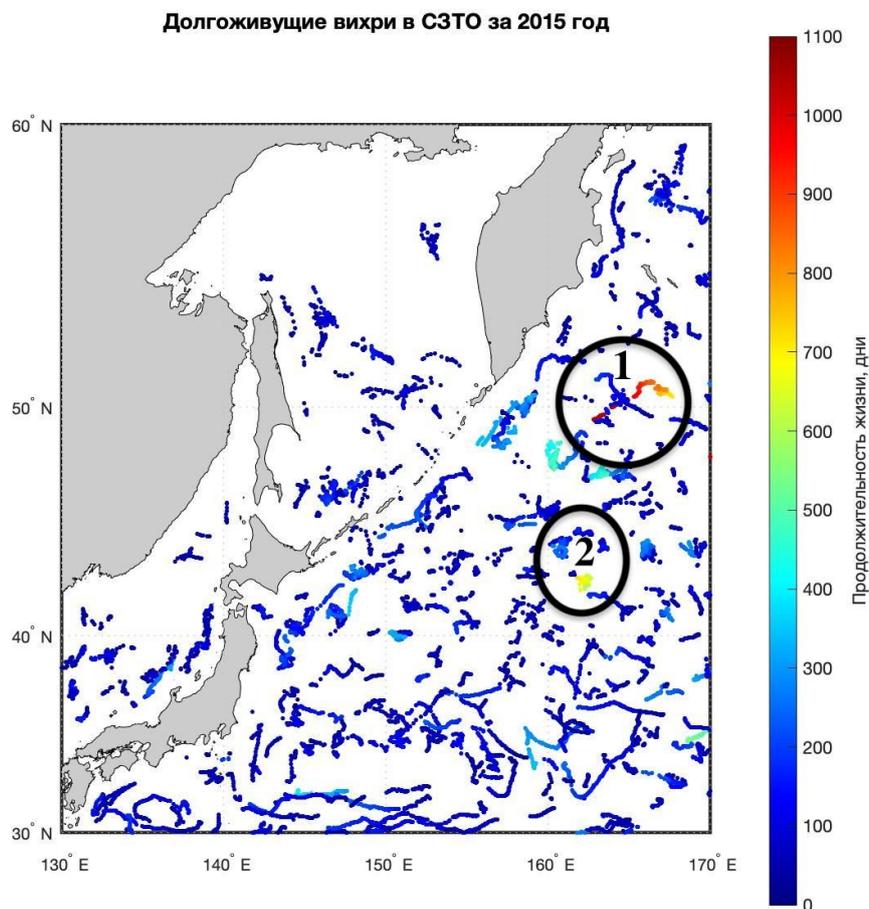


Рисунок 3. Траектории движения долгоживущих (время жизни более 35 суток) вихрей в исследуемом районе за 2015 год. Цветом показан временной период, прошедший с момента образования вихрей (дни). Черными кругами выделены области 1 и 2 с наиболее долгоживущими вихрями.

Для построения данного рисунка были отобраны долгоживущие вихри. В качестве критерия для их определения была взята одна из величин, содержащихся в массиве Челтона — количество дней, прошедшее с момента образования того вихря. В данном случае, нами были взяты вихри, с момента образования которых прошло более 35 суток. Данные вихри называются долгоживущими. В работах [Арашкевич, 2002; Микаэлян и др., 2002; Lévy, 2014], говорится о том, что именно в долгоживущих вихрях происходят изменения видовой структуры, а также биоразнообразия фито- и зоопланктона. Данные изменения могут происходить по одному или вместе. В конечном итоге, это влияет условия среды и биопродуктивности региона [Микаэлян и др., 2020]. Мезомасштабная динамика вод играет важную роль в создании первичной продукции в мировом океане [Field, 1998], а значит имеет колоссальное значение для рыболовной промышленности.

В Северо-западной части Тихого океана за весь 2015. При выполнении данной работы были построены карты горизонтального распределения скоростей на поверхности за период с октября по декабрь 2015 года. С нашей точки зрения, именно на примере данного временного отрезка можно наиболее четко проследить динамику мезомасштабных вихрей в исследуемом регионе.

Из рисунка 3 видно, что вихри с наибольшим временем жизни на момент измерений наблюдаются в северо-западной части района, вблизи полуострова Камчатка (район 1). Здесь наблюдаются вихри, с момента образования которых прошло более 1000 дней. В этом же районе, скорее всего, находится и самый долгоживущий за 2015 год вихрь (его время жизни составляет 1062 дня). Южнее также располагается область, где вихри имеют более продолжительный срок жизни по сравнению с окружающими (район 2). Здесь сроки жизни вихрей достигают 400-500 дней.

В ходе данной работы нами было проведено сравнение двух мезомасштабных вихрей противоположных знаков в рассматриваемом районе (рис. 1). В качестве рассмотренного периода было взято три месяца: с октября по декабрь 2015 года.

Антициклон расположен в зоне Курило-Камчатского желоба и движется вдоль него с юго-запада на северо-восток (рис. 1, 4— 9). Глубины желоба в районе прохождения составляют 6000-7000 метров.

Мезомасштабный циклон же движется в противоположном направлении, с северо-востока на юго-запад (рис. 1, 4 — 9). Глубины в зоне прохождения циклона составляют 3000-4000 метров.

Оба вихря двигаются восточнее холодного течения Ойясио вдоль Курильских островов.

Поперечный масштаб вихрей составляет  $2^\circ$  по долготе около, продольный — примерно  $0,5^\circ$  по широте (приблизительно 45-50 километров).

## 4.2 Орбитальные скорости на поверхности и питание

Мезомасштабные вихри представляют собой замкнутые круговороты вод, время существования более нескольких недель. Скорость перемещения мезомасштабных вихрей в пространстве меньше скорости вращения [Жмур, 2011; Chelton, 2011].

Стоит сказать, что мезомасштабные вихри могут образовывать дипольные и трипольные структуры. Дипольные структуры представляют собой систему, состоящую из циклонического и антициклонического вихрей, а трипольные структуры — главный мезомасштабный вихрь и два мелкомасштабных, циклонического и антициклонического характера. Трипольные структуры характерны для некоторых районов Мирового океана, таких, как, например, Лофотенская котловина Норвежского моря.

В некоторых случаях, триполи могут образовывать так называемые «грибовидные структуры», которые впервые были описаны в 1983 году Константином Николаевичем Федоровым. Это нестационарные образования. Существует 2 причины образования грибовидных структур. Первая причина заключается в резком воздействии ветра на поверхность, а вторая — в выбросе определенного объема вод из течений в спокойную воду [Жмур, 2011].

В Северо-западной части Тихого океана дипольных и трипольных структур нами обнаружено не было, поэтому было сделана попытка описать эволюцию монопольных [Жмур, 2011] мезомасштабных вихрей.

Орбитальные скорости на периферии мезомасштабных вихрей в поверхностном горизонте значительно выше, чем в их центре. Как правило, на периферии, скорости достигают значений 40 — 50 см/сек, тогда как в центре они едва доходят до 10 — 15 см/сек. Данные значения, как будет показано позднее, характерны для поверхностных горизонтов в зоне вихрей и имеют тенденцию к понижению с глубиной.

