

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

УДК 551.468
Рег. № НИОКР 124111600017-2

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе

_____ С. В. Микушев
«_____» 202_____ г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АНАЛИЗ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОМЫСЛА РЫБ В НОРВЕЖСКОМ
МОРЕ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ
(промежуточный, этап 2)

Руководитель НИР:
профессор,
д-р геогр. наук

Т. В. Белоненко

Санкт-Петербург 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, профессор,
д.г.н.

Т. В. Белоненко
(введение, заключение,
раздел 1, 2)

Отв. исполнитель, ведущий
научный сотрудник, к.ф.-м.н.

М. В. Будянский
(раздел 1,2)

Исполнители:

Доцент, к.г.н.

И. Л. Башмачников
(раздел 1)

Доцент, к.г.н

П. В. Лобанова
(введение, раздел 3)

Младший научный сотрудник,
к.ф.-м.н

А. А. Дидов
(введение, раздел 1,4)

Старший научный сотрудник,
к.г.н

Н. В. Сандалюк
(введение, раздел 3)

Младший научный сотрудник,
к.г.н

Е. В. Новоселова
(введение, раздел 1,2)

Инженер-исследователь

М. А. Лебедева
(введение, раздел 2,4,5)

Инженер-исследователь

В.С. Травкин
(введение, раздел 1)

Нормоконтроль

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 124 с., 134 рис., 27 табл., 37 источн.

НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ, ПРОМЫСЕЛ, АТЛАНТИЧЕСКАЯ СКУМБРИЯ, ЛАГРАНЖЕВЫ ИНДИКАТОРЫ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Настоящая научно-исследовательская работа посвящена всестороннему анализу океанографических условий, влияющих на промысел рыб в Норвежском море, а также в Южно-Курильской промысловой зоне, с применением современных методов моделирования и анализа данных.

Основной целью работы является разработка и апробация методики статистического прогнозирования мест скоплений промысловых видов рыб, основанной на выявлении и анализе океанических фронтов и вихревых структур.

Методика анализа распределения значений гидрологических характеристик и их градиентов в местах промысла. Раздел 1 детально описывает разработанный алгоритм для анализа распределения атлантической скумбрии в Норвежском море. Изучается зависимость распределения этого вида от изменчивости океанологических условий, включая термохалинны (температура, соленость, плотность) и динамические (лагранжевы индикаторы, поля геострофических скоростей). Особое внимание уделено лагранжеву моделированию, использующему данные реанализа GLORYS12V1 и альтиметрии AVISO для расчета динамических характеристик. Подробно представлены используемые данные и методы расчета и анализа динамических и термохалинных фронтальных зон. Разработан статистический анализ с использованием гистограмм для выявления закономерностей в распределении промысловых скоплений относительно фронтальных структур. Процесс разработки и апробации объективной методики выделения фронтальных зон является центральным элементом данного этапа.

Верификация методики на примере японской скумбрии в Южно-Курильской промысловой зоне. В разделе 2 методика, разработанная для Норвежского моря, проходит проверку и адаптацию для другого региона и вида рыб. Описываются этапы исследования и решаемые задачи, связанные с анализом промысловых планшетов японской скумбрии. Проводится верификация океанографических реанализов, используемых в Южно-Курильской зоне. Детально излагается алгоритм анализа распределения гидрологических характеристик и их градиентов применительно к японской скумбрии, с использованием гистограмм для визуализации результатов. Представлена блок-схема алгоритма, наглядно

демонстрирующая последовательность действий. Анализируется пространственное распределение промысловых скоплений относительно фронтальных характеристик, а также распределения характеристик квазиоднородного слоя (MLD) в местах вылова и по всему промысловому району. Отдельное внимание уделяется градиенту лагранжевой характеристики S как индикатору динамических фронтов и особенностям гидрологических условий во фронтальных зонах.

Влияние параметров среды на фенологию весеннего «цветения» фитопланктона в Норвежском море. Раздел 3 посвящен исследованию влияния фенологии весеннего цветения фитопланктона на продуктивность и условия промысла. Подробно описан метод определения сроков весеннего «цветения» с использованием спутниковых данных. Проводится анализ спутниковых данных для морей Северо-Европейского бассейна, что позволяет оценить межгодовую изменчивость этого ключевого биологического процесса и его связь с абиотическими факторами.

Применение и сравнение методов идентификации фронтальных зон для анализа условий промысла рыб в Норвежском море. В разделе 4 проводится сравнительный анализ эффективности различных подходов к выделению фронтальных зон. Исследуются данные об уловах атлантической скумбрии и их пространственно-временное распределение. Детально рассматривается лагранжево моделирование по данным реанализа GLORYS12V1 и спутниковой альтиметрии, а также анализ градиентов динамических и термохалинных характеристик. Проводится сравнение основных промысловых зон в Норвежском море. Значительное внимание уделено исследованию фронтогенеза и сравнительной оценке продукта реанализа GLORYS12V1 и спутниковых данных MODIS. Результаты анализа карт эйлеровых и лагранжевых характеристик по GLORYS12V1 и AVISO используются для анализа фронтальных зон в районах российского промысла. В завершение исследуется связь гидрологического режима с изменениями количества динамических особых точек в промысловых районах Норвежского моря.

Данная работа носит фундаментальный характер, поскольку фокусируется на расширении теоретических знаний об океанографических процессах, их статистических характеристиках и закономерностях, лежащих в основе формирования среды обитания морских гидробионтов. Полученные результаты имеют важное значение для разработки инструментария мониторинга и прогнозирования в рыболовной науке, предоставляя объективные методы оценки океанографических условий, критически влияющих на распределение промысловых скоплений.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ГРАДИЕНТОВ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА АТЛАНТИЧЕСКОЙ СКУМБРИИ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ	11
1.1 Зависимость распределения атлантической скумбрии от изменчивости океанологических условий в районах промысла.....	11
1.2 Лагранжево моделирование	12
1.3 Используемые данные.....	14
1.4 Расчет и анализ динамических и термохалинных фронтальных зон	15
1.5 Статистический анализ (гистограммы).....	19
1.6 Разработка и апробация методики объективного выделения фронтальных зон	20
1.7 Публикации.....	23
2 МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ГРАДИЕНТОВ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА ЯПОНСКОЙ СКУМБРИИ В ЮЖНО-КУРИЛЬСКОЙ ПРОМЫСЛОВОЙ ЗОНЕ	24
2.1 Этапы исследования и решаемые задачи	24
2.2 Верификация океанографических реанализов	28
2.3 Разработка алгоритма анализа распределения значений гидрологических характеристик и их градиентов японской скумбрии в местах промысла и во фронтальных зонах	34
2.4 Гистограммы.....	36
2.5 Представление алгоритма в виде блок-схемы.....	49
2.6 Пространственное распределение промысловых скоплений относительно фронтальных характеристик.....	51
2.7. Анализ распределений по подстилающим значениям квазиоднородного слоя (Mixed Layer Depth, MLD) под пунктами вылова и под узлами исходной сетки поля характеристики для всей зоны промысла	53

2.8. Градиент лагранжевой характеристики S – динамические фронты.....	54
2.9. Особенности гидрологических условий во фронтальных зонах	55
2.10. Публикации.....	59
3 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА ФЕНОЛОГИЮ ВЕСЕННЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ	60
3.1 Влияние фенологии весеннего цветения фитопланктона на продуктивность и условия промысла.....	60
3.2 Метод определения сроков весеннего «цветения»	65
3.3. Анализ спутниковых данных для морей северо-европейского бассейна.....	67
3.4. Публикации.....	76
4 ПРИМЕНЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФРONTALЬНЫХ ЗОН ДЛЯ АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ПРОМЫСЛА РЫБ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ.....	77
4.1. Данные об уловах атлантической скумбрии и их анализ	77
4.2. Лагранжево моделирование по данным реанализа GLORYS12V1 и спутниковой альtimетрии.....	84
4.3. Градиенты динамических и термохалинных характеристик	84
4.4. Сравнение основных промысловых зон в Норвежском море.....	89
4.5. Исследование фронтогенеза в Норвежском море.....	92
4.6. Сравнительная оценка продукта реанализа GLORYS12V1 и спутниковых данных MODIS	97
4.7. Карты эйлеровых и лагранжевых характеристик по GLORYS12V1 и AVISO.....	99
4.8. Анализ фронтальных зон в районах российского промысла рыб в Норвежском море	103

4.9. Связь гидрологического режима с изменениями количества динамических особых точек в промысловых районах Норвежского моря.....	106
5. ОТРАЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГРАНТУ СПБГУ В СРЕДСТВАХ МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	122

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к исследованию процессов, определяющих пространственно-временную изменчивость океанической циркуляции и связанных с ней биологических и промысловых явлений. Особое значение эти исследования приобретают для районов с высокой биопродуктивностью и экономической значимостью, к числу которых относится Норвежское море. Данная акватория является ключевым элементом Северо-Атлантической системы течений и одновременно одним из наиболее продуктивных районов Мирового океана. Здесь формируются благоприятные гидрофизические и трофические условия для существования многочисленных популяций промысловых видов, включая атлантическую скумбрию (*Scomber scombrus*), сельдь и ставриду.

Современные климатические изменения и усиление межгодовой изменчивости гидрофизических полей оказывают существенное влияние на распределение и миграции промысловых объектов. Это приводит к смещению традиционных районов промысла, изменению сроков миграций и, как следствие, к необходимости переоценки океанографических условий, определяющих динамику биоресурсов. В этих условиях требуется переход от описательного анализа к прогностическим моделям, способным количественно оценивать динамику океанических процессов и их воздействие на формирование промысловых скоплений.

Одним из наиболее информативных инструментов для изучения транспортных процессов в океане является лагранжев подход, основанный на отслеживании движения пассивных частиц (маркеров), движущихся в потоке в соответствии с полями скоростей течений. В отличие от традиционных эйлеровых методов, которые описывают структуру течений в фиксированных точках пространства, лагранжев анализ позволяет исследовать реальные траектории движения водных масс и оценивать характер их перемешивания, задержки и обмена между различными областями. Именно этот подход в последние годы получил широкое распространение в физической океанографии и активно используется для изучения процессов переноса тепла, солей, биогенных элементов, загрязняющих веществ, а также для анализа пространственной структуры промысловых зон.

В Норвежском море лагранжев анализ открывает новые возможности для интерпретации наблюдаемых закономерностей распределения промысловых объектов. Этот регион характеризуется сложной системой взаимодействующих течений, фронтальных зон и мезомасштабных вихрей, которые оказывают решающее влияние на

пространственную структуру гидрофизических полей и продуктивность экосистемы. Крупнейшие элементы циркуляции — Норвежское, Исландское и Фареро-Шетландское течения — формируют динамические фронты, вдоль которых концентрируются питательные вещества, планктон и рыба. При этом мезомасштабные вихревые структуры обеспечивают как удержание, так и горизонтальный перенос биогенного и биологического вещества, выступая в роли транспортных механизмов и своеобразных «инкубаторов» морской биоты.

Несмотря на большое количество исследований по гидрофизике Норвежского моря, вопрос о роли мезо- и субмезомасштабной динамики в формировании промысловых скоплений до сих пор остаётся недостаточно изученным. В традиционных подходах, основанных на анализе усреднённых полей температуры и скорости, невозможно выявить реальные пути движения водных масс и оценить влияние временно возникающих структур, таких как вихри, меандры и фронтальные волны. В этой связи использование лагранжевых методов, позволяющих реконструировать динамические границы, выявлять устойчивые и неустойчивые области потока, а также оценивать времена удержания и пути переноса, представляет собой качественно новый этап в исследовании промысловых процессов.

Цель настоящей работы заключается в анализе океанографических условий формирования промысловых скоплений рыб в Норвежском море с использованием лагранжевых методов моделирования. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

Сбор и систематизация спутниковых и модельных данных о температуре поверхности моря, высоте уровня моря и полях скоростей течений.

Расчёт лагранжевых характеристик (длины траекторий, времени удержания, числа оборотов и показателей Ляпунова) для анализа динамической структуры циркуляции.

Выделение мезомасштабных вихревых структур и фронтальных зон, потенциально связанных с повышенной биопродуктивностью.

Сопоставление выявленных динамических структур с фактическими районами промысла атлантической скумбрии на основе данных о распределении вылова.

Разработка методики интеграции лагранжевых индикаторов с результатами спутникового и гидрологического мониторинга для последующего использования в задачах оперативного анализа и прогнозирования промысловых условий.

Методологическая основа исследования включает использование данных спутниковой альtimетрии (AVISO), спутниковых наблюдений температуры поверхности моря (MODIS, VIIRS), а также данных океанографического реанализа GLORYS12V1. Для расчёта лагранжевых характеристик применялись численные модели, основанные на решении уравнений адвекции, позволяющих реконструировать траектории движения пассивных частиц на основе заданных полей скоростей. При обработке данных использовались современные методы геостатистического и пространственного анализа, включая построение композитных карт и многолетних распределений лагранжевых параметров.

Актуальность проведённого исследования определяется как его фундаментальной, так и прикладной значимостью. С одной стороны, работа способствует развитию теории океанических транспортных процессов и уточнению роли мезомасштабной динамики в формировании продуктивных зон. С другой — полученные результаты имеют прямое практическое значение для рыбохозяйственного прогнозирования, планирования морских экспедиций и оптимизации промысловой деятельности в северо-восточной части Атлантики.

В рамках проекта впервые для Норвежского моря выполнено комплексное сопоставление динамических структур циркуляции, выявленных лагранжевыми методами, с пространственно-временным распределением промысловой активности. Это позволило установить тесную связь между положением фронтальных зон и областями повышенного вылова, а также выделить ключевые динамические механизмы, определяющие концентрацию промысловых объектов.

Таким образом, проведённое исследование представляет собой важный шаг в направлении интеграции лагранжевых методов анализа в практику океанологических и промысловых исследований. Разработанные подходы создают основу для построения системы оперативного мониторинга и краткосрочного прогнозирования зон концентрации гидробионтов, что имеет существенное значение для рационального использования биологических ресурсов Мирового океана и обеспечения экологической безопасности прибрежных регионов Российской Федерации.

1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ГРАДИЕНТОВ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА АТЛАНТИЧЕСКОЙ СКУМБРИИ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

1.1. Зависимость распределения атлантической скумбрии от изменчивости океанологических условий в районах промысла

В данной работе проводится исследование статистических взаимосвязей между распределением промысловых скоплений атлантической скумбрии, определяемых постфактум по локализации зон промысла, и изменчивостью гидрофизических процессов, с целью разработки методики статистического прогнозирования уловов в Норвежском море. Основная цель работы – создание рабочего инструмента для предсказания мест скоплений атлантической скумбрии в Норвежском море, динамика которой недостаточно полно изучена. Также ставится задача выявления набора экологических переменных, влияющих на формирование этих скоплений. Выявленные статистические зависимости могут в дальнейшем способствовать более глубокому пониманию динамики атлантической скумбрии в ответ на физические факторы окружающей среды. Исследование охватывает район в северной части Норвежского моря, где ведется российский промысел атлантической скумбрии (рис. 1.1).

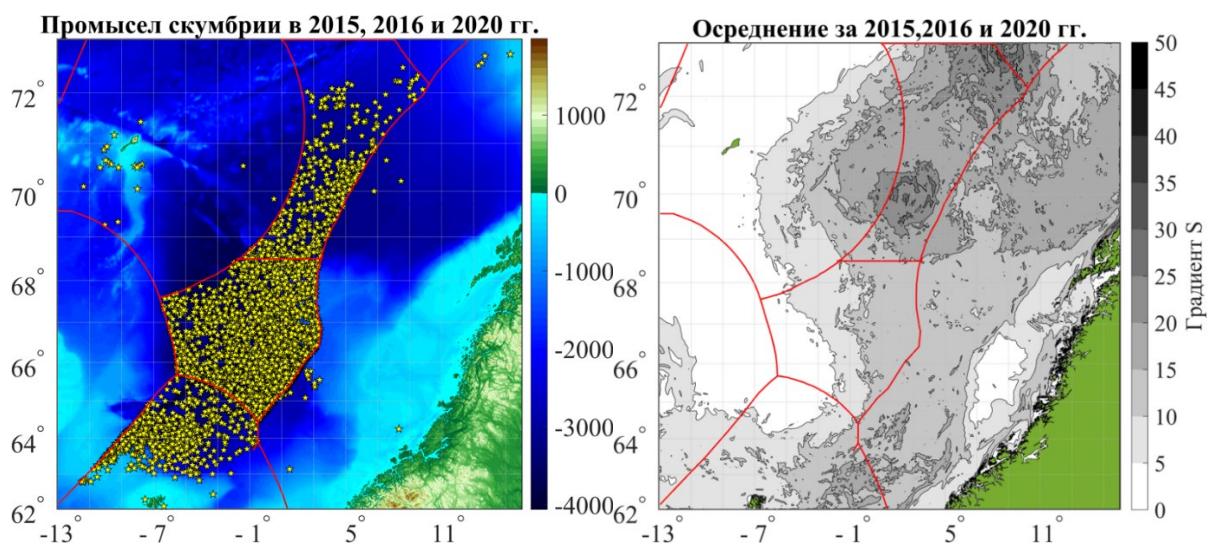


Рисунок 1.1 – а) – Район российского промысла атлантической скумбрии в Норвежском море. Красными линиями обозначены границы отдельных промысловых зон. Звездочками обозначены места промысла атлантической скумбрии в путины 2015, 2016 и 2020 гг. Цветом показана донная топография; б) – Пространственное распределение градиентов лагранжева индикатора S (км/км). I и II – северная и южная части ОЧНМ, III – Фарерская промысловая зона

1.2 Лагранжево моделирование

Для реализации лагранжева метода большое количество искусственных (виртуальных) частиц (маркеров) помещается в исследуемую область на поверхности и далее решаются уравнения адвекции, позволяющие отследить их траектории:

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t), \quad \frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где u и v – угловые зональная и меридиональная компоненты скорости течений, φ и λ – широта и долгота. Угловые скорости используются потому, что уравнения для них имеют максимально простую форму на земной сфере. Для получения точных численных результатов используется бикубическая пространственная интерполяция и сглаживание временной эволюции с помощью полиномов Лагранжа третьего порядка. Лагранжевы траектории вычисляются путем интегрирования уравнений (1) по схеме Рунге-Кутта четвертого порядка с постоянным шагом по времени 0.001 дня.

Анализ выполняется с использованием картирования в географических координатах двух лагранжевых индикаторов: показателя Ляпунова, накопленного за конечное время (Finite Time Lyapunov Exponent (FTLE) – Λ -карта), и длины траекторий в определенном интервале времени (S-карта). Перспективы использования лагранжевых подходов для обнаружения потенциальных мест нагула и промысла пелагических рыб и кальмаров рассмотрены в статье (Prants, 2024), в которой показано, что FTLE, как и карты длин траекторий S, содержат накопленную информацию об “истории” вод, вовлеченных в вихревое движение. Это принципиально отличает их от таких эйлеровых характеристик, как, например, распределения океанологических параметров среды, которые содержат полезную информацию, но фактически являются “мгновенными” снимками на текущий момент времени (Новоселова и др., 2024). Поэтому на лагранжевых картах можно увидеть фронты и вихри гораздо более четко, чем на картах эйлеровых величин (Prants et al., 2013, 2015; Fayman et al., 2019). Преимущество лагранжевых подходов также заключается в том, что они позволяют “персонифицировать” пассивные маркеры, изучить их траектории во времени и тем самым визуализировать их движение во фронтальных зонах и мезомасштабных вихрях.

1.3 Используемые данные

Для анализа циркуляции в исследуемом регионе использовались геострофические скорости, полученные на основе данных спутниковой альtimетрии. Эти данные предоставляются сервисом Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS,

<http://marine.copernicus.eu/>) в виде объединенного продукта, агрегирующего измерения с различных альтиметрических миссий за период с 1993 года по настоящее время. Объединение разнородных данных осуществляется с использованием метода оптимальной интерполяции, что обеспечивает создание высококачественного и постоянно обновляемого набора данных. Пространственное разрешение данных составляет $1/4^\circ$ широты и долготы, временное – 1 сутки. Такой подход позволяет получить всеобъемлющее и актуальное описание геострофических скоростей, способствуя более точному анализу динамических процессов в океанографических исследованиях.

Для получения трехмерных полей температуры и солености на 50 вертикальных горизонтах использовались данные реанализа GLORYS12V1. Этот продукт формируется на основе глобальной системы прогнозирования в реальном времени, функционирующей на базе океанической модели NEMO и интегрирующей входные данные от ECMWF ERA-Interim. GLORYS12V1 ассимилирует широкий спектр наблюдательных данных, включая спутниковые измерения с миссий Topex/Poseidon, Jason-1, 2, MODIS Terra/Aqua и AVHRR NOAA, а также судовые измерения, данные с метеографных постов и дрейфующих буев (включая данные ARGO), прочие *in situ* наблюдения и результаты океанографических исследований. Включение наблюдательных данных в модель NEMO реализовано с использованием фильтра Калмана низкого порядка. Продукт GLORYS12V1 способен точно воспроизводить сложную динамику поверхности в мезомасштабном диапазоне и демонстрирует высокое соответствие с независимыми данными, не участвовавшими в процессе ассимиляции. Его надежность делает его ценным инструментом для изучения различных аспектов океанических процессов и облегчает такие приложения, как краткосрочные прогнозы. Пространственное разрешение данных составляет $1/12^\circ$ широты и долготы, временное – 1 сутки.