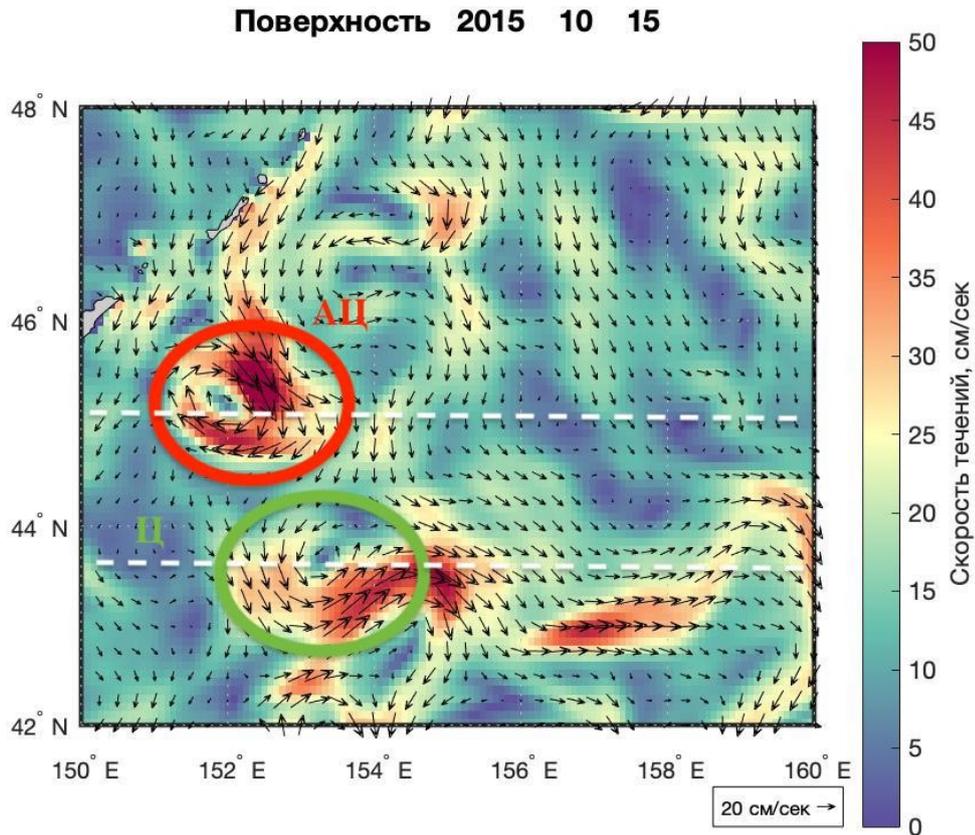


Рисунок 4. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 15 октября 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц. Пунктирными линиями — примерное расположение разрезов, построенных далее через вихри разных знаков.

В начале рассматриваемого периода, 15 октября 2015 года, мезомасштабные вихри обоих знаков достаточно хорошо прослеживаются в поле орбитальных скоростей.

В работе [Жмур, 2011] автор описывает также одну из классификаций океанических вихрей, согласно которой существуют вихри, образованные в результате разрушения крупномасштабных меандров. Из рисунка 4 видно, что мезомасштабный антициклон образован именно из такого меандра, отделившегося ранее от основной струи течения Ойясио.

15 октября высокие орбитальные скорости на периферии исследуемого антициклонического вихря образуют почти полностью замкнутую окружность, лишь немного уменьшаясь на западе до значений примерно 25 см/сек.

Мезомасштабный циклон имеет относительно большие скорости лишь в западной части. Далее, водные массы с большими скоростями поворачивают на 180° и выходят из круговорота. На севере

они приблизительно равны скоростям в центре, а в остальных частях приблизительно составляют 25 см/сек. Образуется циклон также из из меандров течения Ойясио, однако можно проследить его частичную связь с мезомасштабным антициклоном.

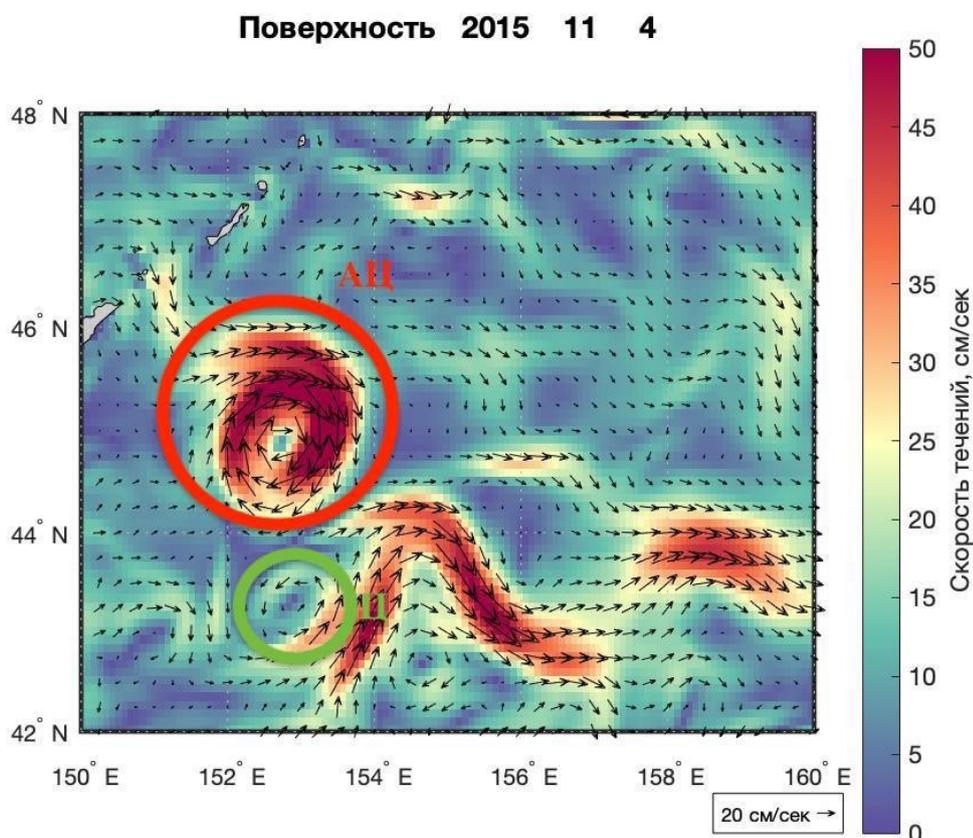


Рисунок 5. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 4 ноября 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

4 ноября 2015 в мезомасштабном антициклоне орбитальные скорости достигают наибольших значений (до 50 см/сек) на всей периферии, за исключением небольшого участка в его южной части, где значения скоростей все еще сохраняются на уровне 25 см/сек.

Циклонический вихрь, наоборот, характеризуется уменьшением орбитальных скоростей аналогично на всей периферии. Значения составляют 10-15 см/сек. На западе вихря наблюдается поток со скоростями, близкими к максимальным (до 50 см/сек), который затем, пройдя около 120 километров на северо-запад, совершает разворот на 180° и движется примерно столько же в обратном направлении, затем меняет направление на строго восточное.

## Поверхность 2015 11 11

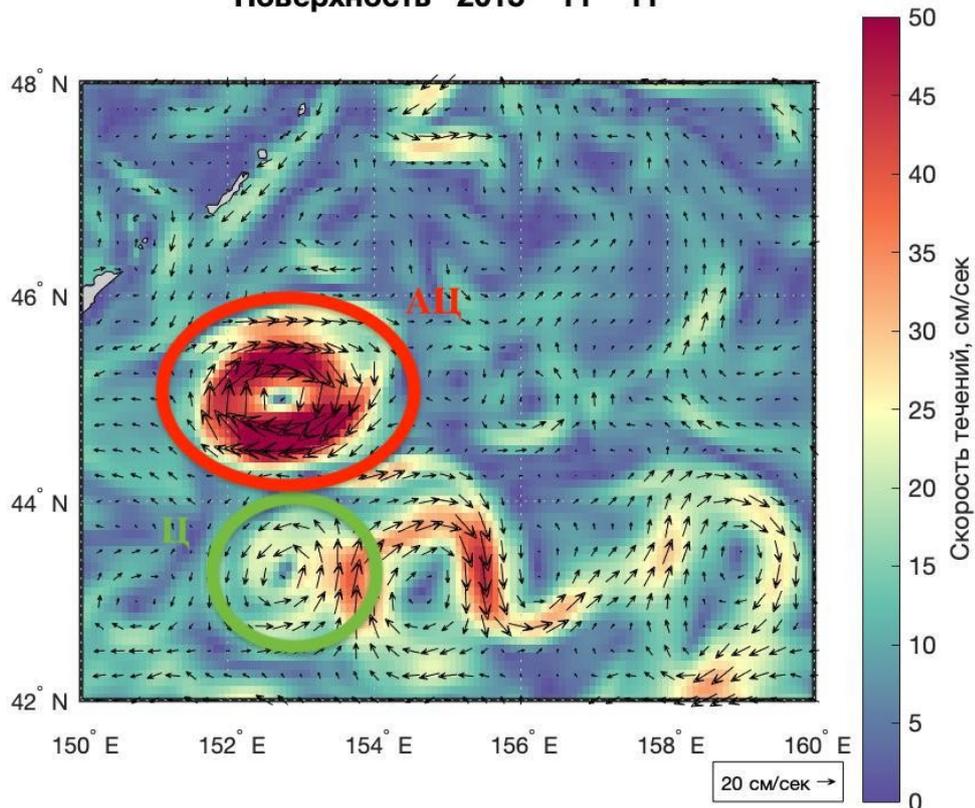


Рисунок 6. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 11 ноября 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

11 ноября ситуация, в целом, не меняется относительно описанной 4 ноября. В антициклоне все периферийные скорости выравниваются до максимальных значений (50 см/сек), описанная ранее область с относительно маленькими скоростями полностью исчезает. тем самым максимально отчетливо выделяя вихрь в поле скоростей.