Статистический анализ приуроченности промысловых скоплений атлантической скумбрии проводился на основе промысловых планшетов за путину 2015, 2016 и 2020 годов. Эти данные используются для определения пространственно-временного распределения промысловой активности в районах исследования.

1.4 Расчет и анализ динамических и термохалинных фронтальных зон

Районы российского промысла атлантической скумбрии расположены в Норвежском море (рис. 1.1а). Основной промысел в Норвежском море ведется в трех промысловых зонах: I и II ОЧНМ (Открытая Часть Норвежского Моря), и III – в Фарерской зоне. Как видно на рис. 2.1а, область промысла I – III значительно вытянута в

меридиональном направлении, а на рисунке 1.2b, на котором представлена карта градиентов лагранжева индикатора S , видно, что район промысла сильно различается по интенсивности динамических условий. Показатель S характеризует длину траекторий, которые проходят лагранжевы частицы за определенный интервал времени: рассматриваемая область каждые сутки в период путин (июнь – ноябрь) 2015, 2016 и 2020 гг. засевалась большим количеством лагранжевых частиц и рассчитывались их траектории по уравнениям адвекции (1) с обратным отсчетом времени за определенный период. В исследовании область засевалась 500×500 лагранжевых частиц и рассчитывались длины их траекторий в километрах за последние 15 суток.

В соответствии с целями исследования, особый интерес представляет анализ градиента лагранжева индикатора S , который позволяет выявлять океанические фронты, фронтальные зоны и границы мезомасштабных вихрей. Поскольку фронты и границы вихрей подвержены временным изменениям в своём положении, мы усреднили значения градиента по всем пространственным распределениям, полученным за исследуемые периоды. Это позволило провести районирование промысловой области по динамическим условиям. Результаты, представленные на рис. 1.1b, демонстрируют высокую динамическую неоднородность района промысла атлантической скумбрии. Это указывает на невозможность однородной оценки динамических условий и применения одинаковых градиентов параметров для всего региона одновременно. В рамках исследования был выбран район I (рис. 1.1b), расположенный севернее 68.5° с.ш. Мы проанализировали расположение мест промысла атлантической скумбрии в контексте распределений градиентов гидрофизических параметров.

В выбранном районе наблюдается квазипостоянный Лофотенский антициклон (Volkov et al., 2013, 2015; Belonenko et al., 2021; Yu et al., 2017). Области с повышенными значениями градиента лагранжева индикатора S , рассчитанными методом осреднения, указывают на четкую ассоциацию Лофотенского антициклона с определенной зоной. В то же время струи Норвежского течения демонстрируют существенно более низкие значения градиента S , что свидетельствует о значительной пространственно-временной изменчивости этих потоков.

На рисунке 1.2 на определенную дату показаны оценки скоростей течений на поверхности по данным AVISO и GLORYS12V1, а также градиенты S и градиенты термохалинных характеристик на определенную дату по данным GLORYS12V1. Первое, что следует отметить, это то, что расположение фронтальных зон рассматриваемых четырех характеристик различаются на картах. Рассмотрим их более детально. Видно, что

места промысла на рисунке 1.2б расположены в непосредственной близости от максимальных значений градиентов S . Точки, характеризующие места промысла, вытянуты вдоль изолиний, характеризующих фронтальные зоны – следует обратить внимание на группы точек, расположенные поблизости центров с координатами 72° с.ш. и 10° в.д., а также 70° с.ш. и 4° в.д. Для температуры (рис. 1.2е) и особенно для плотности (рис. 1.2с) также наблюдается приуроченность мест промысла к фронтальным зонам. В меньшей степени данная приуроченность наблюдается для солености, хотя в южной части рассматриваемого района с центром 69° с.ш. и 2° в.д. группа точек, характеризующих места промысла, расположены на непосредственно во фронтальной зоне (рис. 1.2ф).

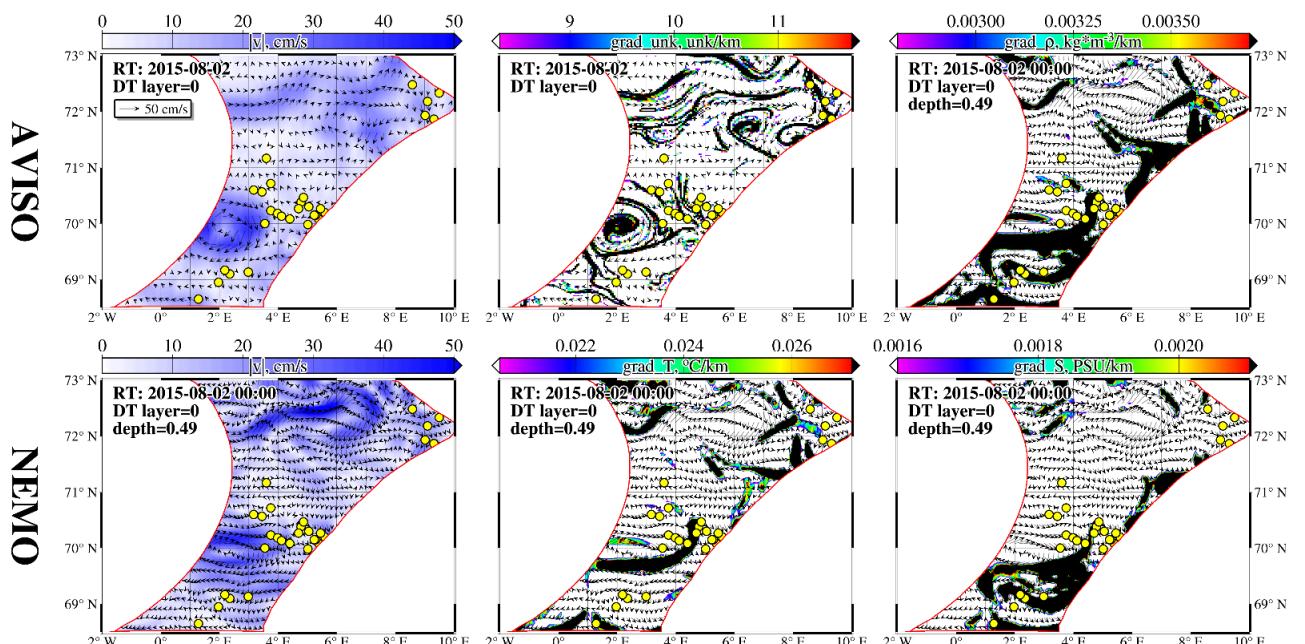


Рисунок 1.2 – Скорости течений в районе исследования по данным AVISO (а) и GLORYS12V1

(NEMO) – (д); фронтальные зоны: S (б), плотности (с), температуры (е), солености (ф).

Фиолетовым цветом показаны области, для которых значения градиентов соответствующих характеристик находятся в диапазоне от 0.7 до 0.8 функции распределения вероятностей.

Желтыми точками обозначены места промысла на дату 2 августа 2015

Для того чтобы определить критерии выделения фронтальных зон и границ вихрей, разделяющих воды с различными характеристиками, мы рассчитали функции вероятности распределения значений градиента лагранжева индикатора S , а также значений градиентов распределения температуры, солености и плотности в рассматриваемом районе за каждую дату рассматриваемого периода. В дальнейшем будем называть фронтальными зонами области, в которых значения соответствующих градиентов превышают 0.7 значений функции обеспеченности данной характеристики. При этом для самой функции обеспеченности мы рассматриваем две градации: 1) от 0.7 и выше и 2) от 0.8 и выше. На рисунке 1.2б, с, е, ф сиреневым цветом обозначены фронтальные зоны, для которых функция обеспеченности находится в диапазоне [0.7, 0.8], а черным цветом – фронтальные зоны со

значениями функции обеспеченности >0.8 . Таким образом, в нашем исследовании выделение фронтальных зон для четырех характеристик (рис. 2.2b,c,e,f) определяется единой методикой, в которой исключается субъективный фактор при определении критериев выделения фронтальных зон и которая основана на распределениях вероятности самих величин.

Для каждого дня путин 2015, 2016 и 2020 гг. были выделены фронтальные зоны подобно тому, как это показано на рисунке 1.2 для одной даты, а затем оценивались расстояния между местами промысла до ближайшей границы соответствующей фронтальной зоны. Отметим, что эти расстояния определялись на основе двух градаций функции распределения: с отсечкой 0.7 и 0.8 – иными словами, эти расстояния рассчитывались до границы сиреневой или черной области, характеризующей фронтальную зону (рис. 1.2b,c,e,f). Далее для полученных оценок был применен статистический анализ. Чем больше выбирается градиент рассматриваемой характеристики, тем меньше площадь соответствующей фронтальной зоны (рис. 1.3). Это означает, что чем больше мы выберем отсечку функции обеспеченности, тем меньше будет площадь фронтальной зоны.

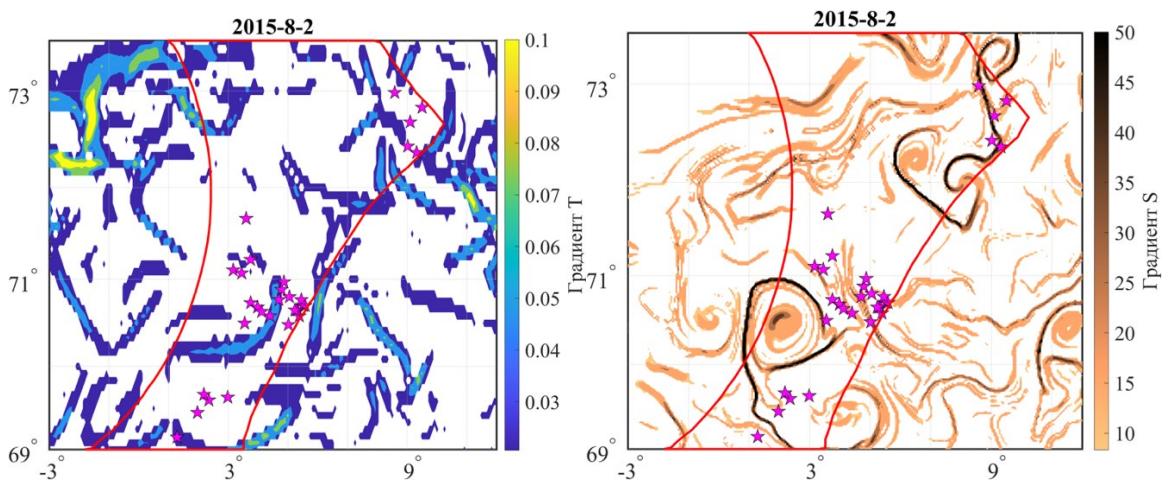


Рисунок 1.3 – Фронтальные зоны, рассчитанные по градиентам температуры (слева) и лагранжева индикатора S (справа) на конкретную дату. Звездочками показаны места промысла

Чтобы исключить зависимость результатов статистического анализа от ограниченности выборки, было проведено сравнение со случайной выборкой. Для каждой даты за те же периоды в выбранной области случайным образом накидывалась 1000 случайных точек, имитирующих места выловов. Для создания случайной выборки использовалась функция `rand` в системе MATLAB.

Далее на каждую дату мы рассчитываем гистограммы распределений по расстояниям от мест промысла для реальной и случайной выборки до ближайшего

градиента рассматриваемой характеристики (индикатора S, плотности, температуры и солености). Расчеты гистограмм проводились для двух отсечек функций обеспеченности: 0.7 и 0.8. Результаты приводят к следующим выводам:

1) Анализ гистограмм реальных выловов показывает, что места промысла часто располагаются не на самом фронте, а в полосе 10-15 километров возле него.

2) Температурные фронты являются значимыми для образования промысловых скоплений. Можно утверждать, что рыба, во-первых, избегает мест, удалённых от температурных фронтов, что проявляется в более плавном изменении значений на гистограмме для случайной выборки, во-вторых, тяготеет к этим фронтам, что проявляется на сдвиге медиан распределения и отношении высот первого и второго столбца при сравнении графиков для реальных выловов со случайными.

3) Несмотря на то, что по отношению к фронтам солёности рыба аналогичного поведения не демонстрирует, солёность также влияет на образование скоплений. Это видно по распределениям расстояний до фронтов плотности, рыба избегает удаления от них и тяготеет к ним более выражено, чем для температурных фронтов.

4) На S-гистограммах эффект избегания мест, удалённых от фронтов, вполне выражен, эффект тяготения мест промысла к фронтам более заметен для отсечки 0.8. Возможно, для S необходимо по-другому считать отсечку, так как даже случайно набросанные точки лежат очень близко к градиентам из-за того, что градиентов слишком много.

5) В целом при уменьшении отсечки, т.е. увеличения площади зон с условно высоким градиентом, картина качественно не меняется, но эффекты отталкивания/тяготения к фронтам становятся менее выраженными.

6) Наиболее выражены указанные эффекты (избегания-притяжения к фронтам) проявляются для плотности. На графиках медиана распределения расстояний мест вылова от градиента плотности составляет 3.96 для реальных выловов, в то время как для случайно выборки медиана 7.66 – это для отсечки 0.7. Для отсечки 0.8 разница в значениях еще больше: 5.66 и 12.29. Таким образом, плотность является наиболее репрезентативным признаком при определении влияния гидродинамических и термохалинных условий на промысел.

1.5 Статистический анализ (гистограммы)

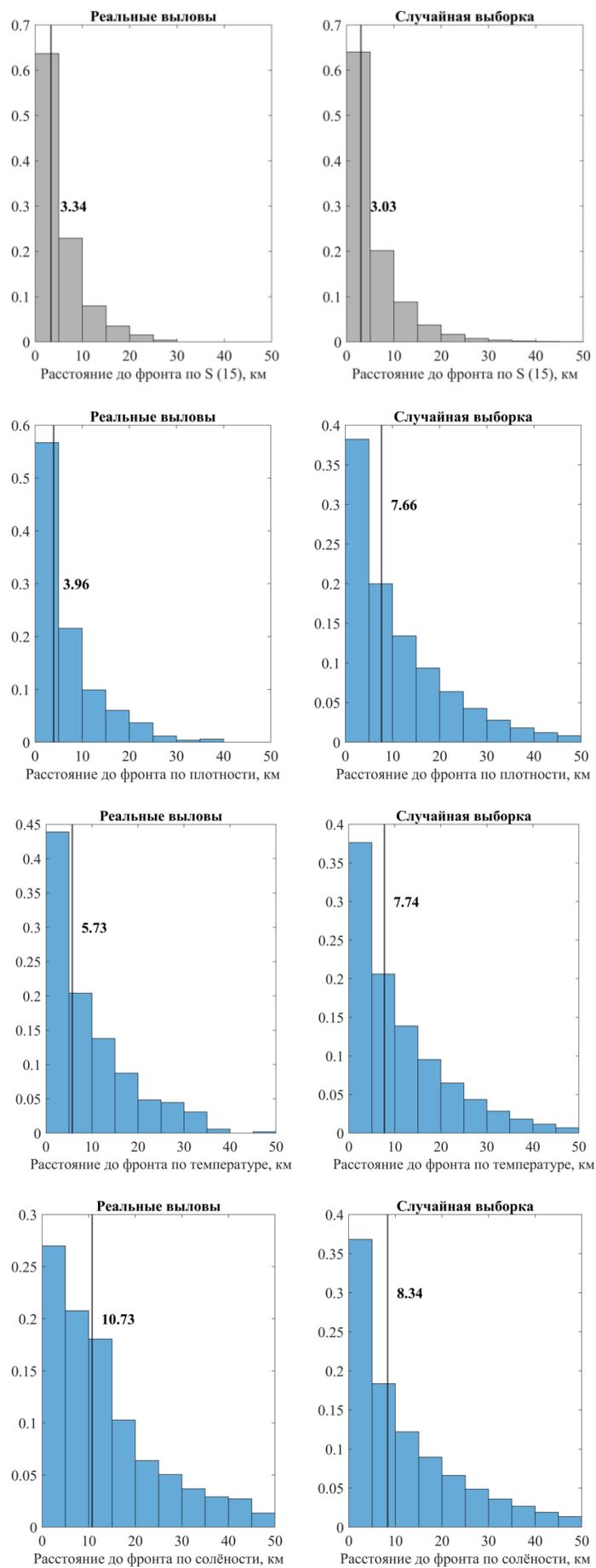
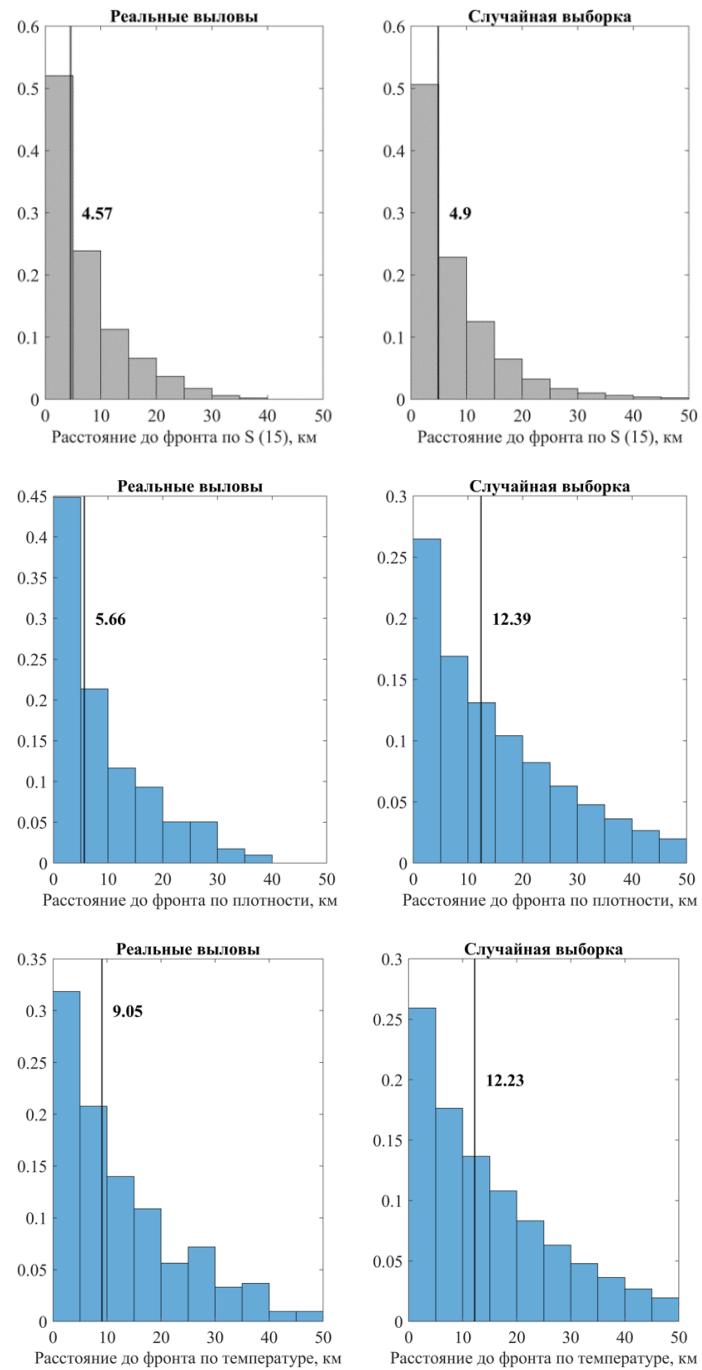


Рисунок 1.4 – Гистограммы распределений по расстояниям от мест вылова до ближайшего градиента лагранжева индикатора S , плотности, температуры и солености с отсечкой 0.7 для

реальных выловов атлантической скомбрии в путины 2015, 2016 и 2020 гг. (слева) и для случайной выборки за те же даты (справа). Чёрная прямая на гистограммах соответствует значениям медианы для соответствующей выборки



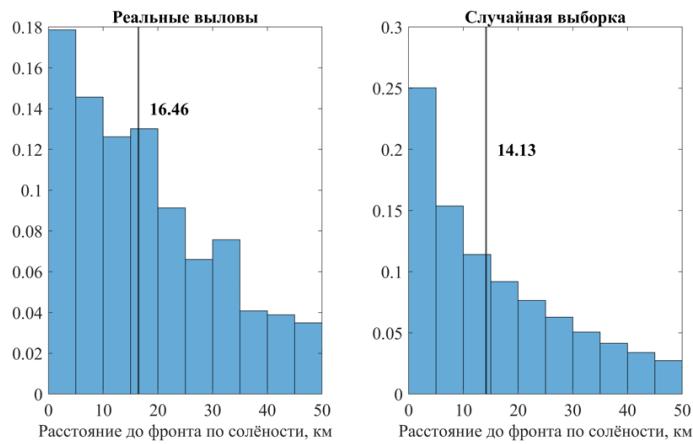


Рисунок 1.5 – То же самое, что и на рис. 1.4, с отсечкой 0.8 функции обеспеченности

1.6 Разработка и апробация методики объективного выделения фронтальных зон

Предлагаемая методика заключается в выделении фронтальных зон по статистическим критериям. Рассматриваются четыре типа параметров в районе промысла, характеризующих фронты и фронтальные зоны: лагранжев индикатор S , описывающий динамику вод, а также температура, соленость и плотность, традиционно используемые для выделения термохалинных фронтов. По этим параметрам рассчитываются градиенты этих характеристик.

Статистический анализ проводится не по самим характеристикам, а по их градиентам. При этом фронтальные зоны определяются из самих значений градиентов, для которых строятся функции распределения вероятностей, и в дальнейшем выбираются две отсечки функции обеспеченности для значений > 0.7 и > 0.8 . Тем самым из анализа исключается субъективный момент, заключающийся в том, что исследователь сам назначает значение некоторого градиента параметра, который по его мнению характеризует фронт. В нашем подходе такой критерий выбирается по значениям функций обеспеченности и принимается единым для всех четырех параметров.

Исходя из функций обеспеченности с отсечками > 0.7 и > 0.8 определяются фронтальные зоны двух типов. В дальнейшем рассчитываются расстояния от реальных мест промысла для ближайших фронтов для каждого из четырех параметров, для которых строятся диаграммы распределения в зависимости от расстояния в километрах. Для сравнения проводится аналогичная процедура для случайной выборки с количеством точек 1000, имитирующих места вылова.

Такой подход позволяет выявить возможные закономерности и связи между местоположением промысла и факторами, влияющими на улов. Построенные диаграммы распределения наглядно демонстрируют, как расстояние до ближайших фронтов соотносится с выбранными параметрами, что может выявить как позитивные, так и негативные корреляции. Кроме того, анализ случайной выборки служит контрольной группой, позволяя оценить степень отклонения реальных данных от теоретически ожидаемых значений.

По нашим данным наиболее сильное влияние на распределение промысловых скоплений оказывает плотность. Отметим, что в работе (Виноградов и др., 1984), где анализируются биологическая продуктивность динамически активных зон открытого океана, в том числе район северной Атлантики, указывается, что очень часто сплошные области высоких градиентов плотности хорошо совпадают с известными районами промысла. Об этом свидетельствуют также и экспедиционные рыбопромысловые исследования в данном регионе (Демин и др., 1980; Елизаров, Щербинин, 1979). Наше исследование, проведенное с использованием статистического анализа, подтверждает этот результат.

Анализ гистограмм реальных выловов показывает, что рыболовные зоны часто располагаются на расстоянии 10-15 км от фронтов. В нашем исследовании установлено, что температурные фронты оказывают значительное влияние на концентрацию рыбы: рыба избегает зон, находящихся вдали от фронтов, что видно по плавному распределению случайной выборки, и тяготеет к ним, о чём свидетельствуют сдвиг медиан распределений и разница в высотах столбцов для реальных и случайных данных. Хотя в отношении фронтов солености рыба не демонстрирует аналогичного поведения, влияние солености на концентрацию всё же присутствует, что подтверждается тяготением рыбы к фронтам плотности. На S-гистограммах эффект избегания зон вдали от фронтов выражен более чётко при отсечке 0.8, однако высокая плотность градиентов требует её корректировки. При уменьшении отсечки, то есть расширении зон с высоким градиентом, эффект избегания и тяготения к фронтам становится менее выраженным, но общая картина остаётся неизменной.

1.7 Публикации

Результаты исследования опубликованы журнале "Fisheries Oceanography", который является ведущим журналом в области промысловой океанографии и издается Wiley-Blackwell Publishing Ltd., одним из ведущих научных издательств. Журнал стабильно занимает Q1 (первый квартиль) в категориях "Aquatic Science" и "Oceanography" согласно

SCImago Journal Rank (SJR) за многие годы, включая 2024 год . Q1 указывает на то, что журнал входит в 25% лучших журналов в своей предметной области. Его импакт-фактор составляет 2.7, а 5-летний импакт-фактор – 2.6 . Это указывает на высокую цитируемость статей, опубликованных в журнале. Журнал индексируется в престижных базах данных, таких как Web of Science (SCIE) и Scopus. Журнал фокусируется на исследованиях, связывающих динамику популяций рыб с морской средой, включая пищевые цепи, механизмы, контролирующие численность, и факторы, влияющие на пополнение запасов рыб и все высшие морские трофические уровни.

Ссылка: Lebedeva M.A., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Fayman P.A., Didov A.A., Belonenko T.V., Klochkov D.N. (2025). Evaluating the Impact of Oceanographic Field Variability on Atlantic Mackerel Distribution within Russian Fishing Grounds in the Northern Norwegian Sea. *Fisheries Oceanography* 34, no. 6: 27–36. <https://doi.org/10.1111/fog.12744>

ORIGINAL ARTICLE

Evaluating the Impact of Oceanographic Field Variability on Atlantic Mackerel Distribution Within Russian Fishing Grounds in the Northern Norwegian Sea

M. A. Lebedeva^{1,2} | M. V. Budyansky^{1,2} | M. Yu. Uleysky² | P. A. Fayman² | A. A. Didov^{1,2} | T. V. Belonenko¹ | D. N. Klochkov³

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia | ²V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia | ³MORINFO LLC, Murmansk, Russia

Correspondence: T. V. Belonenko (btvlisab@yandex.ru)

Received: 14 November 2024 | **Revised:** 19 May 2025 | **Accepted:** 27 May 2025

Funding: The research was carried out with the support of the grant of St. Petersburg State University No. 129659573 and the Russian Science Foundation Grant No. 25-17-00021. The Lagrangian analysis was performed on the high-performance computing cluster at the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (State Task No. 124022100072-5).

Keywords: Atlantic mackerel | density | frontal zones | Lagrangian modeling | Norwegian Sea | oceanographic conditions | salinity | temperature

ABSTRACT

Based on fishing records from 2015, 2016, and 2020, this study analyzes the dependence of Atlantic mackerel catch distribution by the Russian fleet on oceanographic conditions in the northern part of the Norwegian Sea (north of 68.5°N). Four types of parameters characterizing fronts and frontal zones are considered: the Lagrangian indicator S, describing water dynamics, along with temperature, salinity, and density in the upper ocean layers, which are traditionally used to identify thermohaline fronts. Gradients of these characteristics are calculated based on these parameters, and the distance from fishing locations to the nearest fronts is evaluated. A unified methodology is applied to automatically define frontal zones using a probability distribution function. To eliminate the dependence of statistical analysis results on limited sampling, a comparison with a random sample was conducted. Histogram analysis of actual catches shows that fishing zones are often located 10–15 km from fronts. It was found that the density of the upper ocean layers has the greatest influence on the distribution of Atlantic mackerel fishing aggregations, while temperature fronts also significantly impact the formation of fishing aggregations.

1 | Introduction

The distribution of forage plankton within mesoscale dynamic structures is of interest not only from a biotic perspective but also in its applications for fisheries, particularly in locating fish aggregations. As the foundation of the food chain, plankton distribution directly impacts the movement and concentration of

converge, leading to both general and localized mixing and the upwelling of nutrient-rich waters, remain underexplored.

Fishing enterprises show significant interest in short-term forecasts of fish aggregation locations, which depend on the dynamics of ocean currents, the positioning of frontal zones, and the distribution of forage resources. Identifying and analyzing

2 МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ГРАДИЕНТОВ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА ЯПОНСКОЙ СКУМБРИИ В ЮЖНО-КУРИЛЬСКОЙ ПРОМЫСЛОВОЙ ЗОНЕ

2.1 Этапы исследования и решаемые задачи

Первый этап работ состоял в подборе соответствующего реанализа, адекватно воспроизводящего гидрологические условия в районе промысла. Удобство использования реанализов состоит в том, что они позволяют в оперативном режиме строить прогнозные карты гидрологической обстановки и выделять как сами фронты, так и вихревые и струйные потоки.

Для верификации методики выбрана Южно-Курильская промысловая зона (ЮКРЗ), так как, с одной стороны, у нас имеется большой массив данных о промысле на три последовательных года, а с другой стороны, данные судовых гидрологических измерений ТИНРО. Для района исследования произведена верификация данных реанализов GLORYS12V1, JCOPE2 и GOFS3.1.

Южно-Курильская рыболовная зона является одним из наиболее продуктивных в отношении добычи водных ресурсов районов, здесь добывают пелагических рыб, моллюски и другие морские организмы. Для решения поставленной нами в рамках работы задачи мы использовали данные о промысле Японской скумбрии.

На рисунке 2.1 (слева) представлена сводная карта, отражающая пространственное распределение мест промысла Японской скумбрии в 2020, 2021 и 2022 годах. На карту нанесены места тралений, зафиксированные в указанные годы, с привязкой к географическим координатам. Для дальнейшего анализа отбирались только те случаи вылова, которые имели место в пределах тихоокеанской части Южно-Курильской рыболовной зоны – её границы обозначены на рисунке красной линией. Следует отметить, что прибрежная граница исследуемой области намеренно проведена с отступом от береговой линии, включая Курильские проливы и острова, поскольку гидродинамические процессы вблизи суши менее точно воспроизводятся как в данных реанализа, так и в альтиметрических продуктах, которые ассилируются в реанализах. Такой подход обеспечивает более корректное сопоставление промысловой информации с океанографическими параметрами.

Справа на рисунке представлены усреднённые поля поверхностной скорости течений по данным реанализа GLORYS12V1 за каждый из промысловых сезонов – с 1 июня

по 30 ноября 2020, 2021 и 2022 годов. Эти карты позволяют проследить межгодовую изменчивость гидродинамической обстановки в районе Южно-Курильской рыболовной зоны. Различия в структуре и интенсивности циркуляции между годами проявляются достаточно отчётливо, указывая на динамичный характер мезомасштабной океанической среды, в которой формируются промысловые условия.

Так, в 2020 году в северо-западной части Тихого океана, восточнее острова Хоккайдо, наблюдается выраженный антициклонический вихрь – его центр расположен вблизи координат 41.2° с.ш. и 145.9° в.д. Эта структура отличается крупным пространственным масштабом и ярко выраженным круговым переносом вод, что могло оказывать значительное влияние на распределение термохалинных фронтов и промысловых скоплений.

В 2021 году гидродинамическая картина существенно изменилась: антициклон смещается к юго-востоку, занимая позицию в районе 40.5° с.ш. и 143.5° в.д. Такое положение центра вихря соответствует более удалённому от Южно-Курильской зоны положению главного очага мезомасштабной динамики, что, вероятно, могло изменить характер фронтальных зон и условия миграции японской скумбрии.

В 2022 году антициклоническая активность в исследуемой области ослабевает: характерный антициклон присутствует, однако его пространственные масштабы и структура выражены значительно слабее по сравнению с предыдущими годами. Отсутствие мощного устойчивого вихря может свидетельствовать о менее организованной циркуляции, что, в свою очередь, может отражаться на слабой структурированности фронтальных зон и, как следствие, на менее чётком формировании промысловых скоплений.

Таким образом, пространственная и межгодовая изменчивость вихрей, выявляемая по полям скорости, подчёркивает необходимость учёта циркуляционной обстановки при анализе условий промысла и построении моделей распределения гидробионтов. Полученные различия в межгодовой циркуляции не только демонстрируют высокую изменчивость гидродинамических условий в районе Южно-Курильской рыболовной зоны, но и позволяют объяснить пространственные особенности распределения промысловых скоплений японской скумбрии в разные годы. Особое внимание в этом контексте заслуживает так называемый «Хоккайдский» антициклон, структура и положение которого существенно варьируются по годам.

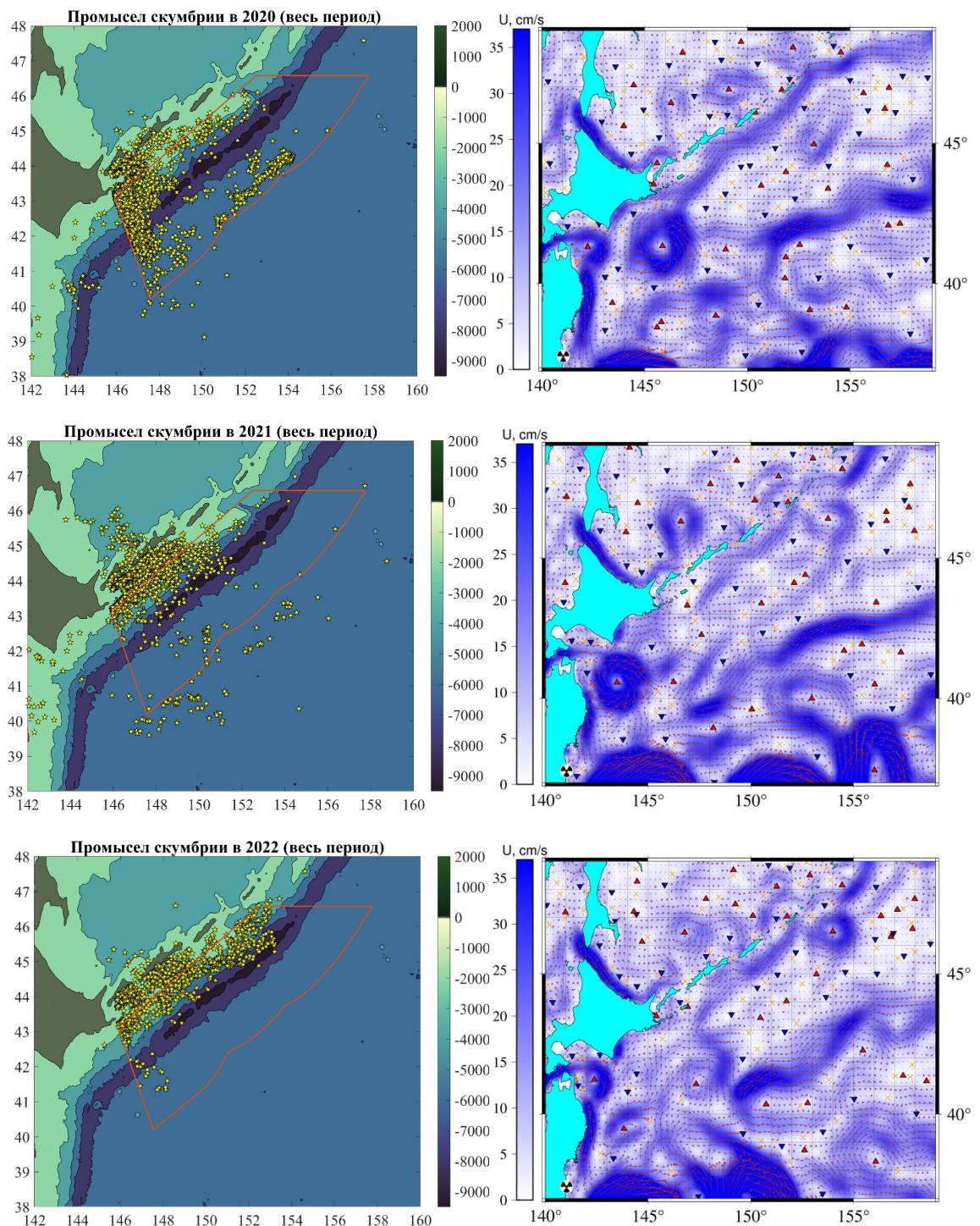


Рис. 2.1. Слева композиция мест промысла для 2020–2022 годов – красной линией показана выбранная область исследования. Справа среднее поле скорости по AVISO для каждого года, период усреднения с 1 июня по 31 ноября.

2.2 Верификация океанографических реанализов

В данном разделе берутся три различных океанографических реанализа, имеющих примерно одинаковое разрешение по времени и пространству, и проводится их статистическая проверка на предмет соответствия результатам CTD-измерений.

Список океанографических реанализов:

- 1) Global Ocean Forecasting System 3.1 (GOFS3.1). В качестве океанографической модели используется Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) с разрешением по горизонтали $1/12^\circ$ и по времени 3 часа (Cummings and Smedstad 2013)
- 2) Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE2). В качестве океанографической модели используется Princeton Ocean Model (POM) с разрешением по горизонтали $1/12^\circ$ и по времени одни сутки (Miyazawa et al., 2020).
- 3) Global Ocean Physical Reanalysis (GLORYS12V1). В качестве океанографической модели используется European Modelling of the Ocean (NEMO) с разрешением по горизонтали $1/12^\circ$ и по времени одни сутки (Jean-Michel et al., 2021)

Район, в котором проводится статистический анализ, лежит в границах 144° в.д. – 160° в.д., 40° с.ш. – 47° с.ш. Результаты CTD-измерений брались с четырех океанографических экспедиций ТИНРО, области исследований которых оказывались в границах, указанных выше. Список экспедиций:

- 1) Рейс №65 НИС «Профессор Кагановский». Рейс проходил в период май-июль 2018 года. Область исследования – северо-западная часть Тихого океана.
- 2) Рейс №63 НИС «ТИНРО». Рейс проходил в период март-июнь 2019 года. Область исследования – северо-западная часть Тихого океана, восточный шельф острова Сахалина, западный шельф полуострова Камчатка, шельф северной части Охотского моря.
- 3) Рейс №67 НИС «ТИНРО». Рейс проходил в период май-июль 2021 года. Область исследования – северо-западная часть Тихого океана.
- 4) Рейс №68 НИС «ТИНРО». Рейс проходил в период август-октябрь 2021 года. Область исследования – северо-западная часть Тихого океана, центральная часть Охотского

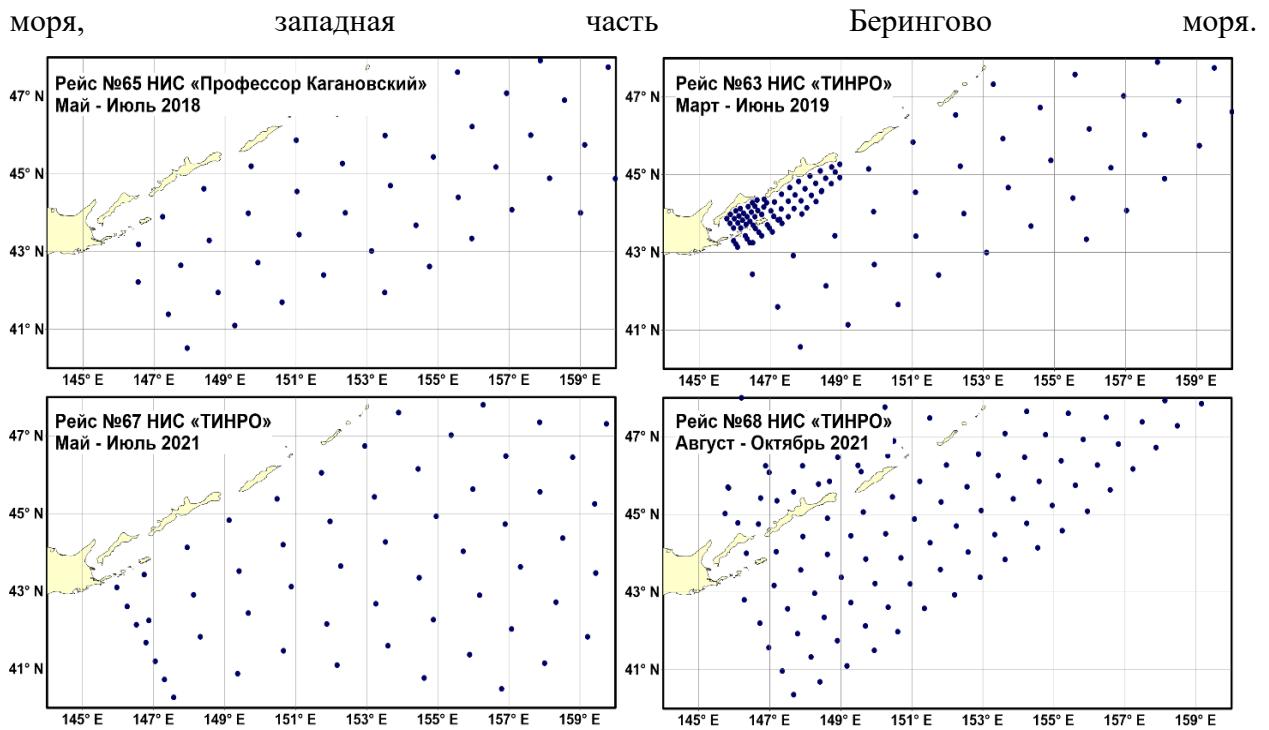


Рис. 2.2. Схемы CTD-станций в четырех различных океанографических экспедициях ТИНРО.

Результаты CTD-измерений температуры и солености сравнивались с соответствующими данными GLORYS12V1, GOFS3.1 и JCOPE2 в ближайших к станциям узлах модельной сетки, определенных при помощи метода «ближайших соседей» (Nearest Neighbours Method) в соответствующие периоды времени, когда проводились измерения.

В качестве статистических критериев согласованности данных CTD-измерений результатам моделирования использовались:

1) среднее абсолютное отклонение, нормированное на стандартное отклонение результатов измерений (функция стоимости) [Wang et al., 2022]:

$$C = \left| \frac{M-O}{STD} \right|$$

(1)

где: М – среднее значение температуры или солености по данным GLORYS12V1, GOFS3.1 и JCOPE2; О- среднее значение температуры или солености по данным CTD измерений; STD – среднеквадратическое отклонение результатов CTD измерений

2) пространственный коэффициент корреляции Пирсона.

Коэффициенты корреляции и функция стоимости рассчитывались на каждом горизонте от поверхности до 500 метров с дискретностью метр по вертикали. Вертикальное распределение статистических оценок приводится на рисунках 3–6. Считается, что если функция стоимости не превышает 1, то это означает хорошую согласованность между данными СТД-измерений и результатами моделирования, если функция стоимости лежит в пределах от 1 до 2, то это означает удовлетворительную согласованность, если функция стоимости превышает 2, то это означает плохое качество результатов моделирования. Параллельно с коэффициентами корреляции, вычислялись критерии уровня значимости корреляционной связи, и если корреляционная связь незначима, то соответствующие точки на графиках пропускаются.