В циклоне наблюдается небольшое увеличение орбитальных скоростей относительно 4 ноября. Значения достигают 25-30 см/сек, орбитальные скорости внутри потока до значений 35-40 см/сек. Далее, конфигурация описываемого поток сохраняет описанную ранее форму. После разворота на 180° орбитальные скорости вновь достигают значений, близких к максимальным (до 50 см/сек). Этот поток становится частью еще одного антициклона, который, однако, не рассматривается в нашей работе. Часть этого потока продолжает отделяться от данного циклона. Она, как и 4 ноября. Поворачивает строго на восток, но затем, в отличие от предыдущей рассмотренной даты, погибает на северо-восток.

### Поверхность 2015 11 25

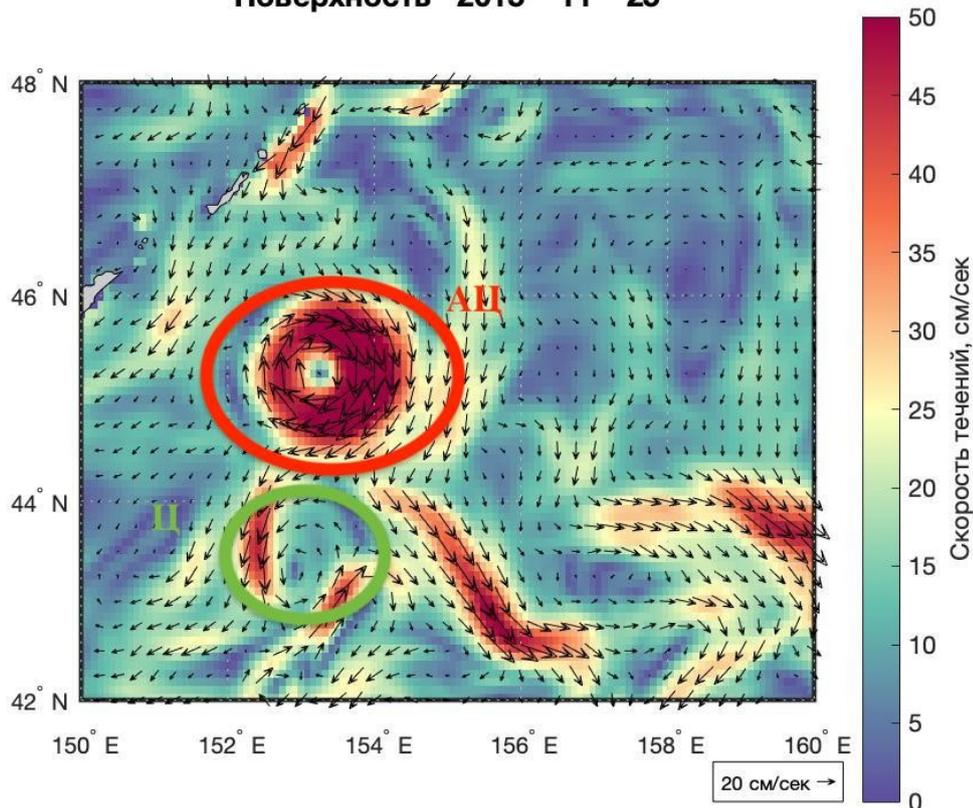


Рисунок 7. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 25 ноября 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

25 ноября 2015 года мезомасштабный антициклон полностью сохраняет свои характеристики в поле орбитальных скоростей относительно 11 ноября. На всей периферии вихря сохраняются максимальные значения орбитальных скоростей. Однако, стоит заметить, что западная часть периферии, которую характеризуют максимальные значения скоростей, становится более обширной.

Мезомасштабный циклон же характеризуется выделением на западной части периферии небольшой области с орбитальными скоростями, достигающими максимальных значений. На юго-востоке также наблюдается похожая область, которая, исходя из расположения и направления стрелок, показывающих направления и орбитальные скорости течений, не является как таковой частью рассматриваемого вихря, а лишь касается его. Скорости в нем составляют 40-45 см/сек.

### Поверхность 2015 12 6

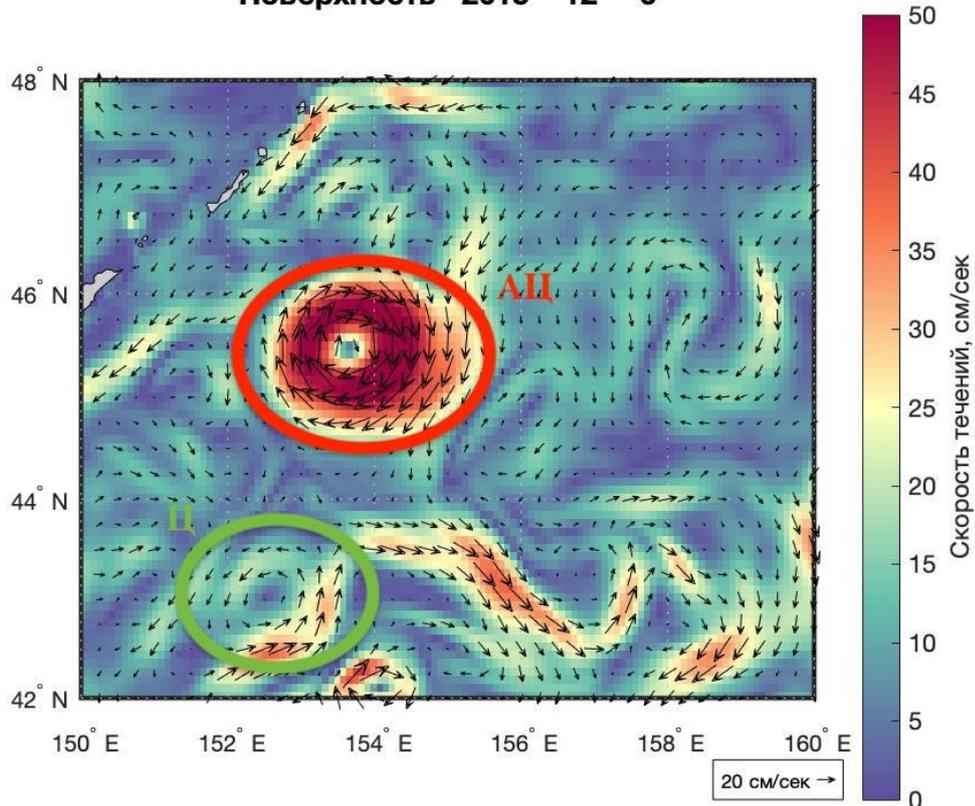


Рисунок 8. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 6 декабря 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

В начале декабря 2015 года, а именно 6 числа в мезомасштабном антициклоне происходят незначительные изменения. От увеличившейся ранее восточной части его периферии отделяется часть с более низкими значениями орбитальных скоростей (30-35 см/сек), тем самым, делая периферию вихря достаточно симметричной относительно его центра на всей окружности. Эта водная масса далее выходит из круговорота в виде меандра и направляется на юг района, теряя скорость (падает до 15-20 см/сек). В итоге, этот поток становится частью отделившегося от циклонического меандра. При их слиянии орбитальные скорости вновь возрастают до значений 30-35 см/сек.

В вихре циклонического характера наблюдается выравнивание значений орбитальных скоростей до относительно низких, а именно — до 10-15 см/сек. На юго-востоке вихря все еще сохраняется поток с более высокими скоростями, проходящий по касательной к круговороту. При этом, скорости в нем падают относительно описанных ранее и составляют теперь 30-35 см/сек.