Сравнение океанографических реанализов с результатами измерений, полученных в рейсе №65 НИС «Профессор Кагановский» показали следующее. Данные океанографических реанализов показывают хорошую согласованность и достоверную корреляционную связь с результатами СТД-измерений. Исключением является реанализ JCOPE2, который удовлетворительно согласуется с результатами измерений в верхнем 50 метровом слое (соленость), и глубже 450 метров (температура). Так же реанализ JCOPE2 показывает отсутствие корреляционной связи по солености в верхнем 50 метровом слое (рис. 2.3). В целом реанализ GLORYS12v1 показывает наилучшее соответствие с данными СТД измерений по сравнению с остальными реанализами.

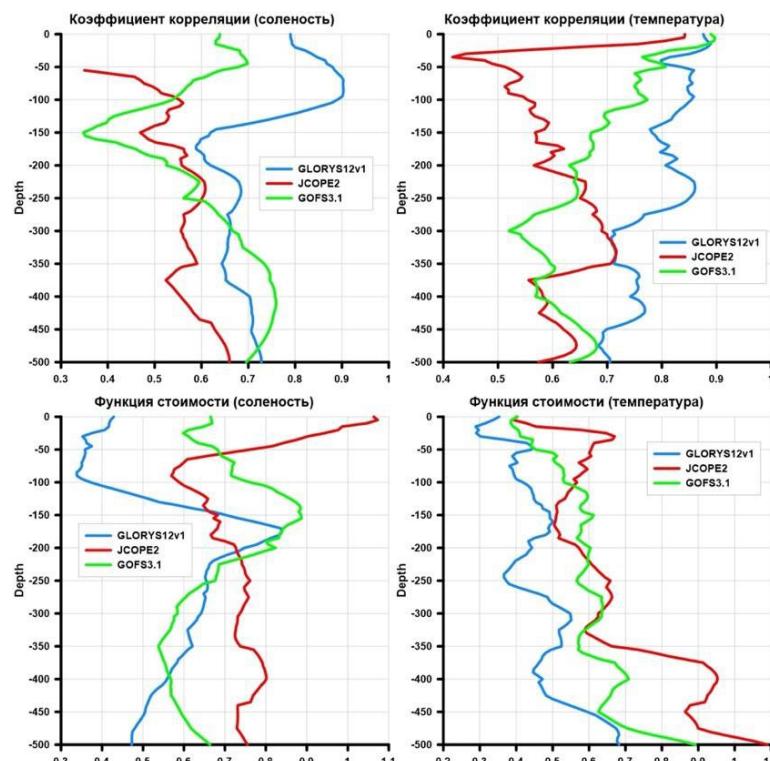


Рис. 2.3. Статистические оценки соответствия океанографических реанализов результатам СТД-измерений, сделанных в рейсе №65 НИС «Профессор Кагановский», май–июль 2018.

Сравнение океанографических реанализов с результатами измерений, полученных в рейсе №63 НИС «ТИНРО» показали следующее. Данные океанографических реанализов показывают хорошую согласованность и достоверную корреляционную связь с результатами CTD-измерений. Исключением является реанализы JCOPE2 и GLORYS12v1, который удовлетворительно согласуется с результатами измерений глубже 450 метров (температура). Так же реанализ GLORYS12v1 показывает отсутствие корреляционной связи по температуре на глубинах ниже 450 метров (рис. 2.4). В целом реанализ GOFS3.1 показывает наилучшее соответствие с данными CTD измерений, сделанных в рейсе №63 по сравнению с остальными реанализами.

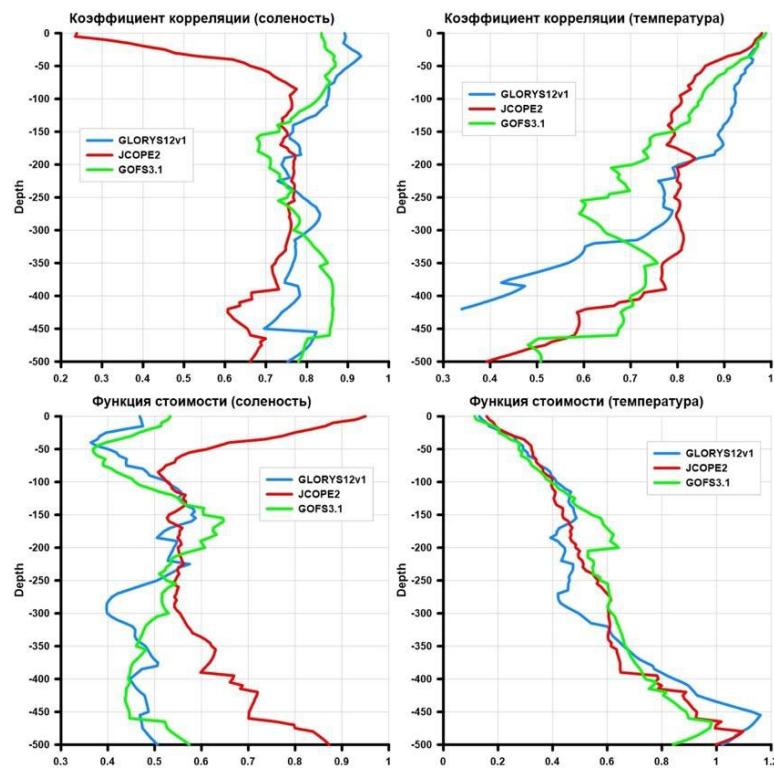


Рис. 2.4. Статистические оценки соответствия океанографических реанализов результатам CTD-измерений, сделанных в рейсе №63 НИС «ТИНРО», март–июнь 2019.

Сравнение океанографических реанализов с результатами измерений, полученных в рейсе №67 НИС «ТИНРО» показали следующее. Данные океанографических реанализов показывают хорошую согласованность и достоверную корреляционную связь с результатами CTD-измерений. В целом реанализ GLORYS12v1 показывает наилучшее соответствие с данными CTD измерений, сделанных в рейсе №67 по сравнению с остальными реанализами (рис. 2.5).

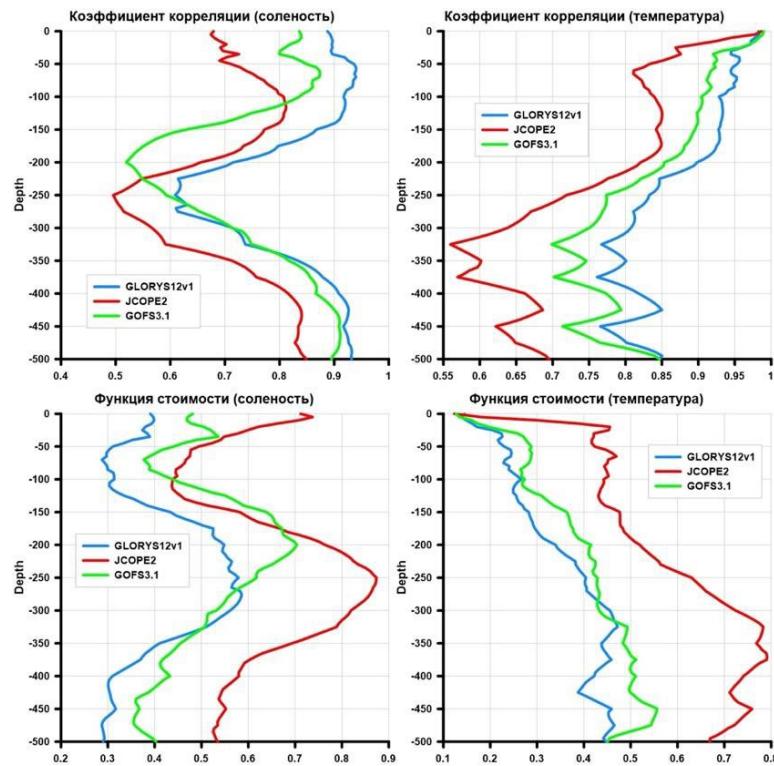


Рис. 2.5. Статистические оценки соответствия океанографических реанализов результатам CTD-измерений, сделанных в рейсе №67 НИС «ТИНРО», май–июль 2021.

Сравнение океанографических реанализов с результатами измерений, полученных в рейсе №68 НИС «ТИНРО» показали следующее. Данные океанографических реанализов показывают хорошую согласованность и достоверную корреляционную связь с результатами CTD-измерений. Исключением является диапазоны глубин от 50 до 200 метров, где все реанализы показывают отсутствие корреляционной связи по температуре и солености. В целом реанализ GLORYS12v1 и GOFS3.1 показывают наилучшее соответствие с данными CTD измерений, сделанных в рейсе №68 (рис. 2.6).

Общим выводом раздела верификации океанографических реанализов является следующее. Все три океанографические реанализа (GLORYS12V1, GOFS3.1 и JCOPE2) показали хорошее соответствие с данными CTD измерений, выполненных в ходе четырех океанографических экспедиций ТИНРО. GLORYS12v1 и GOFS3.1 показывают лучшее соответствие с данными CTD измерений по сравнению с реанализом JCOPE2.

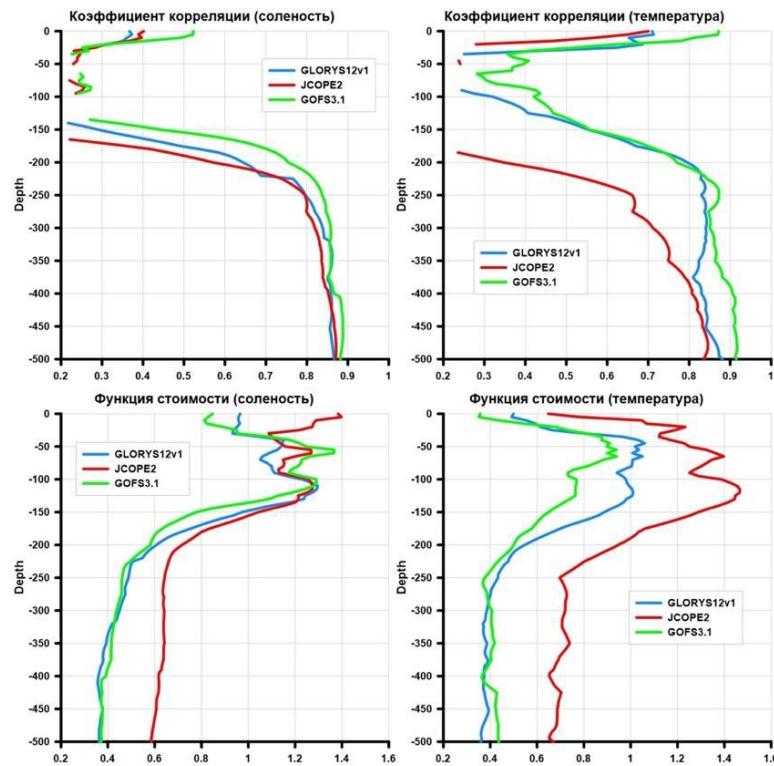


Рис. 2.6. Статистические оценки соответствия океанографических реанализов результатам CTD-измерений, сделанных в рейсе №68 НИС «ТИНРО», август–октябрь 2021.

Поскольку GLORYS12V1 дает больше океанологической и биохимической информации

(https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_BGC_001_028, DOI: 10.48670/moi-00015), то его использование для анализа мест промысла гидробионтов более перспективно чем использование GOFS3.1.

2.3 Разработка алгоритма анализа распределения значений гидрологических характеристик и их градиентов в местах промысла и во фронтальных зонах

Второй этап исследования состоял в разработке алгоритма анализа распределения значений гидрологических характеристик и их градиентов в местах промысла и во фронтальных зонах. Данный алгоритм уже применялся в опубликованной работе (Lebedeva et al., 2025).

Алгоритм выделения фронтальных зон заключается в последовательном выполнении нескольких шагов. На первом этапе производится расчёт статистики распределения значений градиента выбранной гидрологической характеристики по всему району исследования. После этого для непосредственного выделения границ фронтальных зон применяется процентильная отсечка на уровнях 0.7 и 0.8. При этом на определённом этапе разработки для параметра S использовалось дополнительное условие, накладываемое

непосредственно на его величину. На заключительном этапе работы алгоритма вычисляются расстояния от каждой точки вылова и от точек случайной выборки до ближайшей границы полученных фронтальных зон.

В таблице 2.1 представлены пороговые значения гидрологических параметров, используемые для выделения фронтальных зон в районе под кодовым названием «region_PO» за три года наблюдений (2020, 2021 и 2022).

Данные сгруппированы по двум уровням процентиелей (0.8 и 0.7), которые задают строгость критерия для определения фронта. Для каждого года и уровня процентиля приведены критические величины по четырём параметрам:

Градиент плотности (Gdens): Наименьшие значения наблюдались в 2021 году (0.0062 для процентиля 0.8), а наибольшие – в 2022 (0.0097).

Градиент температуры (Gtemp): продемонстрировал устойчивый рост на обоих уровнях процентиля в течение трёхлетнего периода, увеличившись с 0.0504 в 2020 году до 0.0631 в 2022 году для процентиля 0.8.

Градиент солёности (Gsal): также показывает стабильное увеличение год от года, с 0.0090 в 2020 до 0.0106 в 2022 году для процентиля 0.8.

Параметр S (15) 200x200: Значения этого лагранжева параметра были максимальными в 2021 году (4.8579 для процентиля 0.8), а в 2020 и 2022 годах несколько ниже.

Общий тренд указывает на то, что в 2022 году для идентификации фронтов требовались более высокие пороговые значения для градиентов температуры и солёности, что может свидетельствовать об изменении интенсивности фронтальных процессов в регионе.

Таблица 2.1. Значения функции распределения вероятностей

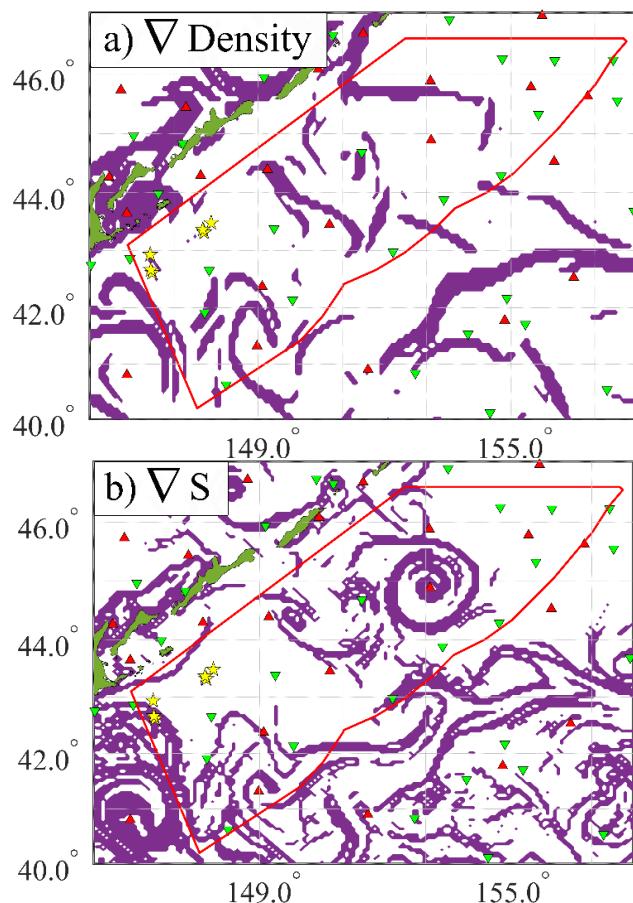
	region PO (2020)	region PO (2021)	region PO (2022)
Процентиль 0.8			
Gdens	0.0076	0.0062	0.0097
Gtemp	0.0504	0.0571	0.0631
Gsal	0.009	0.0099	0.0106
S (15) 200x200	4.3872	4.8579	4.5540
Процентиль 0.7			
Gdens	0.0058	0.0047	0.0073

Gtemp	0.0378	0.0422	0.0470
Gsal	0.0065	0.0072	0.0075
S (15) 200x200	3.2525	3.5945	3.4310

С увеличением порогового значения отсечки уменьшается площадь выделяемых фронтальных зон. В дальнейшем в работе было принято решение использовать только значения характеристик, соответствующие отсечке 0.8 по функции распределения вероятностей.

На рисунке 2.7 представлены результаты выделения фронтальных зон. Области с градиентами, превышающими статистический порог, показаны бордовым. Данный подход объективно визуализирует фронтальные структуры, исключая субъективный выбор пороговых значений.

В отличие от традиционных подходов с фиксированными порогами (например, 0.03 °С/км), здесь используется адаптивный статистический критерий. Это обеспечивает универсальность методики: она применима к любым акваториям и сезонам без ручной корректировки, что особенно важно при сравнении данных с разным фоновым состоянием океана.



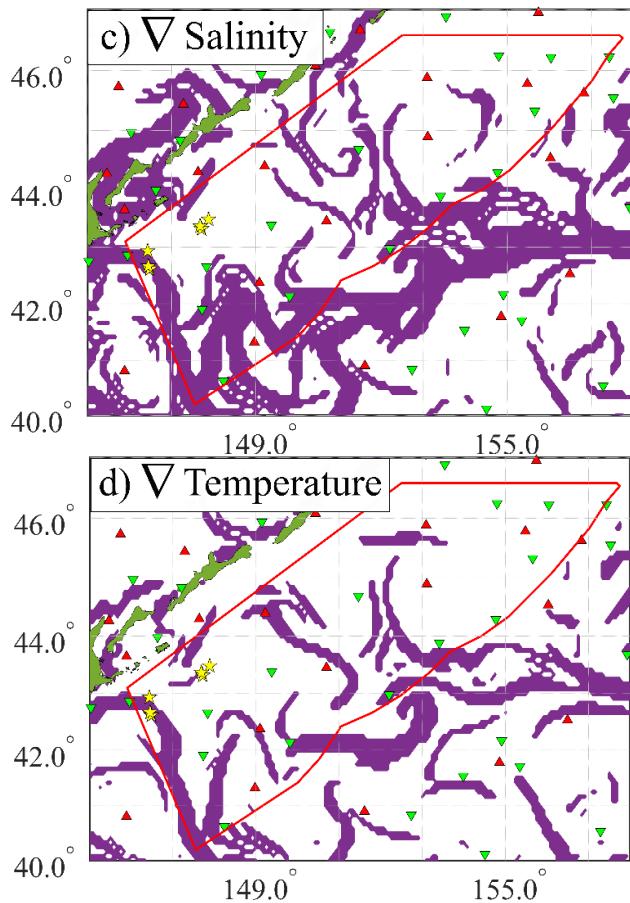


Рис. 2.7. Фронтальные зоны, рассчитанные на основе градиентов плотности (а), лагранжева индикатора S (б), солёности (с) и температуры (д) на 3 июля 2020 года. Фиолетовый цвет обозначает фронтальные зоны, в которых значения градиентов соответствуют интервалу [0.8, 1.0] функции распределения. Звёздочками обозначены места промысла Японской скумбрии.

Следующим шагом является построение гистограмм расстояний от мест реальных и «случайных» выловов до узла ближайшей фронтальной зоны (рис. 8–10). В период пущины 2020–2022 гг. для каждого дня проводилось выделение фронтальных зон на основе градиентов океанологических характеристик (по методике, аналогичной рис. 7). Полученные ежедневные карты фронтальных структур отражали актуальную гидрологическую обстановку. Затем данные промысла Японской скумбрии были пространственно привязаны к этим зонам: для каждой точки вылова вычислялось минимальное расстояние до ближайшего фронта по температуре, солёности, плотности и лагранжеву индикатору S . Этот подход позволил оценить связь между расположением промысловых скоплений и гидрологическими фронтами. Сравнение пространственного распределения реальных выловов со случайной выборкой проводится для проверки статистической гипотезы. Цель – подтвердить, что концентрация уловов в определённых районах не является случайной, а отражает реальную зависимость промысла от расположения фронтальных зон.

2.4 Гистограммы

В 2020 году (рис. 2.8) анализ показывает выраженное взаимодействие промысловых скоплений с фронтальными зонами по рассмотренным эйлеровым океанологическим параметрам. Наблюдаются два ключевых эффекта: избегание значительных удалений от фронтальных зон (>100 км) и, одновременно, концентрация промысла в непосредственной близости к ним. Первый эффект свидетельствует о том, что места промысла практически не располагаются на значительном расстоянии от фронтальных зон, что указывает на важность этих структур для формирования благоприятных условий обитания и питания гидробионтов. Второй эффект проявляется в том, что медианные значения расстояний для реальной выборки существенно меньше, чем для случайной, что отражает тяготение скомбрии кенным гидрологическим особенностям. Максимальное расстояние между медианами было зафиксировано для градиента солёности, подчеркивая высокую значимость солёностных фронтов в 2020 году для распределения промысловых скоплений.

В 2021 и 2022 годах (рис. 2.9 и 2.10) динамика взаимодействия с фронтальными зонами несколько меняется. Самая заметная разница между медианами реальной и случайной выборок наблюдается по градиенту плотности, что свидетельствует о большем влиянии плотностных фронтальных зон на формирование пространственной структуры промысла в эти годы. В то же время, в 2022 году по градиенту солёности отсутствуют оба эффекта – как избегание больших расстояний, так и тяготение к фронтам. Это, вероятно, связано с особенностями гидродинамического развития антициклонического вихря в районе Хоккайдо, который в 2022 году проявлялся менее выраженно и оказывал меньшее влияние на локальную гидрологию. Такие межгодовые различия подчёркивают важность учёта изменчивости океанологических условий при анализе распределения промысловых ресурсов и указывают на необходимость динамического подхода в прогнозировании промысловой активности.

Выводы анализа подтверждают, что на протяжении всех трёх исследуемых лет наблюдается чёткое тяготение промысловых участков к фронтальным зонам температуры и плотности, что подчёркивает их роль в формировании благоприятных условий для скоплений Японской скомбрии. В то же время, связь с фронтальными зонами солёности проявлялась лишь в 2020 и 2021 годах, что указывает на более переменный и менее устойчивый характер влияния солёностных градиентов. Таким образом, фронты температуры и плотности выступают в качестве более надёжных и стабильных индикаторов локализации промысловых скоплений в рассматриваемом районе.

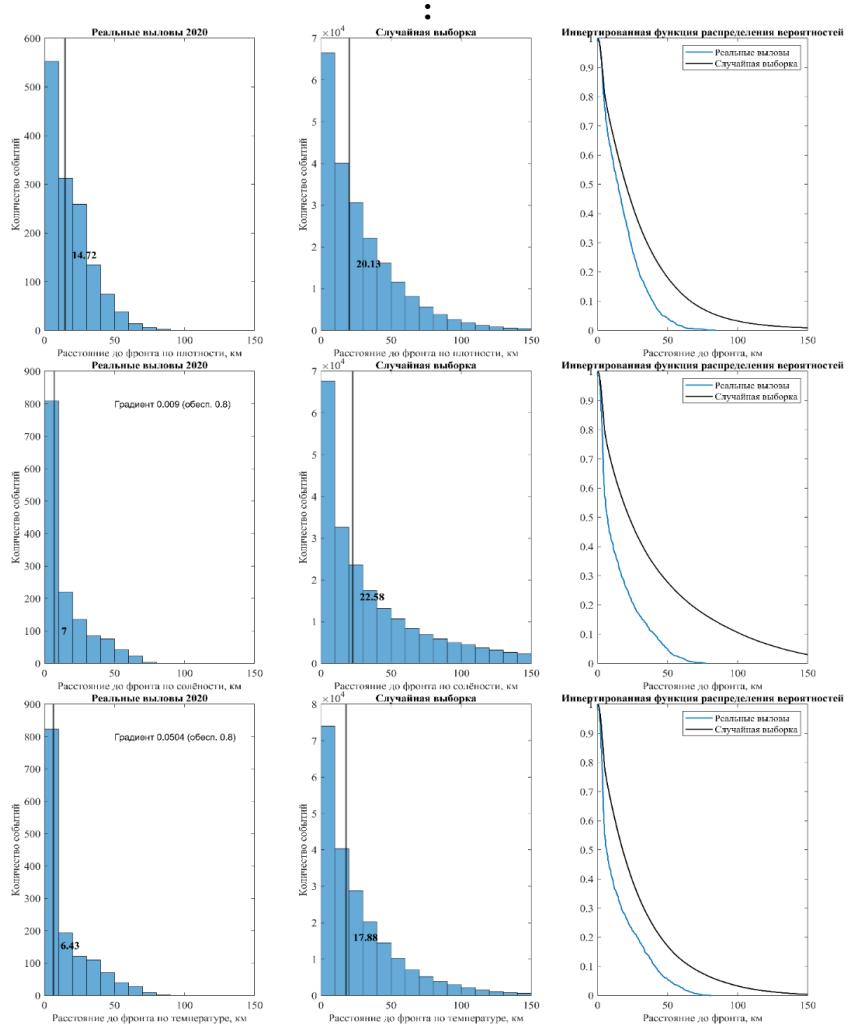


Рис. 2.8. Гистограммы распределения расстояний от мест лова до ближайшей фронтальной зоны плотности, солёности и температуры с отсечкой 0.8 для реальных выловов Японской скумбрии в путину 2020 года (слева) и для случайной выборки в те же даты (посередине). Чёрная линия на гистограммах представляет собой медианные значения для соответствующей выборки. Справа на рисунке изображена инвертированная функция распределения вероятностей для реальной и случайной выборок.

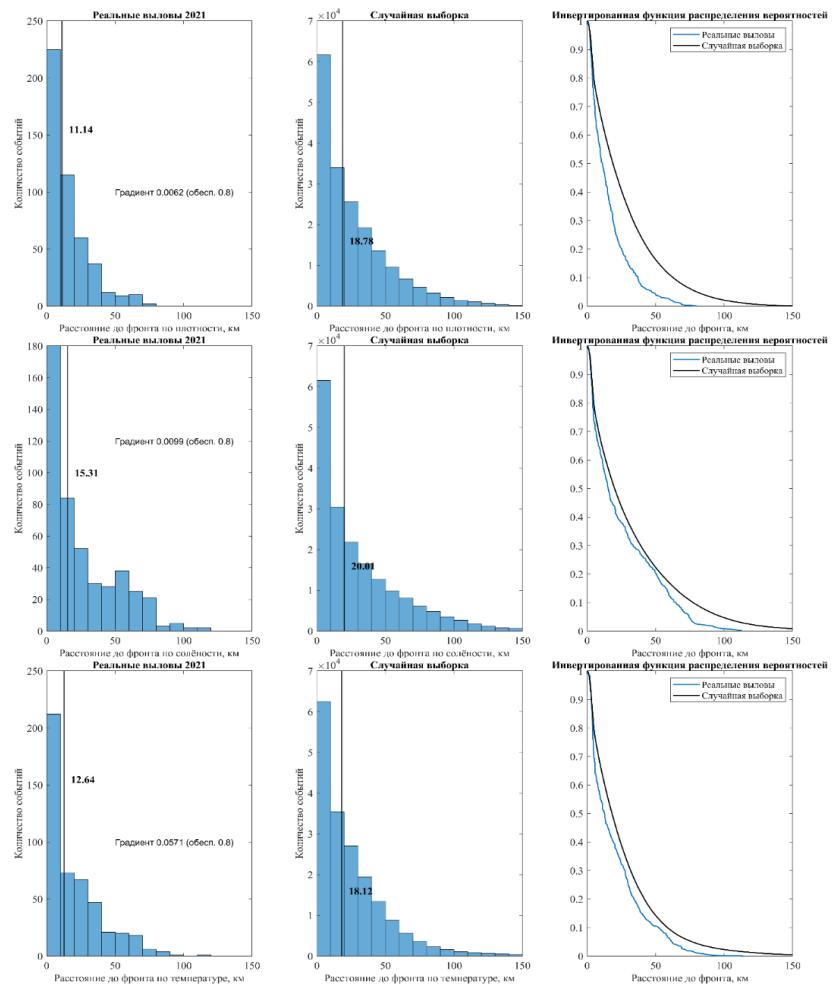


Рис.2.9. То же, что на рисунке 2.8, для 2021 года.

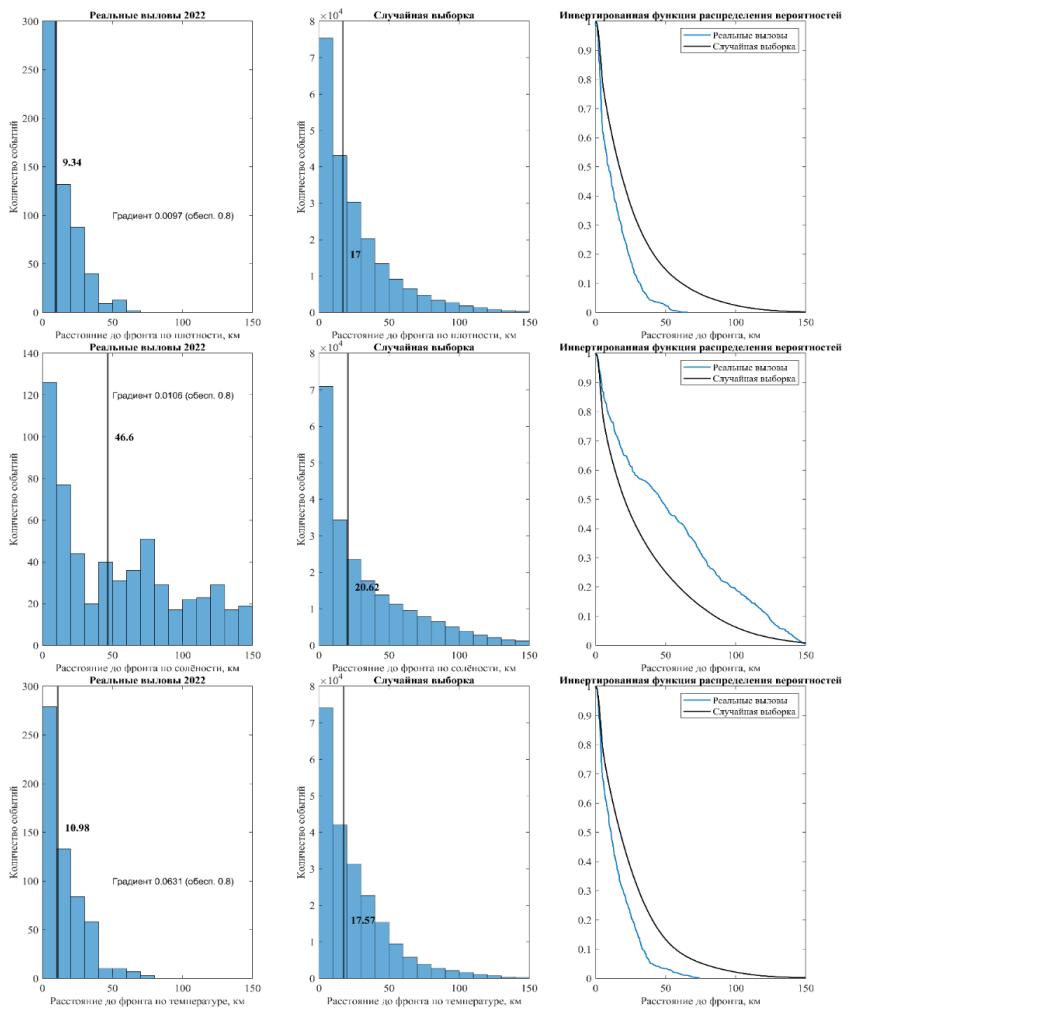


Рис. 2.10. То же, что на рисунке 8, для 2022 года.

Отдельное внимание было уделено фронтальным зонам, выделенным по лагранжеву индикатору S . Для того чтобы отделить «сильные» фронты от «слабых», была выдвинута идея использовать систему аддитивных условий, накладываемых на градиенты. Алгоритм работает путем последовательного «вычищения» слабых фронтов, которые не соответствуют дополнительным критериям, основанным на анализе подстилающих значений. Визуализацией эффективности этого подхода служит карта градиентов, построенная для $S > 100$ км (рис. 2.11 и 2.12).

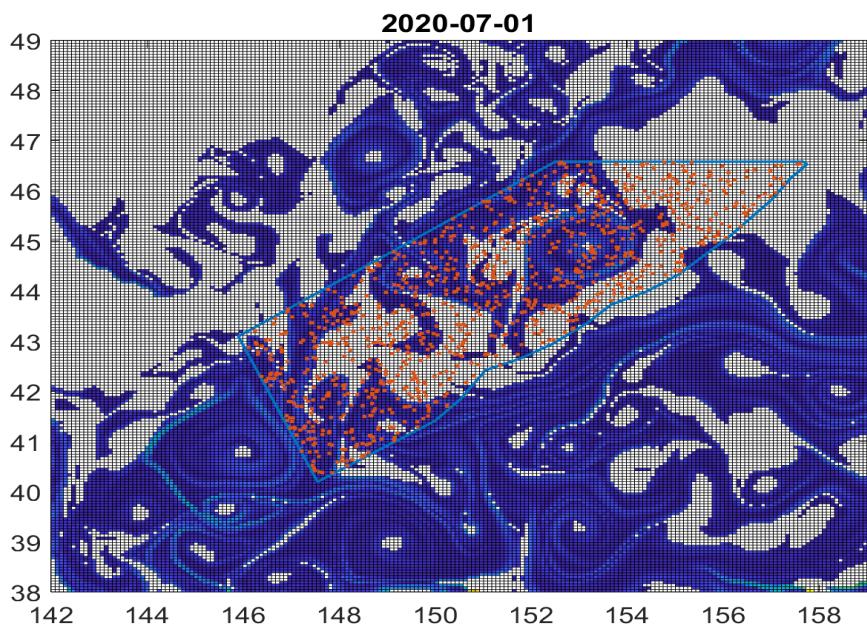


Рис. 2.11. Отображение лагранжевой характеристики $S > 100$ км, красным цветом обозначено расположение тысячи случайных точек в исследуемом районе.

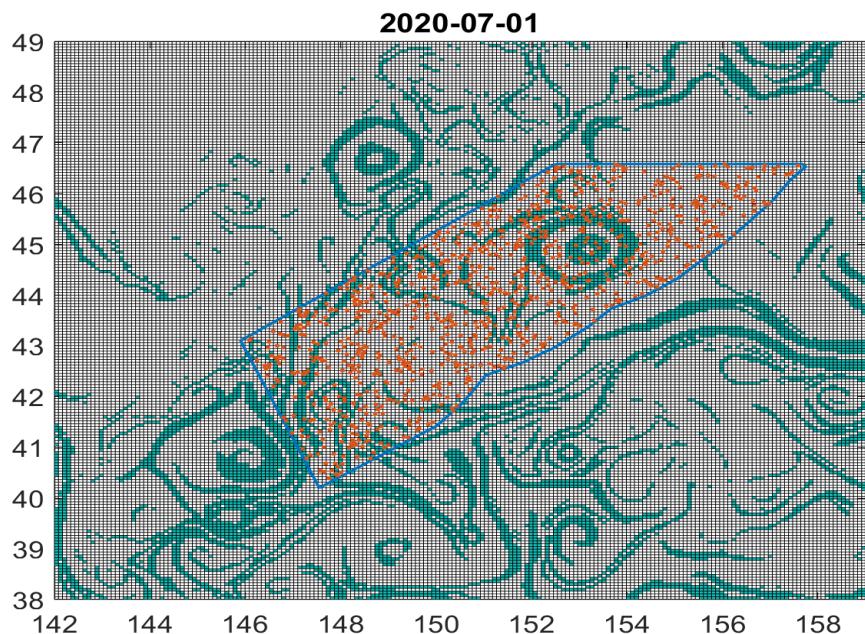


Рис. 2.12. Отображение областей со значением градиента $S > 0.8$ по функции распределения вероятностей (4.3872 км/км) с аддитивным условием $S > 100$ км.

Далее были построены гистограммы расстояний от мест промысла и «случайных» выловов до ближайшего узла фронтальной зоны, выделенной без аддитивных условий и с таковыми (рис. 2.13 и 2.14).

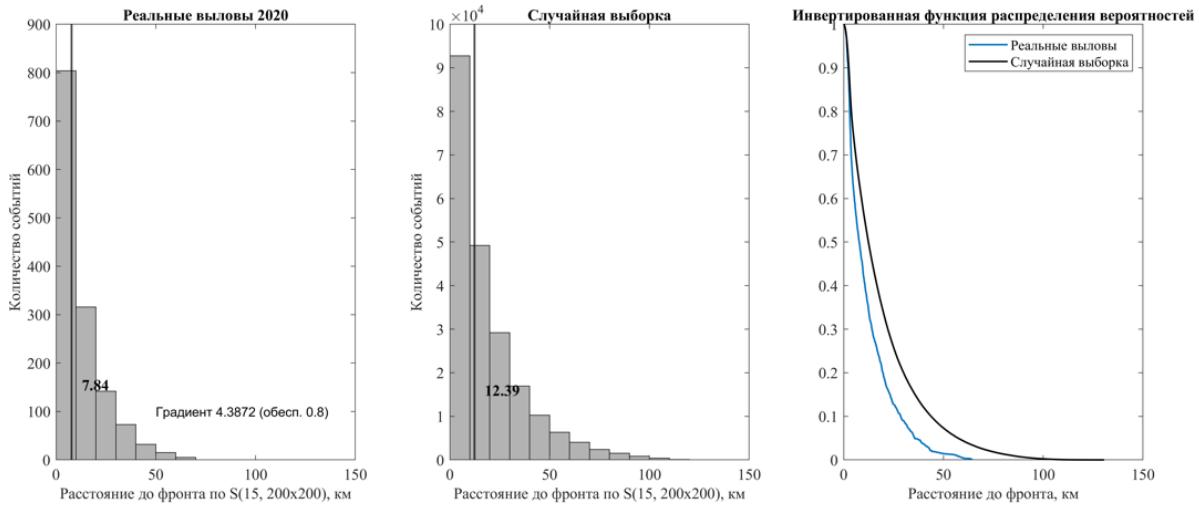


Рис. 2.13. Гистограммы распределения расстояний от мест лова до ближайшей фронтальной зоны градиента S с отсечкой 0.8 **без добавления аддитивных условий** для реальных выловов Японской скумбрии в путину 2020 года (слева) и для случайной выборки в те же даты (по середине). Чёрная линия на гистограммах представляет собой медианные значения для соответствующей выборки. Справа на рисунке изображена инвертированная функция распределения вероятностей для реальной и случайной выборок.

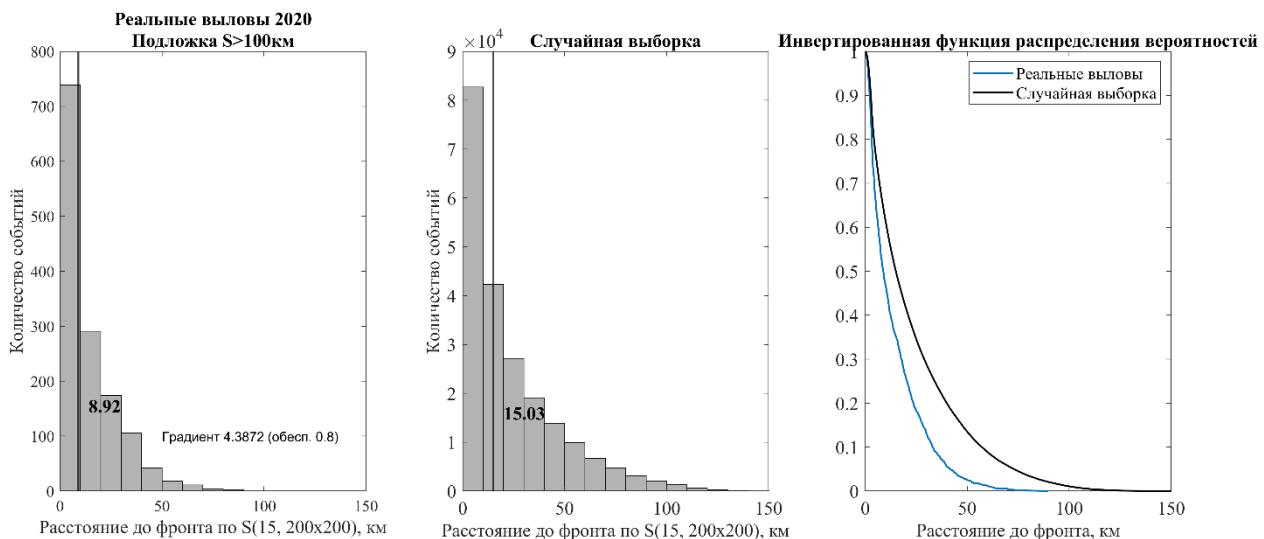


Рис. 2.14. То же, что на рисунке 2.13, но **с добавлением аддитивных условий**.

Проведя сравнительный анализ гистограмм, мы пришли к выводу об отсутствии между ними значимых статистических расхождений. Это указывает на то, что введение аддитивных условий не окажет существенного влияния на конечный результат, а лишь усложнит модель. На основании этого было принято обоснованное решение отказаться от их добавления.

Далее на рисунках 2.15-2.17 приведены гистограммы расстояний до фронтальных зон по лагранжевой характеристике S без добавления аддитивных условий.

Для всех трёх рассматриваемых лет наблюдается эффект избегания больших расстояний, однако эффект тяготения к фронтальным зонам проявляется сильнее всего в 2020 году (разница между значениями медиан составляет 4.55, для 2021 и 2022 года разница составляет 0.64 и 1.95 соответственно.