Поверхность 2015 12 21

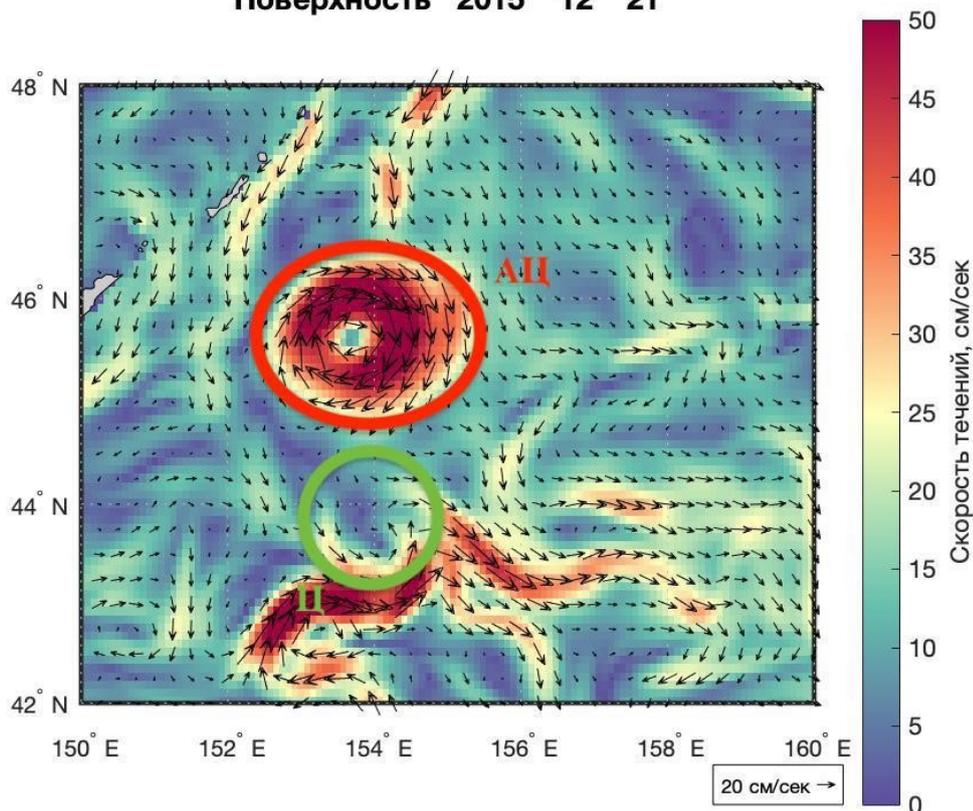


Рисунок 9. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей на поверхности в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 21 декабря 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

21 декабря в антициклоне мы вновь наблюдаем хорошо выраженную за счет близких к максимальным значений орбитальных скоростей на периферии вихревую структуру. Восточная часть этой структуры вновь заметно обширнее западной. При этом, наиболее вытянутая во внешнюю среду восточная часть полностью становится частью круговорота (исчезает движущийся на юг меандр, описанный выше). При этом, значения орбитальных скоростей в данной вытянутой части ниже, чем на остальной периферии антициклонического вихря. Они составляют 35-40 см/сек. Это позволяет считать периферию мезомасштабного антициклона все еще однородной в поле орбитальных скоростей (достигают 50 см/сек — максимальных значений).

Циклонический мезомасштабный вихрь сам по себе не изменился относительно предыдущей даты. Здесь стоит выделить, пожалуй, лишь увеличение орбитальных скоростей касательного к вихрю потока, описанного выше, теперь они достигают максимальных значений (50 см/сек). Стоит отметить также, что данный поток меняет свою конфигурацию. Теперь он проходит по касательной не только к юго-восточной, но также и к восточной части циклона.

### 4.3 Аномалии уровня (SSH)

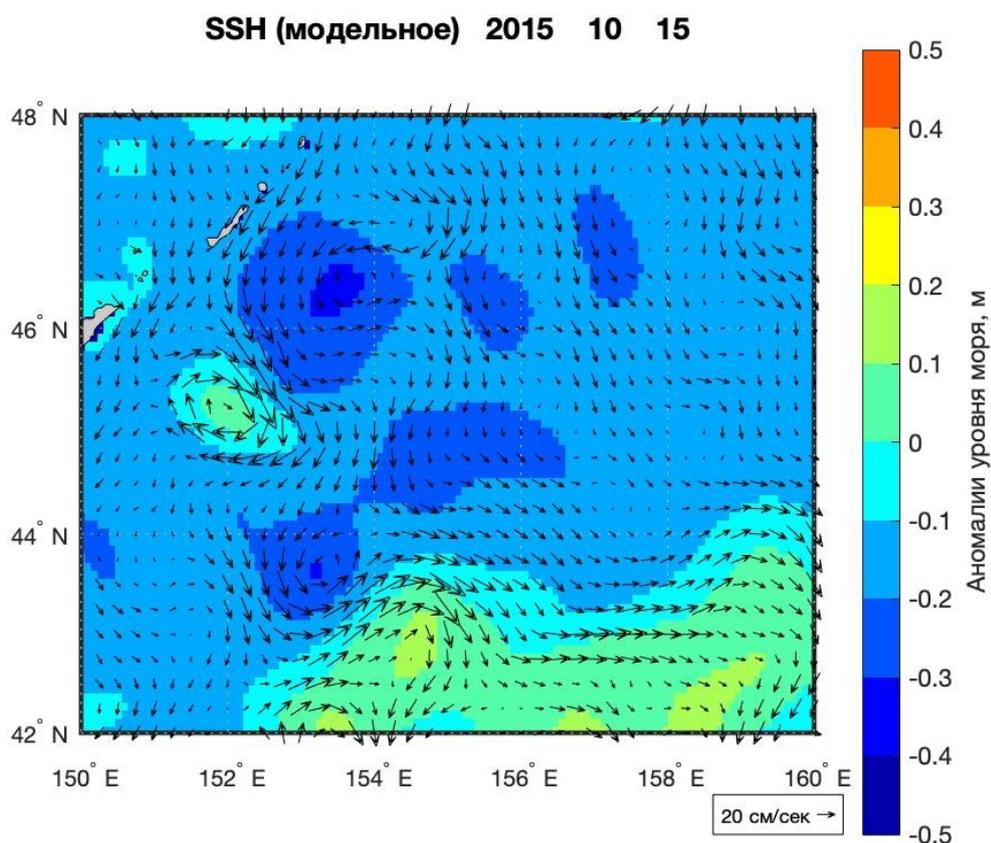


Рисунок 10. Аномалии уровня (SSH) в Северо-западной части Тихого океана: антициклона и циклона 15 декабря 2015 г. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

В поле аномалий уровня моря рассматриваемые мезомасштабные вихри также прослеживаются достаточно хорошо. Антициклон характеризуют небольшие отклонения высоты от некоторого условно заданного «нуля». При этом, в ядре данного вихря наблюдаются положительные значения (+0.1 м), а на периферии — отрицательные (-0.1 м). Что касается мезомасштабного циклона, то значения SSH здесь отрицательные. Выделяется небольшое ядро со значениями -0.3--0.4 м и периферия со значениями -0.2--0.3 м.

### 4.4 Разрезы через антициклон

Далее, рассмотрим разрез проведенный приблизительно через центр рассматриваемого мезомасштабного антициклона. На рисунке 11 представлено вертикальное распределение температуры за 15 октября 2015 года. Мы можем выделить ядро вихря, которое расположено

приблизительно на глубине 150 метров. Это сделать нам позволяет характерная для ядра форма изопикн.