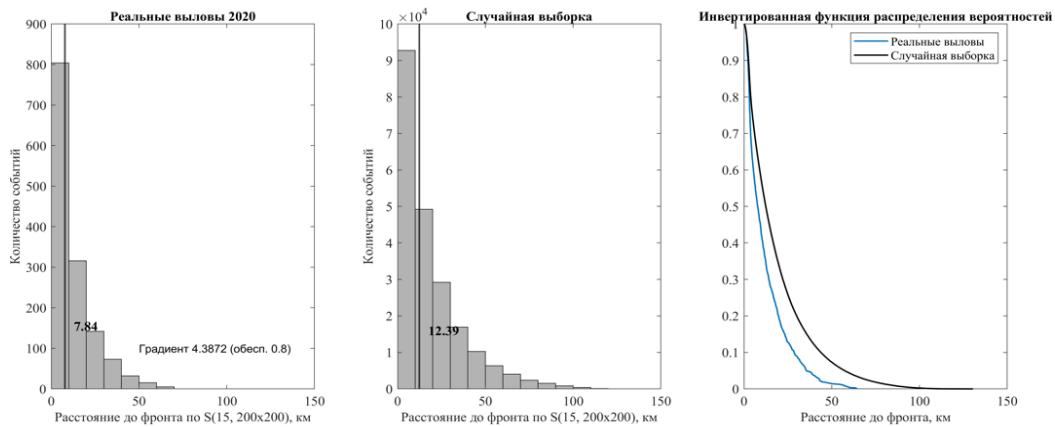


Рис. 2.15. Гистограммы распределения расстояний от мест лова до ближайшей фронтальной зоны градиента S с отсечкой 0.8 без добавления **аддитивных условий** для реальных выловов Японской скумбрии в путину 2020 года (слева) и для случайной выборки в те же даты (по середине). Чёрная линия на гистограммах представляет собой медианные значения для соответствующей выборки. Справа на рисунке изображена инвертированная функция распределения вероятностей для реальной и случайной выборок.

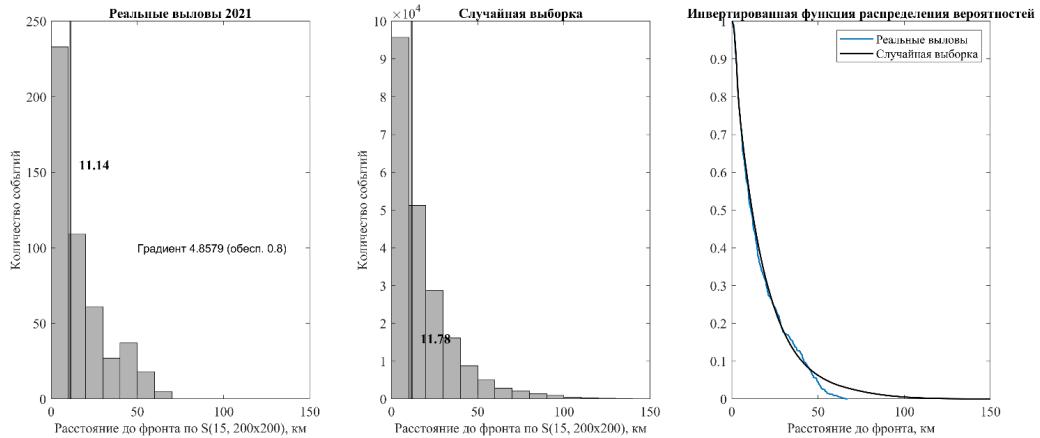


Рис. 2.16. То же, что на рисунке 15, для 2021 года.

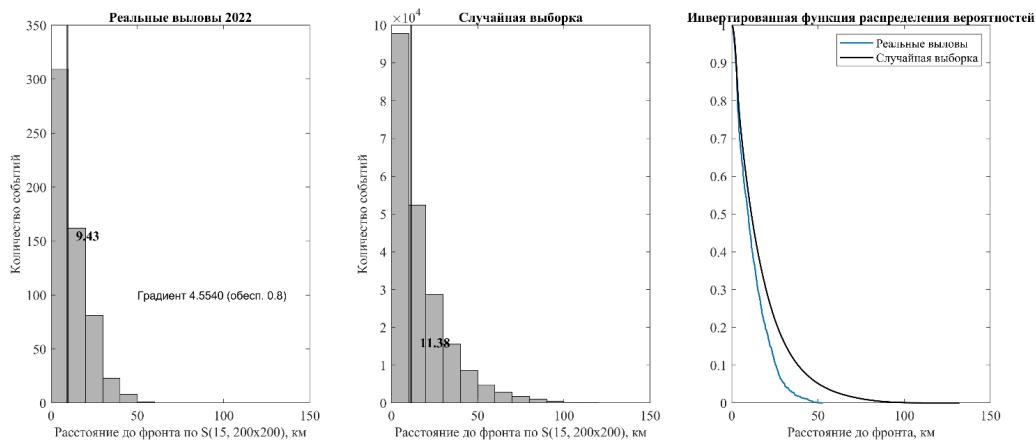


Рис. 2.17. То же, что на рисунке 15, для 2022 года.

В качестве вывода можно утверждать, что лагранжев индикатор S является эффективным инструментом для сужения области поиска. Ключевое доказательство – чётко выраженная тенденция промысловых скоплений избегать участков, отстоящих от S -фронтов далее, чем на 50 км, в отличие от хаотичного распределения случайной выборки.

Следующим этапом исследования стало детальное рассмотрение стороны, с которой ведётся промысел относительно фронта. Этот анализ является ключевым для понимания влияния гидрологических границ на распределение промысловых скоплений и помогает выявить особенности поведения гидробионтов в зоне взаимодействия различных водных масс.

Для начала была выполнена фильтрация фронтальных зон по их размеру, чтобы исключить мелкие, фрагментарные структуры, не оказывающие существенного влияния на промысел. На рисунке 18 представлены все узлы регулярной сетки, в которых величина градиента температуры превышает пороговое значение $0.05^{\circ}\text{C}/\text{км}$, соответствующее 0.8 по функции распределения вероятностей. Такой критерий гарантирует выделение только наиболее выраженных и устойчивых фронтальных зон. Далее, на этом же рисунке 2.18 показаны только крупные кластеры – группы соседних узлов с превышением порога, включающие более одной, десяти, пятидесяти или ста точек.

Аналогичным образом были выделены фронтальные зоны на основе градиента лагранжева индикатора S (рис. 2.19). Интересной особенностью является то, что фронтальные зоны по индикатору S выглядят заметно уже и протяжённее, чем фронтальные зоны, определённые по эйлеровым характеристикам. Это означает, что узкие полосы фронтальных зон по лагранжевым характеристикам отражают более детализированное представление о динамике водных масс и межмасштабных границах, в которых формируются специфические условия циркуляции.

Было решено учитывать только те фронтальные зоны, которые состоят минимум из 10 узлов. Данный подход позволил более чётко выделить и классифицировать крупные фронтальные зоны, что является необходимым для последующего анализа направления промысла относительно «тёплой» или «холодной» стороны, а также для понимания роли динамических процессов в формировании условий обитания и миграции японской скумбрии в исследуемой области. Это важный шаг к интеграции гидродинамических характеристик и промысловой океанографии, позволяющий существенно повысить точность прогноза распределения биоресурсов и эффективность их использования.

После выделения фронтальных зон, состоящих из более чем десяти соседних узлов сетки, проводилось определение значений температуры и лагранжева индикатора S в узлах, расположенных непосредственно под соответствующими фронтальными зонами. Для каждой фронтальной зоны вычислялась медиана значений исследуемой характеристики, что позволяло разделить зону на «холодную» и «тёплую» стороны по температуре, а также на «медленную» и «быструю» по лагранжевому индикатору S . Такое разделение осуществлялось путём сравнения значения характеристики на ближайшем к границе фронтальной зоны узле с медианным значением по всей фронтальной зоне. Анализ проводился индивидуально для каждой выделенной фронтальной зоны.

Далее для каждого места вылова и случайной точки определялось минимальное расстояние до границы ближайшей фронтальной зоны. Затем фиксировалось значение температуры или лагранжева индикатора S в узле, расположенном на этой границе и ближайшем к координате вылова или случайной точке. Если это значение было меньше медианного значения соответствующей фронтальной зоны, вылов относился к «холодной» (или «медленной») стороне фронта, в противном случае – к «тёплой» (или «быстрой») стороне. Такой подход позволил более детально исследовать пространственное распределение промысловых скоплений относительно внутренней структуры фронтальных зон и оценить влияние гидрологических и динамических условий на выбор промысловых площадок.

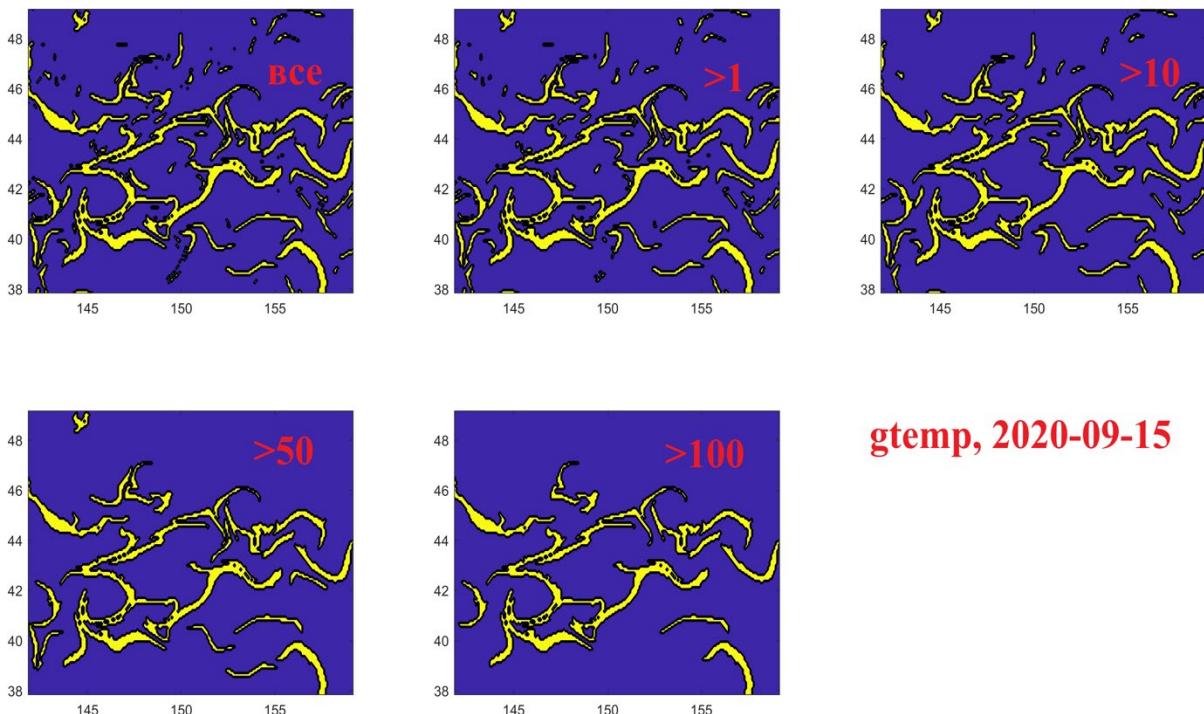


Рис. 2.18. Пример карт при отборе количества точек, определяющих «большую» или «маленькую» фронтальную зону, выделенную по градиенту температуры.

Красными цифрами показано количество точек отсечки

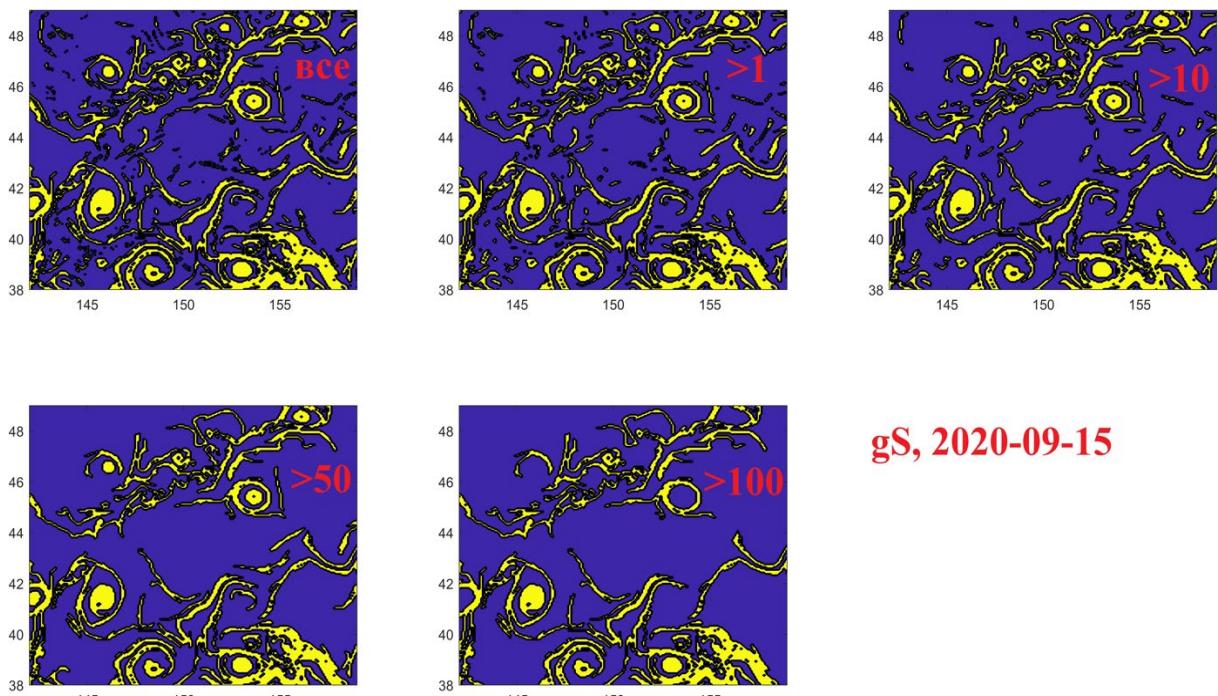


Рис. 2.19. Пример карт при отборе количества точек, определяющих «большую» или «маленькую» фронтальную зону, выделенную по градиенту характеристики S.

На рисунке 2.20 представлены результаты пространственного анализа распределения мест промысла японской скомбрии и случайных точек относительно «тёплой» и «холодной» сторон фронтальных зон, выделенных по градиенту температуры. Верхняя панель иллюстрирует расположение случайно сгенерированных точек, тогда как

нижняя панель демонстрирует фактические координаты выловов за каждый из трёх исследуемых лет: 2020, 2021 и 2022 годы. Анализ показывает, что в каждый из рассматриваемых годов промысловые объекты преимущественно концентрировались с «холодной» стороны температурных фронтов, что свидетельствует о выраженном тяготении выловов к определённой гидрологической стороне фронтальной зоны. При сравнении с распределением случайных точек становится очевидным, что фактические места промысла статистически значимо отклоняются от случайного распределения, подтверждая наличие избирательного выбора рыбами предпочтительных гидрологических условий.

Однако следует отметить годовые различия в направленности тяготения к сторонам фронтов. В 2020 году частично наблюдается тенденция к размещению промысловых скоплений ближе к «тёплой» стороне температурных фронтов, в то время как в 2021 и 2022 годах – к «холодной» стороне. Эта вариабельность может быть обусловлена особенностями гидродинамического режима региона в различные годы, в частности наличием крупного «Хоккайдского» антициклона в 2020 году, который мог сместить или изменить структуру фронтальных зон и, соответственно, повлиять на распределение промысловых скоплений.

На рисунке 2.21 представлены результаты пространственного анализа распределения мест промысла Японской скумбрии и случайно сгенерированных точек относительно «быстрой» и «медленной» сторон фронтальных зон, выделенных по градиенту лагранжева индикатора S . Верхняя панель демонстрирует расположение случайных точек, тогда как нижняя панель отражает фактические координаты выловов за 2020, 2021 и 2022 годы. Анализ показывает, что в 2020 году промысловые объекты значительно чаще располагались с «быстрой» стороны фронтальных зон, что свидетельствует о выраженном тяготении промысла к динамически активным участкам водной массы. Это особенно заметно при сравнении с распределением случайных точек за тот же период, которые демонстрируют более равномерное и неструктурированное размещение. Такое смещение промысла в сторону «быстрых» зон может быть связано с влиянием крупного «Хоккайдского» антициклонического вихря, который формирует специфическую гидродинамическую структуру и способствует концентрации биоресурсов в этих районах.

В 2021 и 2022 годах также наблюдается тенденция тяготения выловов к «быстрой» стороне фронтов, однако она выражена менее ярко, что может отражать изменения в гидрологической обстановке и динамике мезомасштабных структур в регионе. В целом, выявленная связь между местами промысла и «быстрой» стороной фронтальных зон,

выделенных с использованием лагранжева индикатора S , подчеркивает важность динамических характеристик океанической среды для формирования и миграции промысловых скоплений.

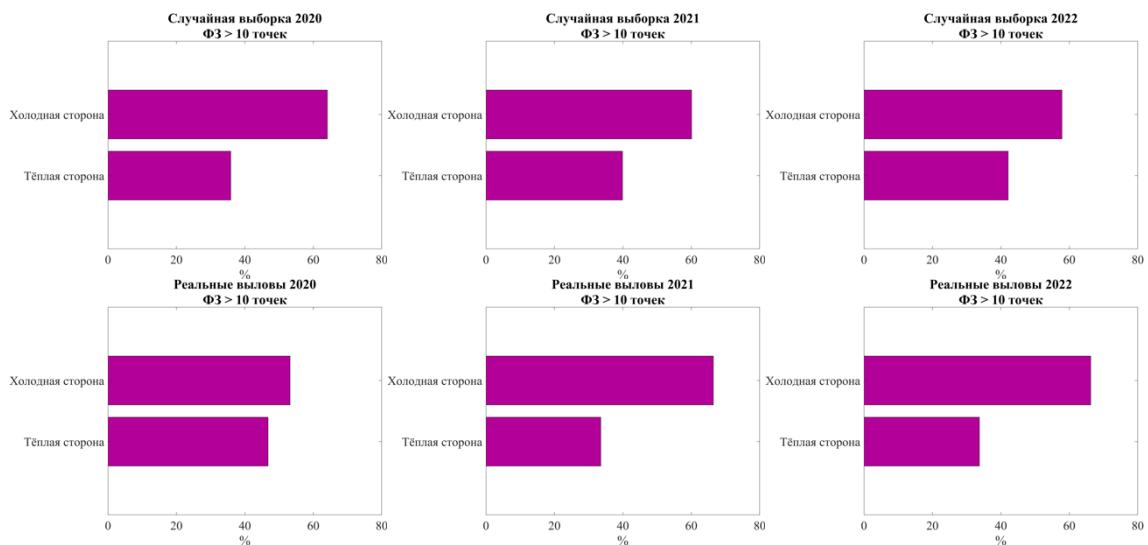


Рис. 2.20. Бинарные диаграммы распределения реальных точек вылова (нижний ряд) и случайной выборки (верхний ряд) до «теплой»/«холодной» сторон фронтальной зоны по градиенту температуры, содержащей > 10 узлов.

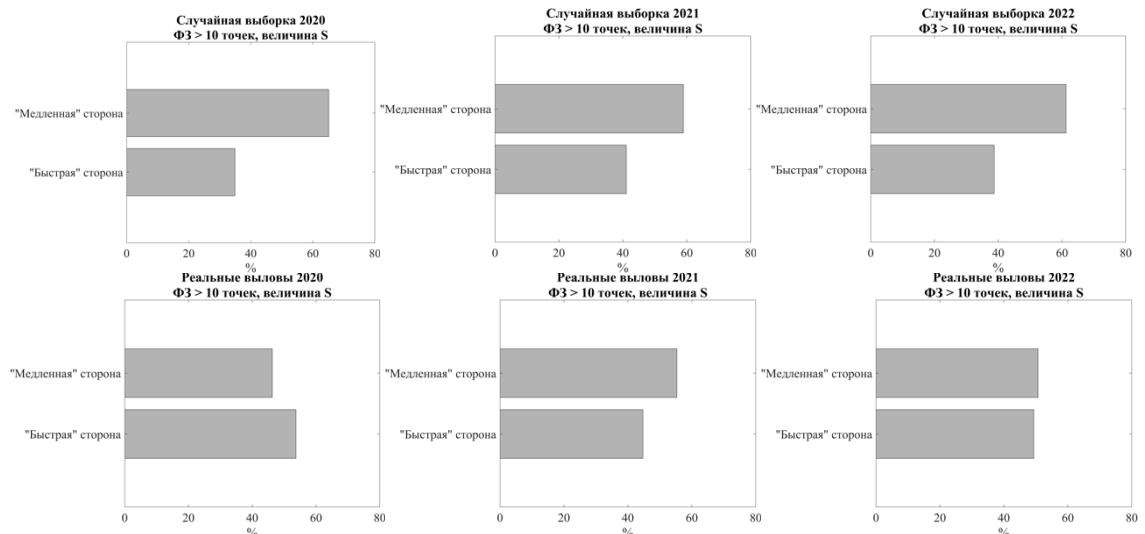
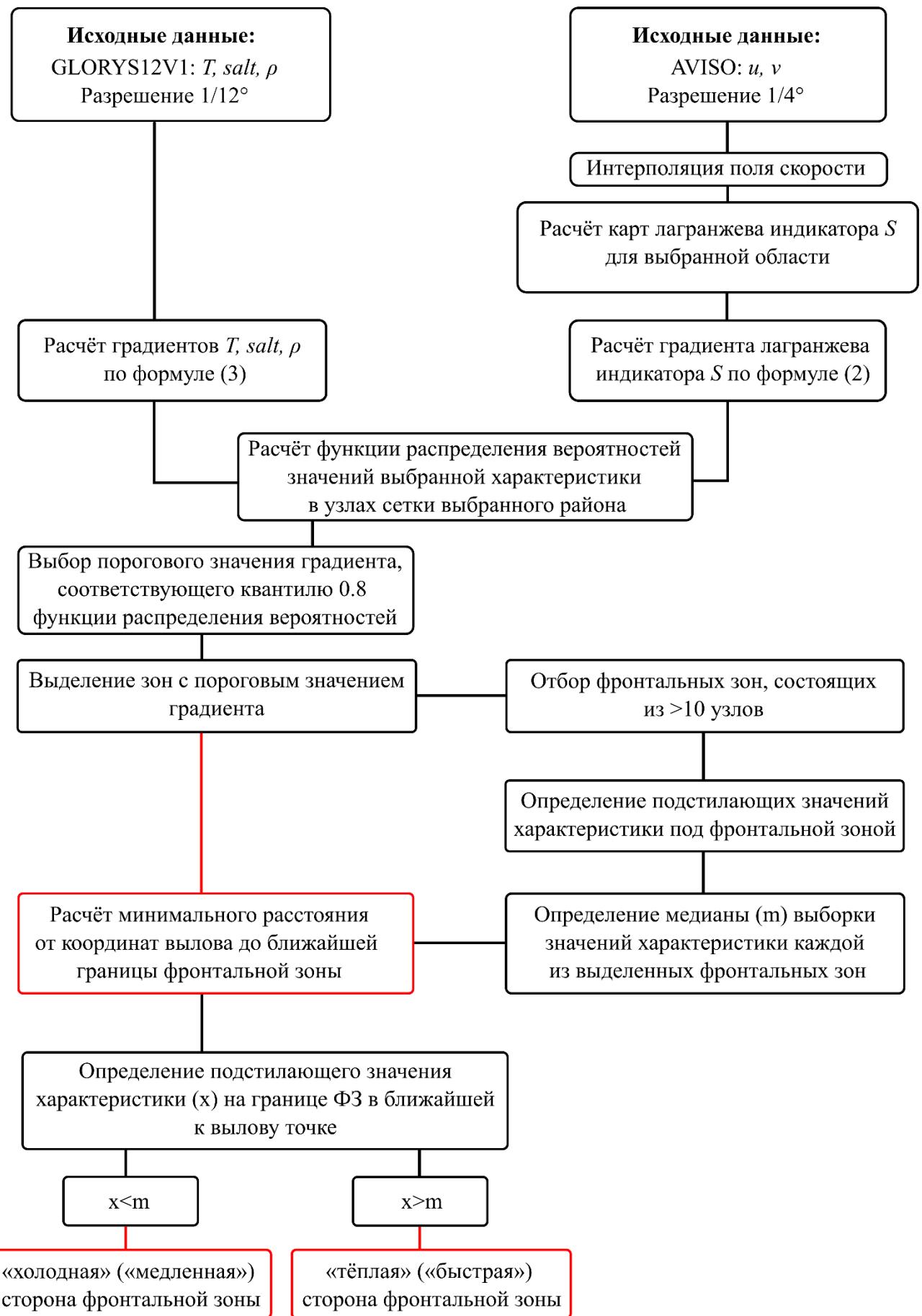


Рис. 2.21. Бинарные диаграммы распределения реальных точек вылова (нижний ряд) и случайной выборки (верхний ряд) до «медленной»/«быстрой» сторон фронтальной зоны по градиенту S , содержащей > 10 узлов.

2.5 Представление алгоритма в виде блок-схемы

Разработанный алгоритм можно представить следующей блок-схемой:



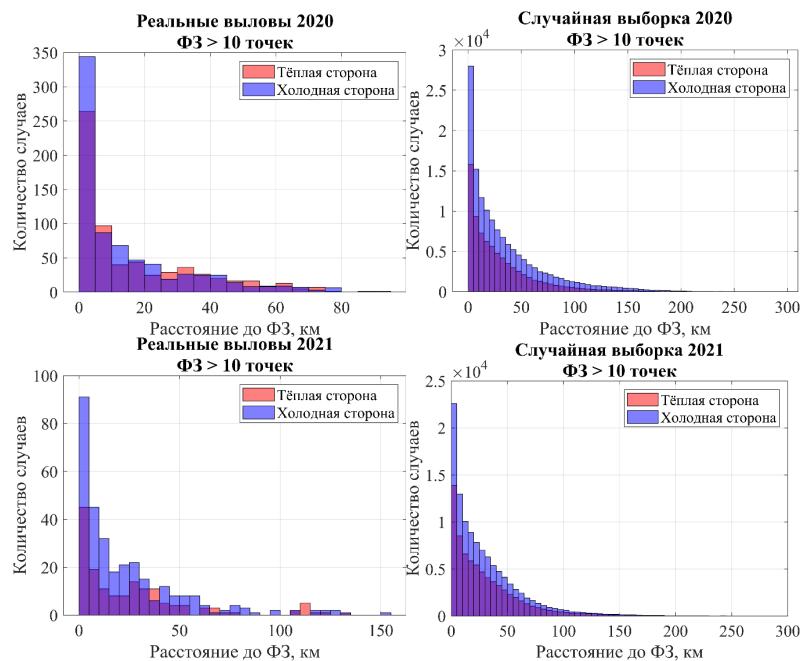
2.6. Пространственное распределение промысловых скоплений относительно фронтальных характеристи

Расчёты расстояний до тёплой/холодной и быстрой/медленной сторон можно визуализировать следующим образом (рис. 2.22).

Анализ распределения скоплений рыбы относительно фронтальных зон показал, что в случайных точках преобладает холодная сторона вихрей. Авторы предполагают, что это связано с особенностью вихревой структуры региона: в этот район преимущественно приходят относительно тёплые вихри, которые, как считается, образуются в районе течения Куросио. У таких тёплых вихрей внутренняя сторона – тёплая, а внешняя – холодная, что и объясняет общее доминирование холодных сторон в данных.

Поведение же скомбрии оказывается более сложным. В разные годы рыба демонстрирует разные предпочтения: в один сезон она может держаться преимущественно на холодной внешней стороне вихря, а в другой – смещаться к его тёплой внутренней стороне. Таким образом, сторона вихря сама по себе не является надежным индикатором для поиска рыбы, так как её предпочтения меняются.

Из-за того, что данные охватывают всего три года, сделать однозначный вывод о том, к какой стороне – тёплой или холодной – скомбрия тяготеет в целом, невозможно. Для выявления устойчивой закономерности необходимы дополнительные исследования на более обширном материале.



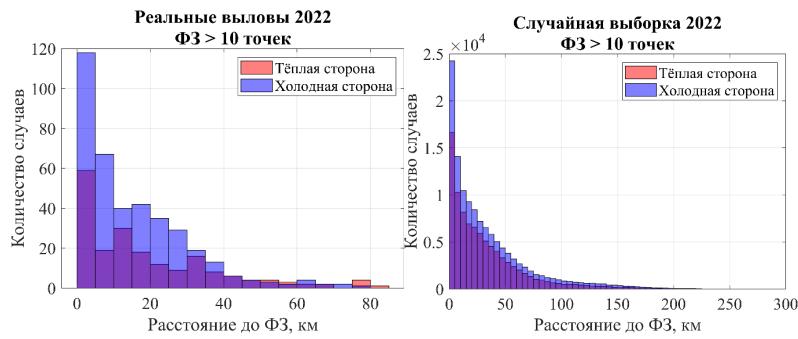


Рис. 2.22. Гистограммы распределений по расстояниям до ближайшей границы фронтальной зоны, с учетом с какой стороны – теплой/холодной расположены точки.

Аналогичным образом можно визуализировать расчёт до быстрых/медленных сторон фронтальных зон, выделенных по градиенту лагранжевой характеристики S (рис. 23).

В 2020 году наблюдается ясное предпочтение японской скумбрией быстрых сторон фронтальных зон, однако в 2021 и 2022 годах этот эффект выражен не так явно.

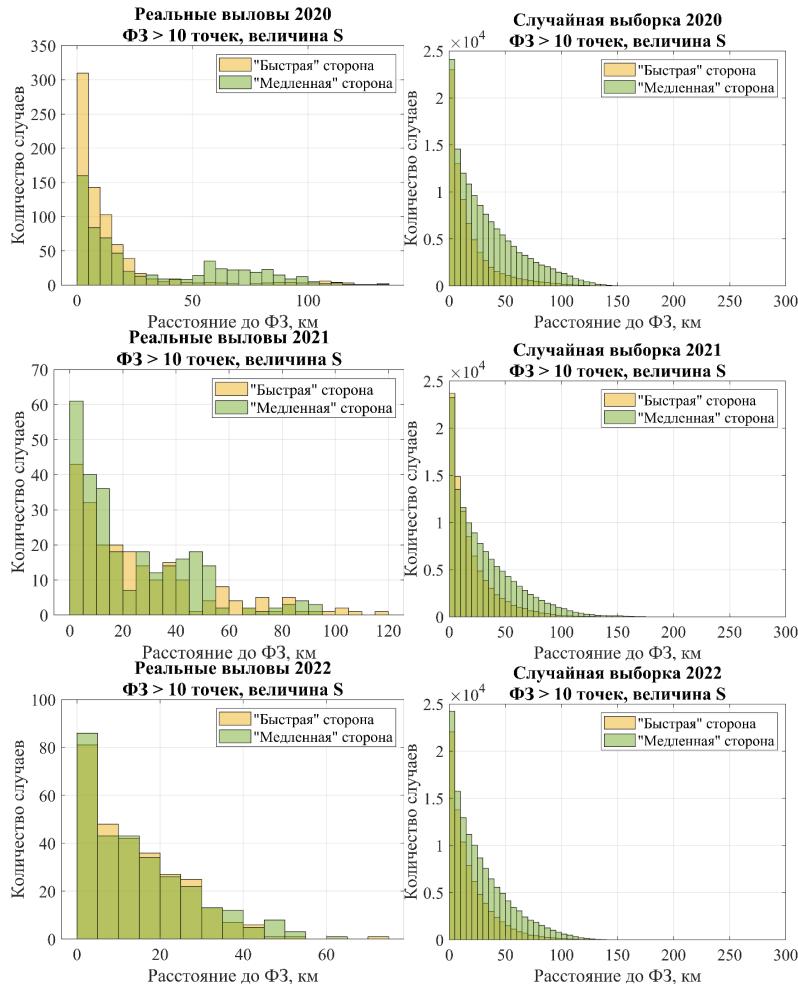


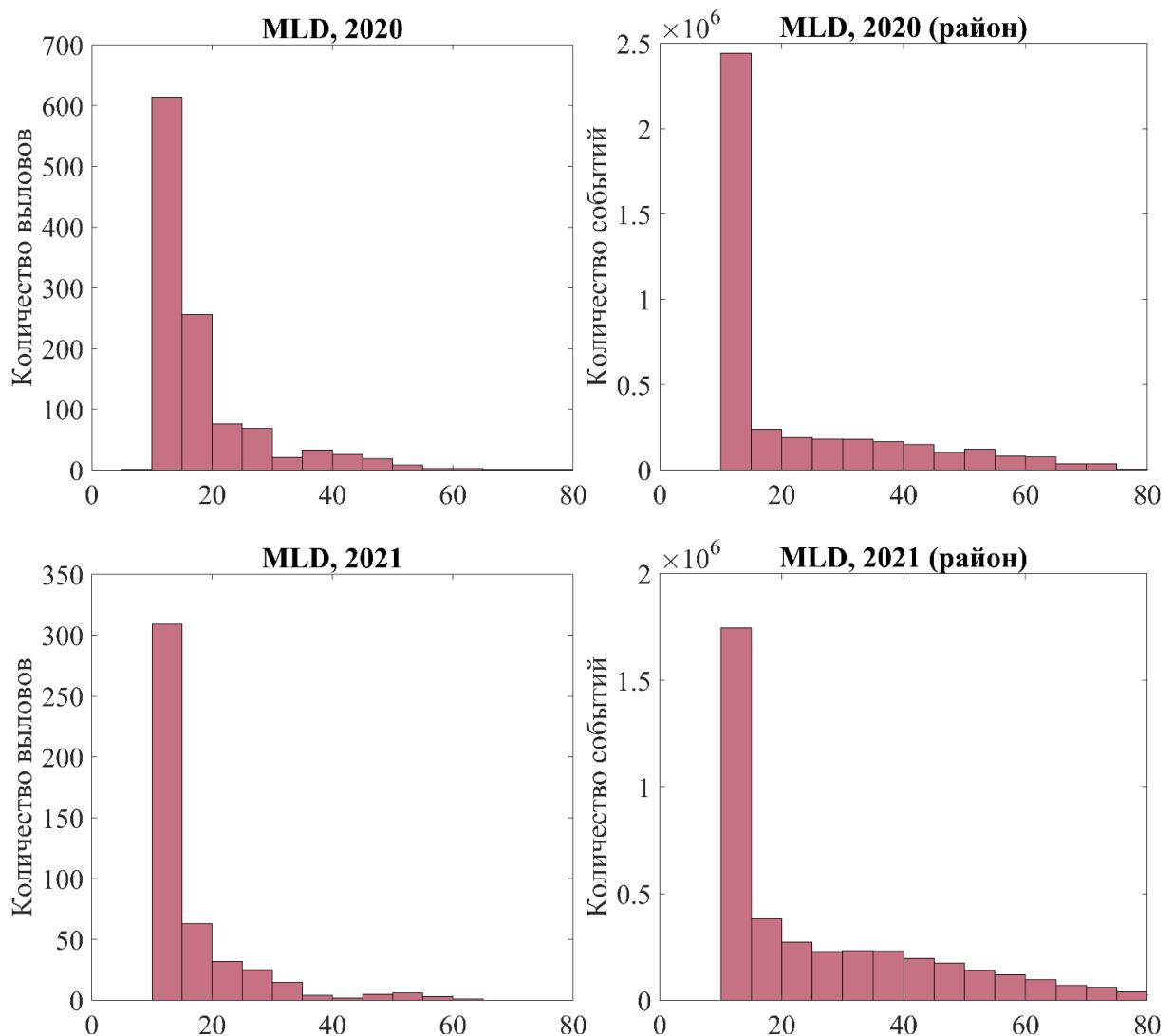
Рис. 2.23. Гистограммы распределений по расстояниям до ближайшей границы фронтальной зоны, с учетом с какой стороны – быстрой/медленной расположены точки.

Для более полного понимания зависимости распределения скоплений рыб от сторон фронтальных зон необходимо иметь больше данных о промысле.

2.7. Анализ распределений по подстилающим значениям квазиоднородного слоя (Mixed Layer Depth, MLD) под пунктами вылова и под узлами исходной сетки поля характеристики для всей зоны промысла

На рисунке 2.24 представлены гистограммы подстилающих значений величины MLD (*mean layer depth*) в местах промысла и под узлами сетки в исследуемом районе. Распределение MLD по узлам сетки охватывает весь диапазон значений, характерный для исследуемого региона, включая значительную долю случаев с большой глубиной перемешивания (>60 м). В отличие от него, распределение для точек траления является существенно усеченным.

Наиболее значимым является тот факт, что в местах проведения тралений практически не фиксируются значения MLD, превышающие 60 метров. Это формирует резкую границу в правой части гистограммы промысла.



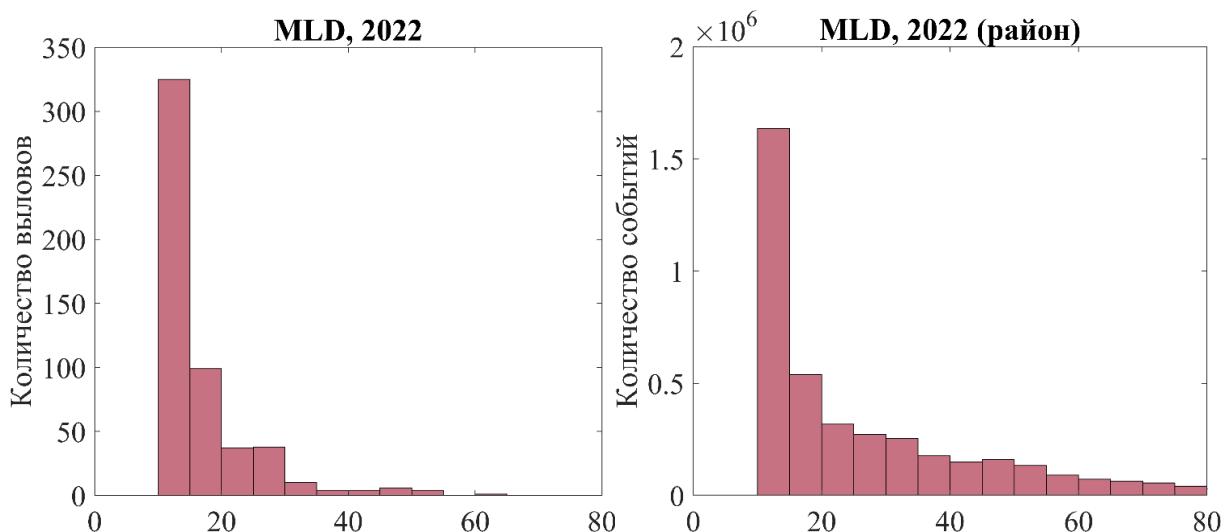


Рис. 2.24. гистограммы подстилающих значений величины MLD (*mean layer depth*) в местах промысла и под узлами сетки в исследуемом районе.

Таким образом, данное распределение позволяет предположить, что промысловая деятельность сосредоточена в районах с относительно небольшой глубиной перемешивания. Это может быть связано с тем, что такие условия являются более благоприятными для формирования кормовой базы или концентрации самих промысловых объектов. Таким образом, выборка данных в точках промысла является нерепрезентативной для всего района в целом и отражает специфические биотические или абиотические предпочтения флота.

2.8. Градиент лагранжевой характеристики S – динамические фронты

На рисунке 2.25 представлены распределения значений градиентов, рассчитанных для лагранжевой характеристики S и температуры поверхности моря по узлам расчетной сетки в пределах исследуемого района за промысловый сезон каждого года наблюдений. Анализ показывает, что диапазон изменчивости градиента лагранжевой характеристики S составляет от 0 до 22, в то время как величина градиента температуры варьируется в интервале от 0 до 0.3 °C/км. Полученные диапазоны значений демонстрируют существенные различия в динамических и термических характеристиках фронтальных зон в регионе в течение промыслового периода.