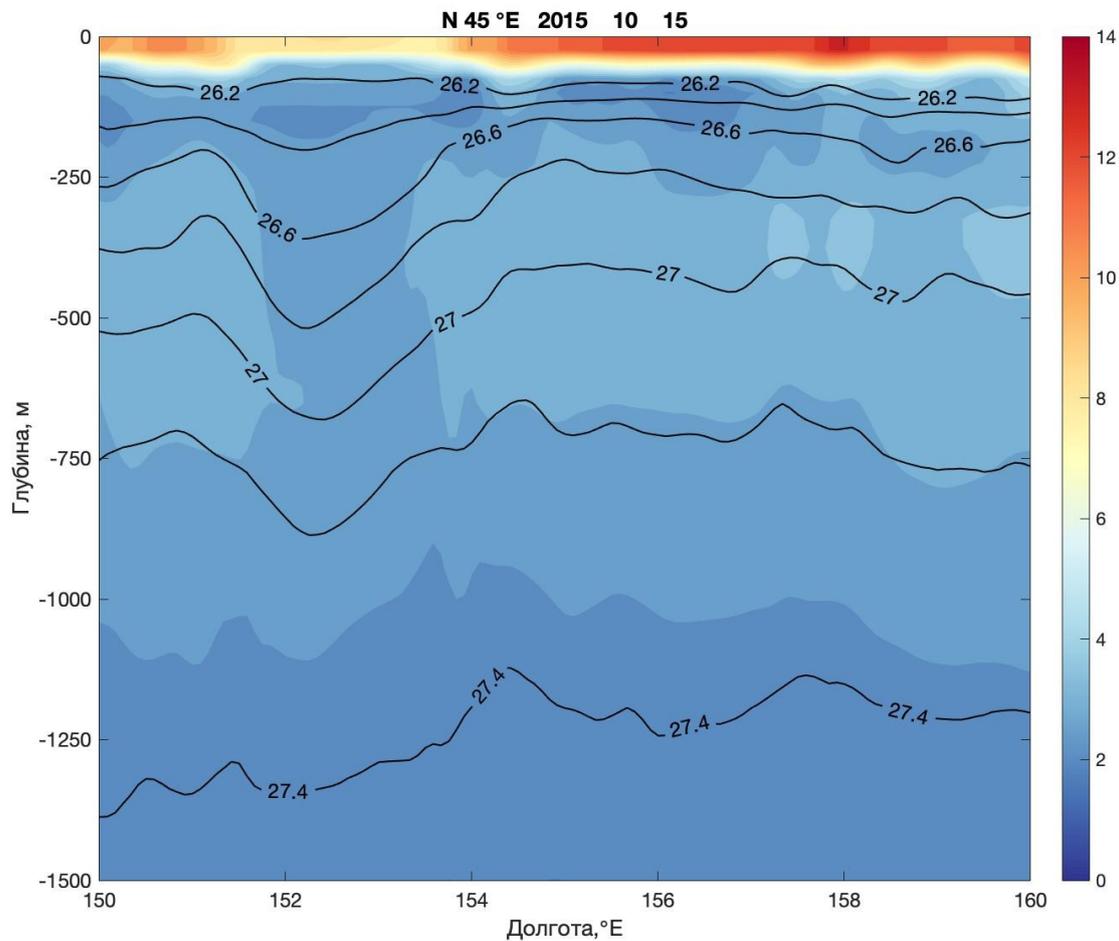


Рисунок 11. Разрез, показывающий вертикальное распределение температур, проведенный по 45 ° с.ш. (через мезомасштабный антициклон) 15 декабря 2015 г. Черными линиями обозначены изопикны.

Вихри антициклонического характера, обычно, характеризуются высокими, относительно окружающей среды температурами. Однако в нашем случае, антициклон холоднее окружающих вод. В статье [Пранц, 2021] авторы выделяют несколько разновидностей мезомасштабных антициклонов, характерных для Северо-западной части Тихого океана. Среди них так называемые Курильские вихри. В статье указано, что данные антициклонические вихри характеризуются холодными ядрами и образуются на океанической стороне Курильских островов. Нами сделано предположение, что рассматриваемый антициклонический вихрь относится к данной группе. Также, данная аномалия может быть объяснена описанной выше подпиткой данного вихря холодным течением Ойясио.

Холодные воды внутри мезомасштабного антициклонического вихря распространяются значительно глубже ядра до горизонта 1000 метров, где их температура сравнивается с температурой окружающей среды на данном горизонте. При этом, ядро вихря более холодное, чем периферия. Оно имеет температуру приблизительно 1°C, тогда как описанная ранее периферия — 3-4°C.

Форма изопикн свидетельствует о том, что динамический сигнал распространяется на все рассматриваемые горизонты ниже ядра. Они имеют вогнутый характер. Исключение составляет изопикна 26.2, которая образует характерную для ядра форму.

Также, в зоне действия мезомасштабного антициклона прослеживается охлаждение поверхностного перемешанного слоя относительно окружающей акватории.

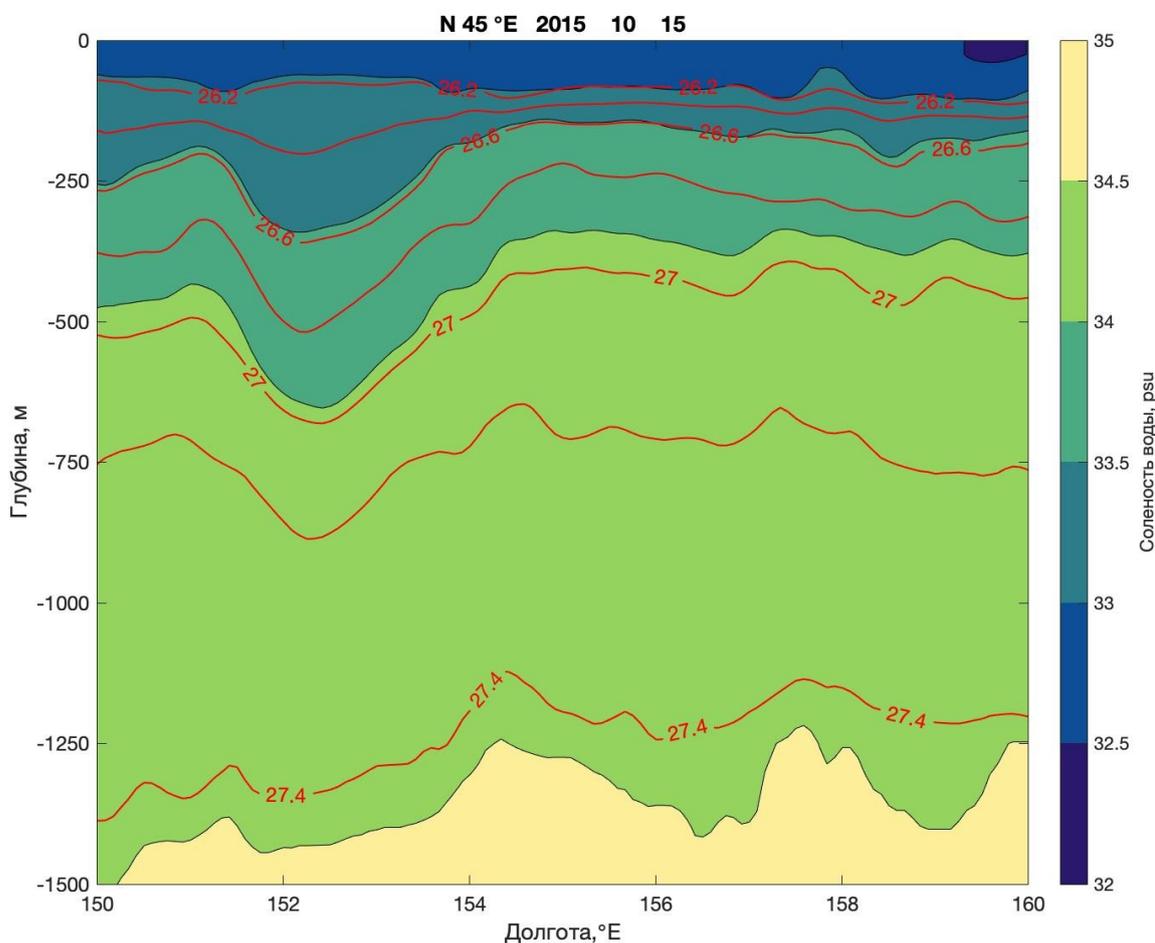


Рисунок 12 . Разрез, показывающий вертикальное распределение солёности, проведенный по 45 ° с.ш. (через мезомасштабный антициклон) 15 декабря 2015 г. Красными линиями обозначены изопикны.

Вертикальное распределение солёности показывает прогиб изогалин, соответствующих абсолютно всем значениям. В зоне мезомасштабного антициклона, соответствующие значения солёности проникают на более глубокие горизонты, чем в окружающих водах, то есть, в антициклоне на каждом горизонте солёность выше, чем в окружающих водах. При этом, стоит отметить, что форма изопикн достаточно точно повторяет форму изогалин внутри антициклона.

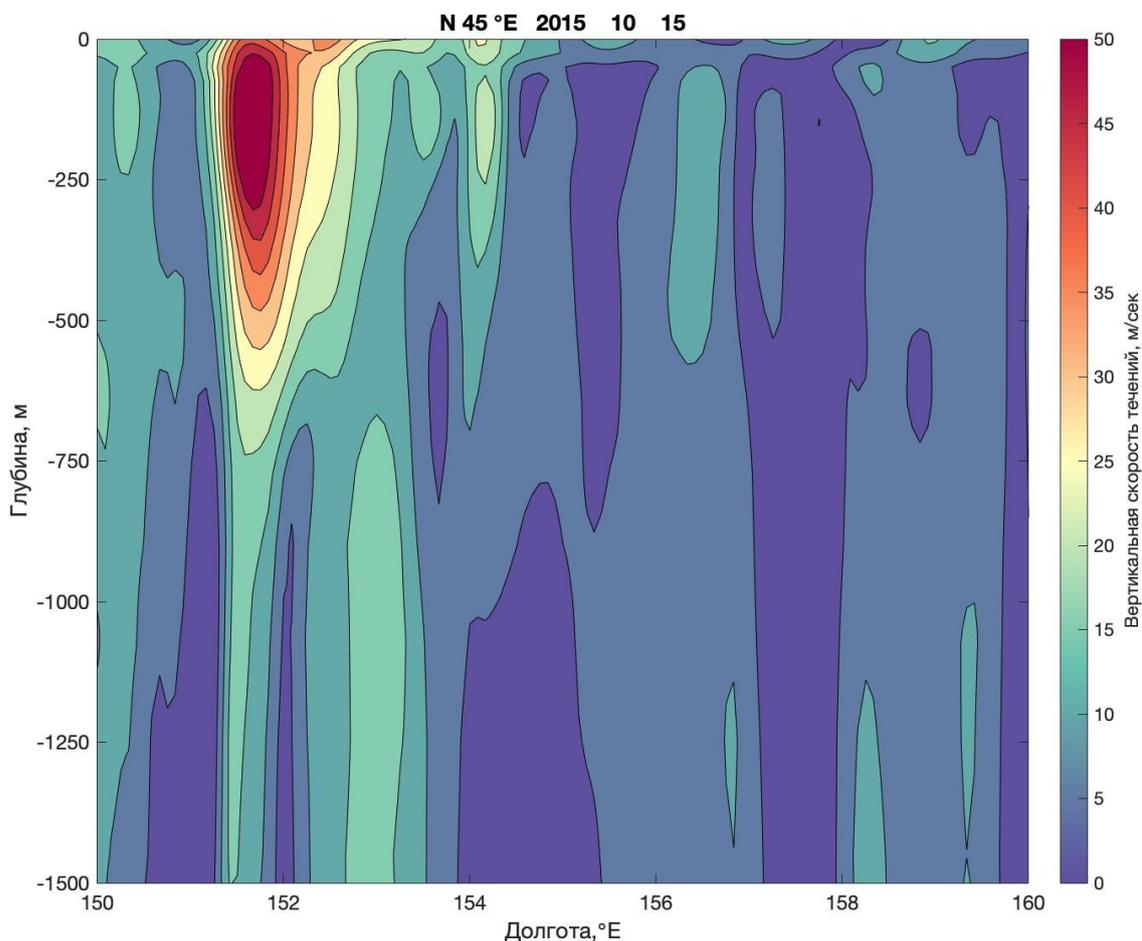


Рисунок 13. Разрез, показывающий вертикальное распределение вертикальных скоростей, проведенный по 45 ° с.ш. (через мезомасштабный антициклон) 15 декабря 2015 г.

Рассмотрим разрез по вертикальным скоростям. Наибольшие скорости в мезомасштабном антициклоне наблюдаются в ядре, где они достигают значений 50 сантиметров в секунду. Наблюдается тенденция к плавному уменьшению этих скоростей при движении от ядра к периферии. При этом, выше ядра высокие скорости сохраняются до самой поверхности, что подтверждает сделанные ранее выводы.

## 4.5 Разрезы через циклон

Далее, рассмотрим разрезы аналогичных характеристик проведенные через относительный центр мезомасштабного циклона.

Стоит отметить, что в попытке обнаружить ядро, разрезы были построены до горизонта 3500 метров, однако, характерной для ядра формы изопикн нами обнаружено не было. Исходя из можно сделать вывод о том, что динамический сигнал внутри циклона также распространяется на все рассмотренные горизонты.

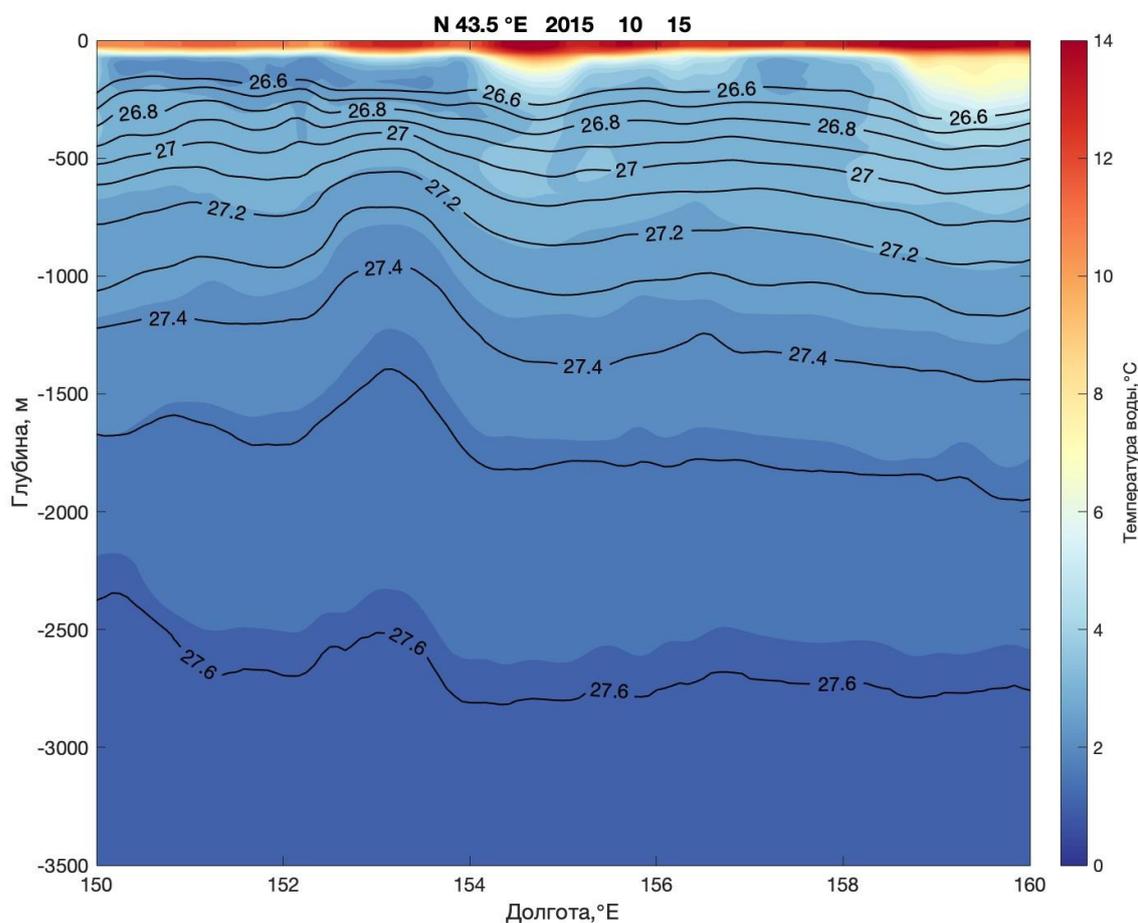


Рисунок 14. Разрез, показывающий вертикальное распределение температур, проведенный по 43,5° с.ш. (через мезомасштабный циклон) 15 декабря 2015 г. Черными линиями обозначены изопикны.

Стоит отметить, что в отличии от антициклона, циклон никак не влияет на температуру поверхностного перемешанного слоя. Под ним выделяется тонкий слой холодных вод, что может

быть проявлением так называемого холодного промежуточного слоя, характерного для исследуемого района.

При рассмотрении разреза, проходящего через мезомасштабный антициклон по температуре никаких аномалий нами обнаружено не было. Однако, можно выделить выпуклость всех изотерм в зоне действия циклона, то есть — более холодные воды ниже лежащих горизонтов поднимаются на меньшие глубины, чем в окружающей среде. Аналогичную тенденцию имеют и изопикны в зоне действия мезомасштабного циклона. Исключение составляют изопикны 26.6, 26.7, 26.8, имеющие вогнутый характер и соответствующие «холодному промежуточному слою».

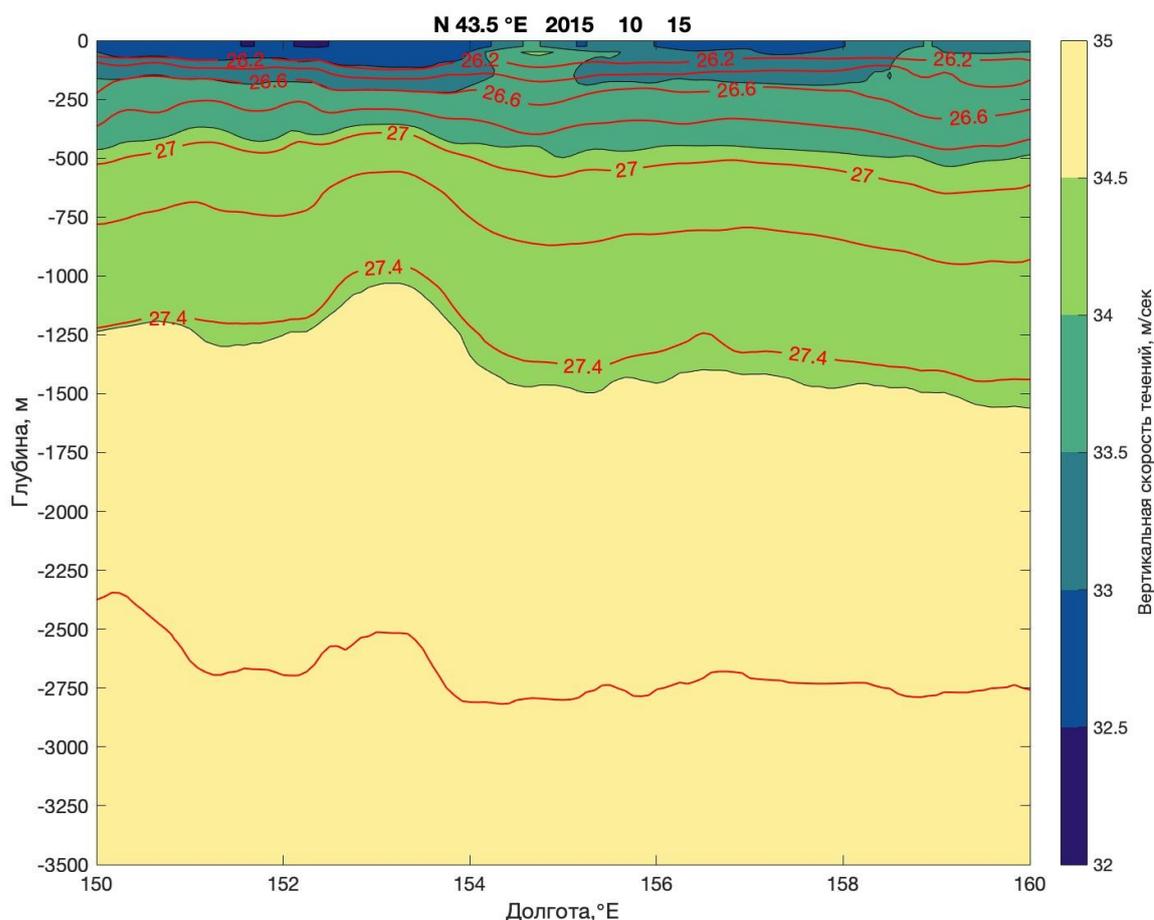


Рисунок 15. Разрез, показывающий вертикальное распределение солёности, проведенный по 43,5° с.ш. (через мезомасштабный циклон) 15 декабря 2015 г. Красными линиями обозначены изопикны.

Вертикальное распределение солёности в зоне действия мезомасштабного циклона, в целом, повторяет распределение температур. Мы также наблюдаем вогнутость изогалин в верхних слоях и их выпуклость в более глубоких, что также соответствует форме изопикн.

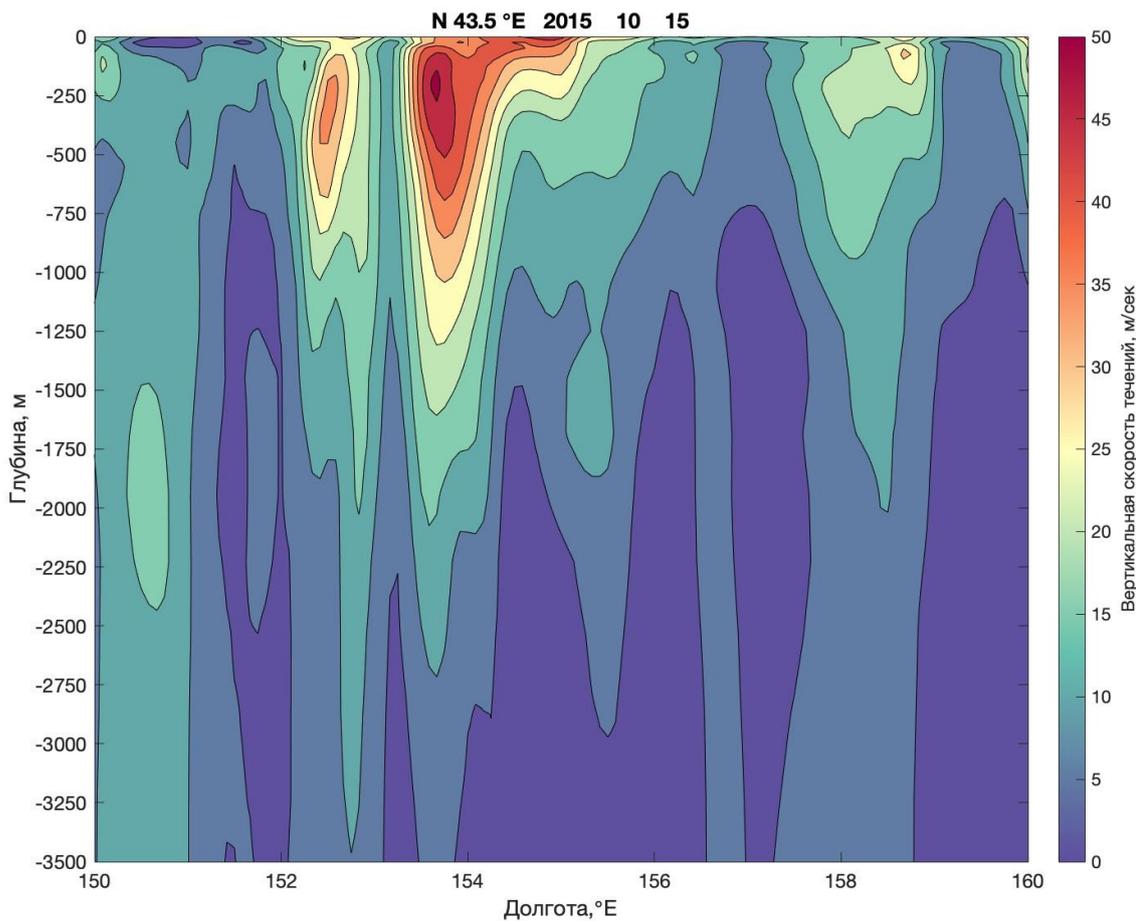


Рисунок 16 . Разрез, показывающий вертикальное распределение скорости, проведенный по 43,5 ° с.ш. (через мезомасштабный циклон) 15 декабря 2015 г.

В разрезе скоростей по вертикали в мезомасштабном антициклоне наблюдается две области с относительно высокими скоростями. Одна из них расположена на западе мезомасштабного циклона, а другая — на его востоке.

Западная область повышенных вертикальных скоростей, в отличие от восточной, характеризуется меньшим градиентом между максимальной скоростью в центре и окружающими водами. Наибольшие скорости в центре данной области располагаются на горизонтах 200-400 метров и достигают значений 30-35 метров в секунду. Центр восточной области расположен на аналогичных горизонтах, однако, скорости здесь достигают отметки 45-50 метров в секунду.

В обеих зонах наблюдается плавное понижение скоростей при движении от их центра к периферии. Также обе области выходят на поверхность, что подтверждается приведенные выше заключения.

## 4.6 Орбитальные скорости на глубине

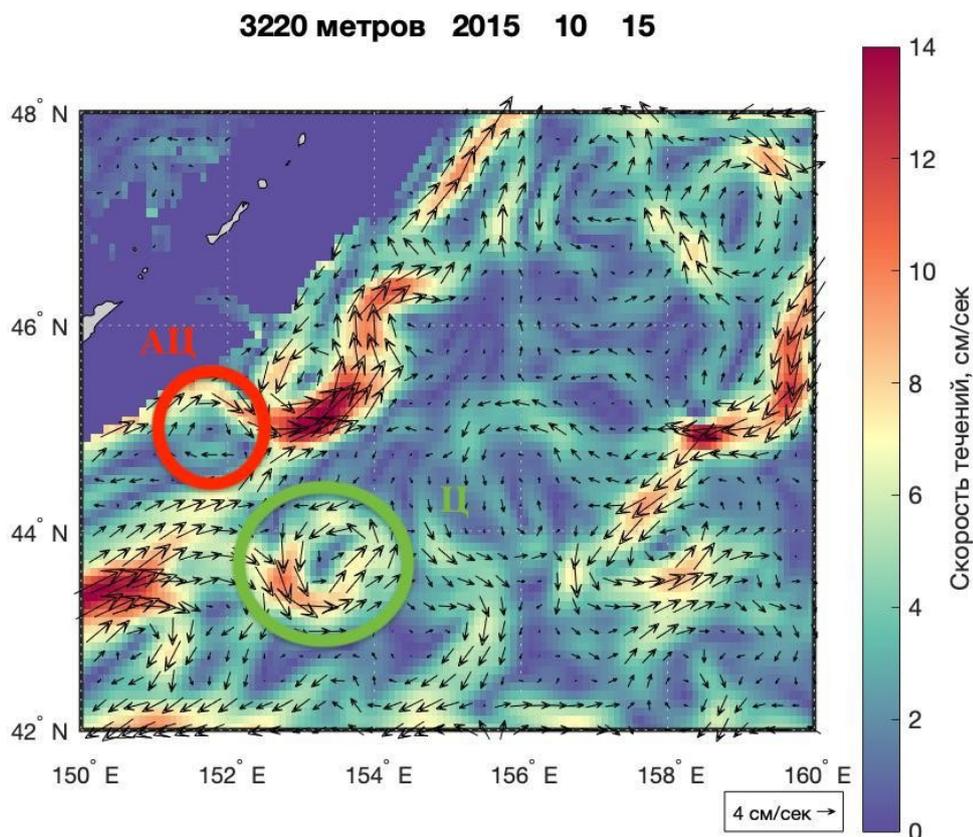


Рисунок 17. Орбитальные скорости мезомасштабных вихрей в Северо-западной части Тихого океана: антициклона (АЦ) и циклона (Ц) 4 ноября 2015 г. на горизонте 3220 метров. Стрелками обозначены направления и скорости движения частиц.

На данной карте представлены орбитальные скорости на горизонте 3220 метров. Данный горизонт является наиболее близким из доступных к горизонту 3500 метров, до которого были построены разрезы.

На данной глубине достаточно хорошо прослеживаются исследуемые мезомасштабные вихри обоих типов. Это подтверждает вывод о том, что динамический сигнал обоих случаях прослеживается на всю рассмотренную глубину. Однако, стоит сказать, что орбитальные скорости на данном горизонте значительно ниже, чем на поверхности.

## Основные выводы

- В Северо-западной части Тихого океана в поле скоростей наблюдаются мезомасштабные вихри различного характера: циклоны и антициклоны. В работе рассмотрено их влияние на основные гидрофизические поля на примере двух вихрей различного характера, наблюдаемых на протяжении 3 месяцев (с октября по декабрь 2015 года).
- Причиной образования мезомасштабных вихрей в регионе являются крупномасштабные меандры, отделившиеся от холодного течения Ойясио.
- Вихри различного характера движутся в противоположных направлениях: антициклон с юго-востока на северо-запад, а циклон с северо-запада на юго-восток. Данный характер движения вихрей в регионе был подтвержден в работе [Рогачев, Гогина, 2001].
- Внутри рассмотренных мезомасштабных вихрей наблюдаются относительно небольшие значения орбитальных скоростей (10-15 см/с), тогда как на перифериях — они значительно выше и достигают максимумов (40-50 см/с).
- Рассмотренные вихри оказывают влияние на вертикальное распределение температуры. Холодный антициклон, являющийся представителем группы так называемых Курильских вихрей, является причиной опускания холодных вод с температурой 3-4°C, характерных для холодного промежуточного слоя на достаточно большие глубины.
- Динамический сигнал в обоих вихрях располагается на всю доступную нам глубину, при этом, в поле изопикн в мезомасштабном антициклоне довольно отчетливо выделяется ядро на глубинах 150-200 метров, тогда как в циклоне его выделить не удалось.

## Список литературы

1. Авдейко Г. П., Попруженко С. В., Палуева А. А. Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Под ред. Б.В. Иванова. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 9-33.
2. Алексеев В.А., Иванов В.В., Репина И.А., Лаврова О.Ю., Станичный С.В. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго // Исследование Земли из космоса, 2016. No1–2, с. 90–91.
3. Арашкевич Е.Г. Распределение мезозoopланктона в связи с особенностями циркуляции в северо-восточной части Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М. : Наука, 2002. С. 257–272.
4. Ванин Н.С. Термическая структура вод в Северо-западной части Тихого океана // Изв. ТИНРО, 2017. Т. 190. С. 146-158.
5. Жмур В. В. Мезомасштабные вихри океана // М.: ГЕОС, 2011. – 190 с.
6. Иванов Ю.А., Корт В.Г., Монин А.С. О мезомасштабных неоднородностях океана // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286, С.706-709.
7. Истоки Ойясио. Монография под ред. В.Р.Фукса, А.Н.Мичурина. СПб. –1997. 248
8. Кубряков А. А., Станичный С. В. Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2015. Т. 55, No 1. С. 65–77
9. Латун В. С. Роль антициклонических круговоротов во внутрисезонной эволюции термохалинной структуры и геострофической циркуляции вод // Исследование и моделирование гидрофизических процессов в Черном море / [А. В. Алексеев и др.]; Под ред. С. П. Левикова. М.: Гидрометеиздат. Моск. отд-ние, 1989. Раздел 2.1. С. 40–49.
10. Микаэлян А. С. и др. Влияние мезомасштабной динамики на фитопланктонные сообщества Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М.: Наука, 2002. С. 248–257
11. Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор). // Морской гидрофизический журнал. 2020; No 36(6). С. 646-675.

12. Новоселова Е.В., Белоненко Т.В., Гневышев В.Г. Бароклинный радиус деформации Россби в Норвежском и Гренландском морях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 228–240. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-228-240.
13. Пранц С. В. Вихри глубоководных желобов Северо-Западной части Тихого океана (обзор). Известия РАН. // Физика атмосферы и океана. 2021; No 57(4). С. 387-400.
14. Рогачев К. А., Гогина Л. В. Вихри течения Ойясио // Природа. 2001; No 12 (1034). С. 36-42.
15. Рябчиков А. М. (ред.). Физическая география материков и океанов: Учебное пособие. // Высшая школа, 1988.
16. Филатов В. Н. Миграции и формирование скоплений массовых пелагических гидробионтов (на примере тихоокеанской сайры) // ЮНЦ РАН, 2015. 168 с. ISBN 978-5-4358-0114-9.
17. Broecker W.S., Peng T.-H. Tracers in the Sea // Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, NY, 1982. P. 35.
18. Chelton D. B., Schlax M. G., R. M. Samelson Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. Vol. 91. P. 167–216.
19. Field C. B. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components // Science. 1998. Vol. 281, iss. 5374. P. 237–240.
20. Korotaev G., Oguz T., Riser S. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. Vol. 53, iss. 17–19. P. 1901–1910.
21. Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 97. P. 80–91.
22. Kubryakov A. A. Thermohaline structure, transport and evolution of the Black Sea eddies from hydrological and satellite data // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 167. P. 44–63.
23. Lévy M. Phytoplankton diversity and community structure affected by oceanic dispersal and mesoscale turbulence / [et al.] // Limnology and Oceanography: Fluids and Environments. 2014. Vol. 4, iss. 1. P. 67–84.
24. Oguz T. Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during Hydro-Black '91 // Deep Sea Research Part I // Oceanographic Research Papers. 1994. Vol. 41, iss. 4. P. 603–628.
25. Oguz T. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1993. Vol. 40, iss. 8. P. 1597–1612.

26. Ono K., Ohshima K. I., Kono T., Itoh M., Katsumata K., Volkov Y. N., Wakatsuchi M. Water mass exchange and diapycnal mixing at Bussol' Strait revealed by water mass properties // *Journal of oceanography*. 2007. T. 63. №. 2. С. 281-291.
27. Reddy M. P. M. *Descriptive physical oceanography*. 2001.
28. Richards C., Straneo F. Observations of Water Mass Transformation and Eddies in the Lofoten Basin of the Nordic Seas // *Journal of Physical Oceanography*, 2015. Vol. 45. No. 6. P. 1735–1737.
29. Qiu B. Kuroshio and Oyashio currents. // *Academic Press*, 2001. С. 1413-1425.
30. Ueno H., Yasuda I. Distribution and formation of the mesothermal structure (temperature inversions) in the North Pacific subarctic region // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, Iss. C7. P. 16885–16897. DOI: 10.1029/2000JC900020.
31. Ueno H., Oka E., Suga T., Onishi H. Seasonal and interannual variability of temperature inversions in the subarctic North Pacific // *J. Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, Iss. 20. L20603. DOI: 10.1029/2005GL023948.
32. Zatsepin A. G. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.*, 2003. Vol.108, iss. C8. 3246
33. NOAA [Электронные ресурсы]: International Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.ngdc.noaa.gov/>).
34. CMEMS [Электронный ресурс]: Copernicus Marine Environment Monitoring Service ([https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS\\_PHY\\_001\\_030](https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030))