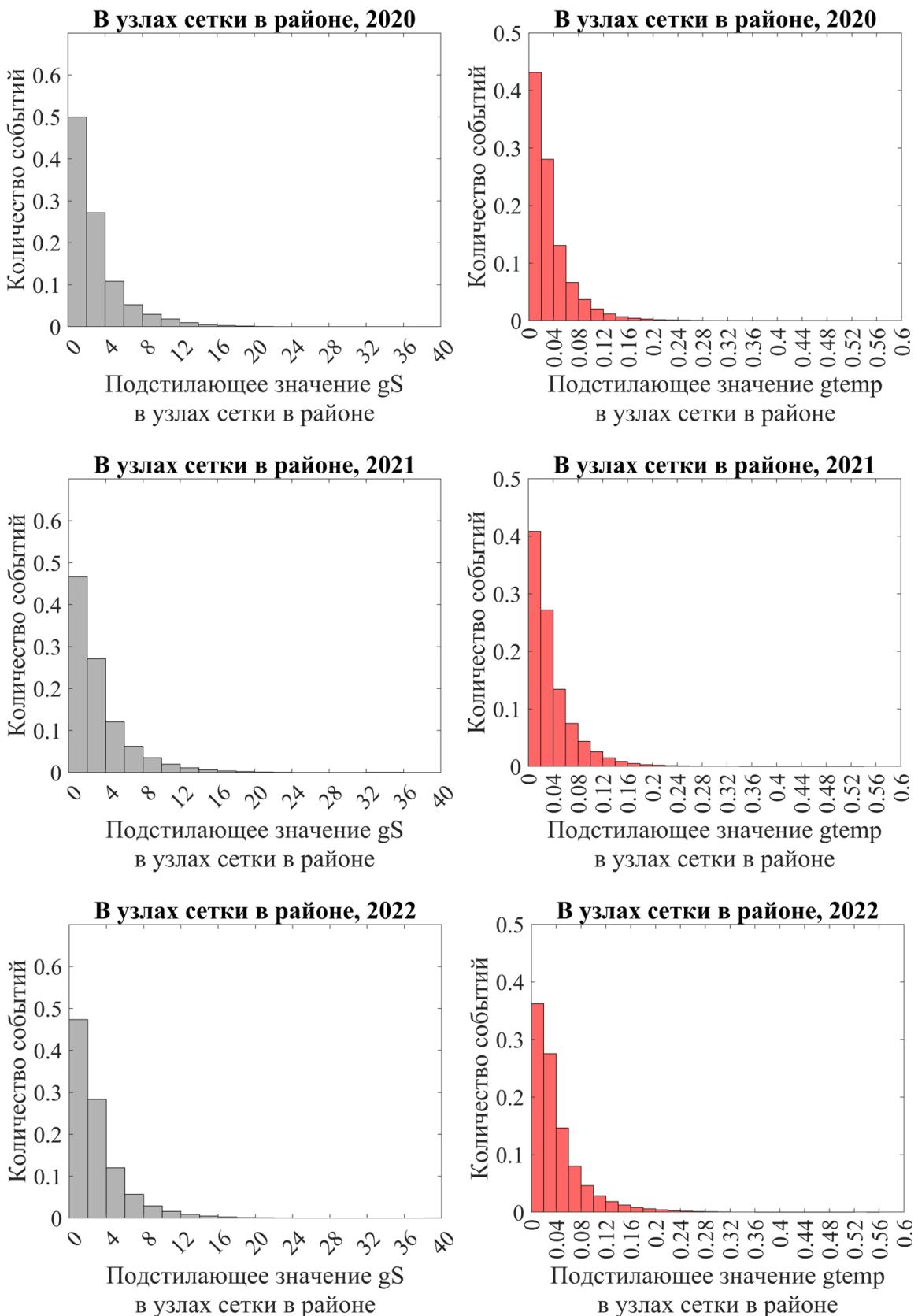


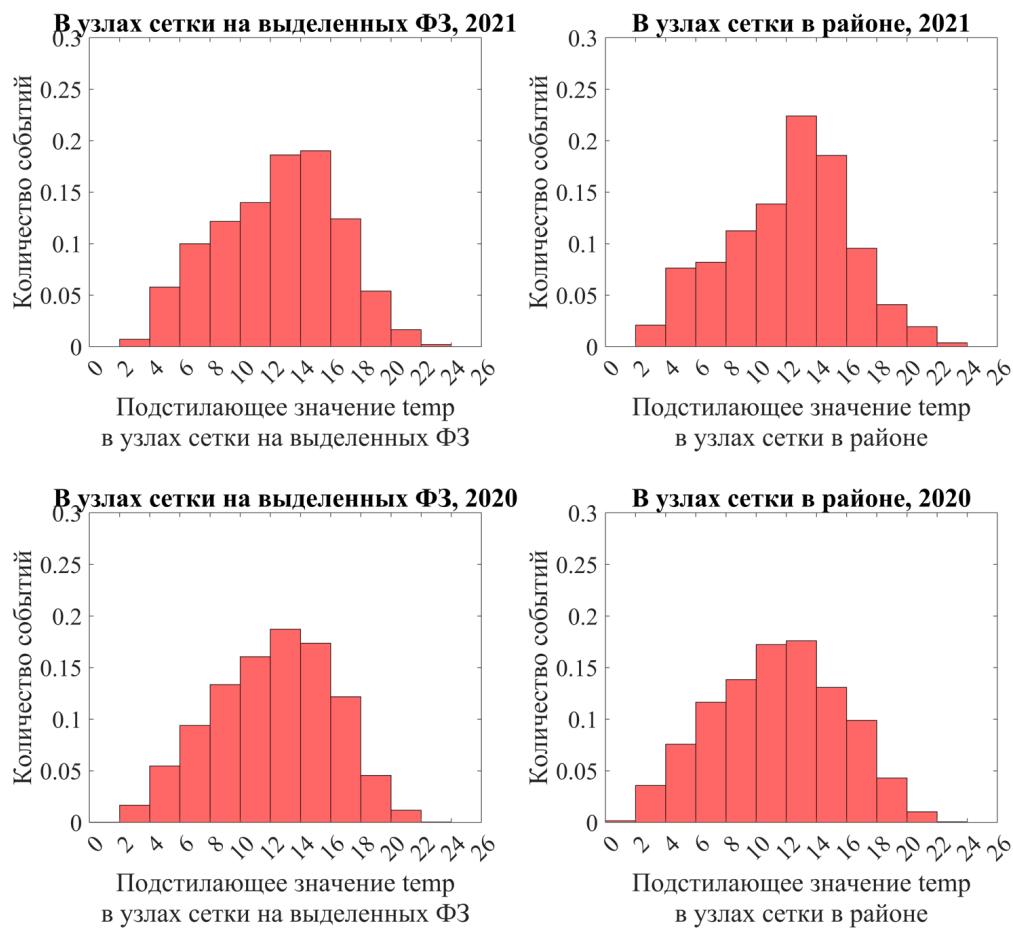
Рис. 2.25. Значения градиентов, рассчитанных для лагранжевой характеристики S и температуры поверхности моря по узлам расчетной сетки в пределах исследуемого района за промысловый период каждого года наблюдений.

2.9. Особенности гидрологических условий во фронтальных зонах

В данном разделе проводится сопоставление гидрологических характеристик, наблюдаемых во фронтальных зонах, с показателями, свойственными всему исследуемому району, с целью установить характерные диапазоны значений в условиях изменчивости гидрологической обстановки.

Анализ термических условий формирования фронтальных зон показал, что они не приурочены к специфическим температурным диапазонам (рис. 2.26). Распределение температур внутри фронтальных зон статистически не отличается от общего фонового распределения в исследуемом регионе. Это свидетельствует о том, что фронтогенез в данной акватории является в первую очередь результатом динамических процессов, а не следствием контакта водных масс с экстремальными термохалинными свойствами.

Таким образом, можно заключить, что фронтальные зоны формируются на градиентах, возникающих между любыми водными массами, присутствующими в регионе. Наблюданное отсутствие доминирования либо аномально тёплых, либо холодных вод в ядре фронтов подтверждает вывод о том, что весь диапазон вод региона в равной степени вовлечен в процессы фрontoобразования.



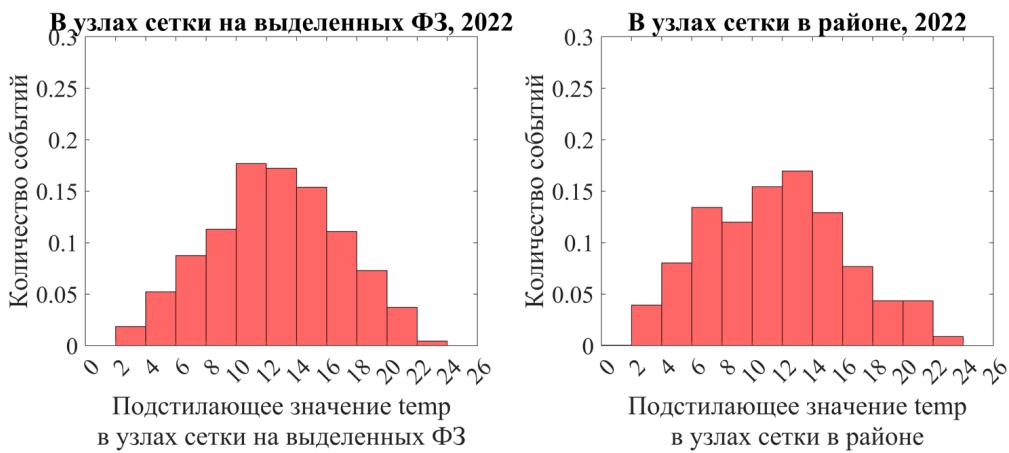


Рис. 2.26. Распределение температуры поверхности океана внутри фронтальных зон и в узлах сетки района.

Для анализа мы сравниваем распределения значений индикатора S , взятых в точках вылова, вдоль границ фронтальных зон (до которых определяется расстояние), в случайно выбранных точках и по всей промысловой зоне, основываясь на узлах исходного поля индикатора S .

Анализ распределения подстилающих значений лагранжевой характеристики S выявил наличие вторичного пика в распределениях, соответствующих точкам вылова и ближайшим к ним границам фронтальных зон (рис. 2.27-2.29). Данное наблюдение свидетельствует о существовании специфического диапазона динамических условий, предпочтительных для образования промысловых скоплений.

Распределение значений S в точках реального промысла достоверно отличается от фонового распределения, характерного для узлов расчетной сетки по всему району. Ключевым отличием является смещение основного максимума в распределении для реальных выловов относительно случайной выборки, что указывает на избирательный характер промысловой деятельности и возможную связь концентрации рыбы с определенными динамическими режимами.

Однозначная интерпретация физических причин, обуславливающих формирование вторичного пика и смещения моды распределения, в настоящее время затруднительна. Для установления статистически значимых закономерностей и выявления механизмов, управляющих данной приуроченностью, необходимы дальнейшие исследования на расширенном массиве данных.

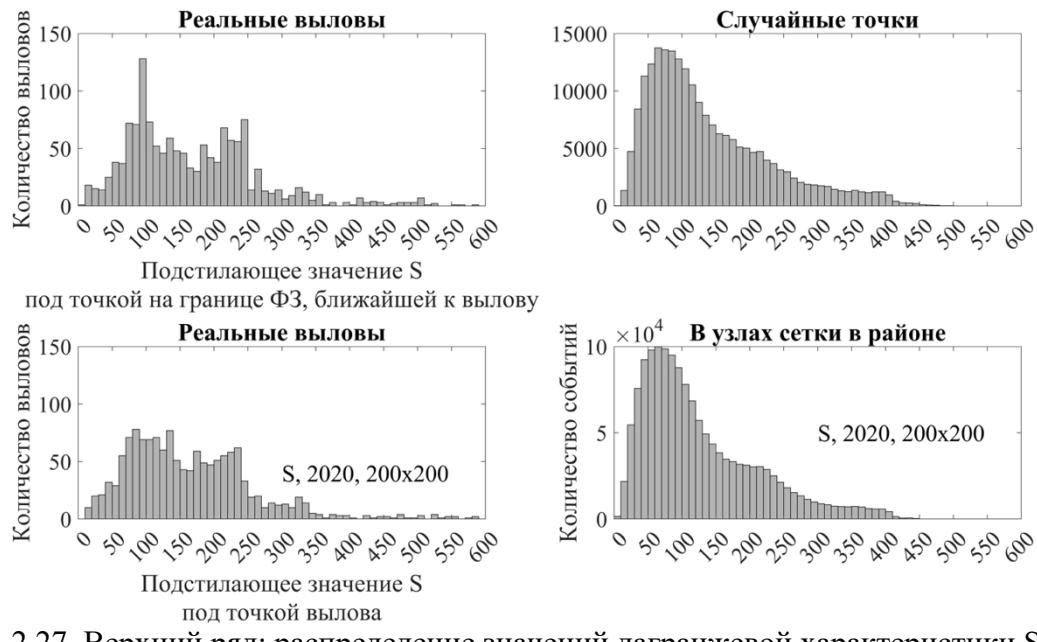


Рис. 2.27. Верхний ряд: распределение значений лагранжевой характеристики S под точкой на границе фронтальной зоны по градиенту S, ближайшей к вылову, для реальный выловов и случайной выборки. Нижний ряд: подстилающее значение S под точкой вылова и в узлах сетки района.

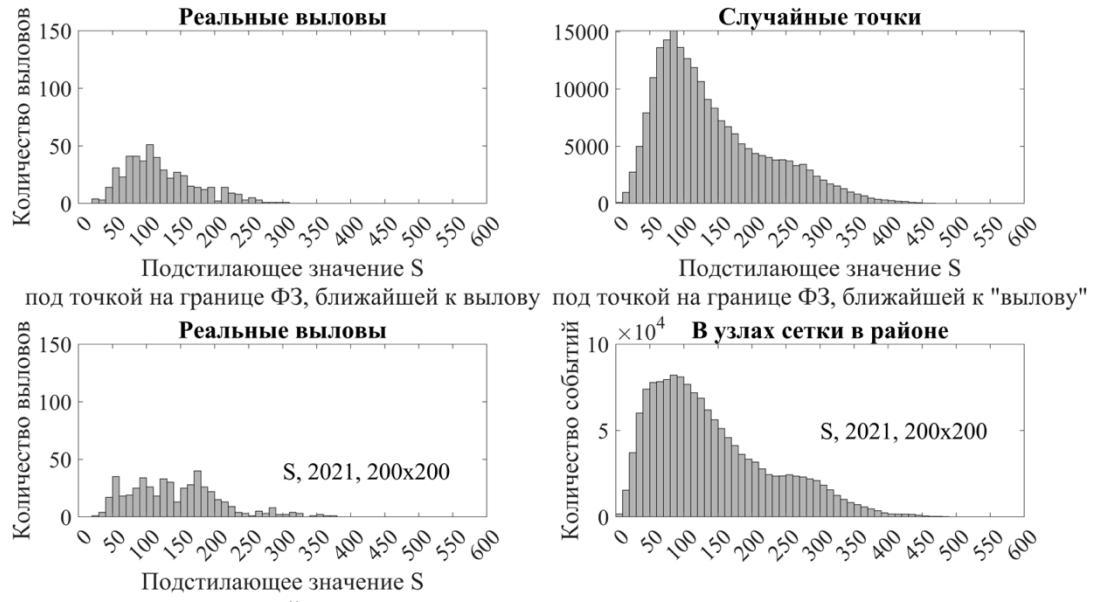


Рис. 2.28. То же, что на рисунке 27, для 2021 года.

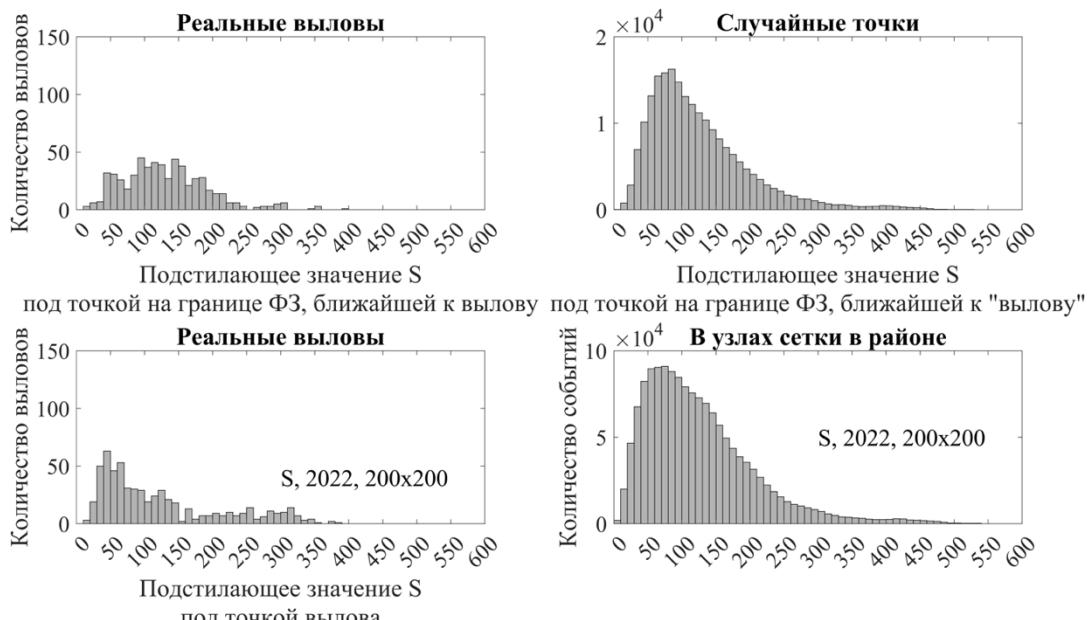


Рис. 2.29. То же, что на рисунке 27, для 2022 года.

2.10 Публикации

For consideration in Fisheries Oceanography

Page 1 of 31

Fisheries Oceanography

Original Article

Frontal Zones and Fishing Aggregations of Chub Mackerel in the South Kuril Area

Submission ID d1d7d164-f17a-482b-a2a2-f544330a10ec

Submission Version Initial Submission

PDF Generation 30 Jun 2025 08:51:21 EST by Atypont ReX

Authors

Dr. M.A. Lebedeva
Corresponding Author
Submitting Author

 [ORCID](https://orcid.org/0009-0002-2044-9625)
<https://orcid.org/0009-0002-2044-9625>

Dr. T.V. Belonenko

 [ORCID](https://orcid.org/0000-0003-4608-7781)
<https://orcid.org/0000-0003-4608-7781>

Dr. M.V. Budyansky

Affiliations

- Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
- V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Affiliations

- Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Affiliations

- Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Статья подана в печать.

3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА ФЕНОЛОГИЮ ВЕСЕННЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

3.1 Влияние фенологии весеннего цветения фитопланктона на продуктивность и условия промысла

Фенология весеннего «цветения» (ВЦ) фитопланктона является одним из важнейших параметров, описывающих сезонный цикл морских экосистем, поскольку даже слабые изменения в сроках и интенсивности ВЦ фитопланктона вызывают нарушение баланса между трофическими уровнями пищевой цепи, что в итоге отражается на численности промыслового запаса (Edwards, Richardson, 2004; Koeller et al., 2009; Sasaoka, Chiba, Saino, 2011). Например, сроки ВЦ определяются температурными условиями поверхностного слоя, в которых будет кормиться зоопланктон, поедающий фитопланктон – температура водной толщи весной имеет решающее значение для физиологии зоопланктона и личинок рыб, поскольку колебания температуры окружающей среды контролируют скорость процессов метаболизма (Hunt Jr et al., 2002).

Моря Северо-Европейского бассейна (СЕБ) – Баренцево, Норвежское и Гренландское – являются одними из наиболее продуктивных районов Мирового океана (Antoine, André, Morel, 1996). Изучение фенологии ВЦ фитопланктона в данном регионе важно не только для понимания процессов продуцирования органического вещества фитопланкtonом в условиях современного изменения климата, но и фиксации им растворённого в воде углекислого газа (Carmack, Wassmann, 2006). «Цветение» фитопланктона обычно проявляется в виде сезонного цикла с момента увеличения биомассы, достижения пика «цветения» и окончание «цветения», определяющее конец вегетационного периода (Racault et al., 2012; Siegel, Doney, Yoder, 2002). В высоких и умеренных широтах весной количество солнечного света увеличивается, что ускоряет процессы фотосинтеза фитопланктона, который поглощает биогенные вещества, накопившиеся в верхнем слое водной толщи во время зимней конвекции. Согласно гипотезе «критической глубины» Х.У. Свердрупа, ВЦ начинается, когда глубина верхнего перемешанного слоя становится меньше глубины критической освещённости – такого горизонта, выше которого скорость фотосинтеза фитопланктона превышает скорость деструкции органического вещества при дыхании (Звалинский et al., 2022; Brody, Lozier, Dunne, 2013; Sverdrup, 1953).

Морской лёд и ветровое перемешивание также являются одними из важных факторов, определяющих сроки и продолжительность ВЦ в морях высоких широт (Napp, Kendall, Schumacher, 2000). Как было показано для прибрежных вод Антарктического полуострова (Ferreira et al., 2024), изменения в биомассе фитопланктона и динамике «цветения» в весенний период, могут быть объяснены долгосрочным сокращением ледового покрова, поскольку происходило увеличение числа дней, в которые акватория была свободна от льда и на поверхность моря поступало больше солнечного света, а также могло развиваться более интенсивное ветровое перемешивание с поднятием с нижележащих слоев биогенных элементов в эвфотический слой. Соответственно, были более благоприятные условия для продуцирования органического вещества, и ВЦ могло начаться раньше. Соответственно, к лимитирующему факторам ВЦ в морях СЕБ можно отнести: фотосинтетически активную радиацию (ФАР); количество БЭ; температуру поверхности воды (ТПО); глубину эвфотического слоя; глубину перемешанного слоя; концентрацию морского льда и силу ветрового перемешивания. Кроме того, время начала ВЦ в Северной Атлантике связывают с атмосферной изменчивостью ветрового перемешивания и тесно связанный с этим индекс североатлантического колебания (NAO) – зимние значения NAO могут повлиять на дату начала ВЦ, однако связь слабая ($r^2 = 0.35$) (Ueyama, Monger, 2005). Изменение климата может косвенно изменить время и размер «цветения» посредством механизмов, влияющих на состояние водной толщи, таких как доступность света, поступление и соотношение питательных веществ (Friedland et al., 2018; Kahru et al., 2011).

ВЦ фитопланктона в морях СЕБ обычно начинается в конце марта, достигая своего пика в конце апреля (Malysheva, Lobanova, 2024; Qu, Gabric, Matrai, 2006; Silva et al., 2021). При оценке многолетней изменчивости фенологических параметров в общем для района СЕБ была определена значимая тенденция к увеличению интенсивности ВЦ за последние 25 лет (+ 0.02 мг/м³ в год) (Malysheva, Lobanova, 2024). Было показано, что ранние, короткопериодные и менее интенсивные ВЦ характерны для областей проникновения теплых атлантических вод в исследуемый район. Более поздние, длительные и интенсивные ВЦ (позже 110 дня года, более 50 дней и более 3 мг/м³ соответственно) наблюдались в зоне полярного фронта в Гренландском и Баренцевом морях. Установлено, что в Баренцевом море и вдоль Скандинавского полуострова ранние ВЦ являлись более продолжительными и интенсивными, тогда как в западной части Норвежского моря и на юго-востоке Гренландского моря ранние ВЦ имели меньшую продолжительность. Однако, для большего понимания процесса важно знать какие факторы влияют на фенологию ВЦ, поэтому в данной работе оценивается связь фенологических параметров (посредством

корреляционного анализа и трендов) ВЦ фитопланктона с абиотическими факторами (ФАР, ТПО и концентрация морского льда, скорость и направление ветра) в районах СЕБ с наиболее частыми ВЦ по данным дистанционного зондирования за период 1998–2022 гг.

Предложен новый пороговый метод определения сроков весеннего «цветения» (ВЦ) т.е. ежегодного увеличения биомассы морского фитопланктона, имеющий в среднем 88% совпадений с фактическими данными. Используя этот метод, определены фенологические параметры (сроки, продолжительность, интенсивность) ВЦ за период 1998-2022 гг. в Норвежском море (как части Северо-Европейского бассейна). За последние 25 лет интенсивность ВЦ в данном районе несколько увеличилась – тренд составил 0,02 мг/м³ в год. Однако, значимых сдвигов в сроках ВЦ в районе обнаружено не было. В статье также ценена зональная изменчивость фенологических характеристик ВЦ.

Фенология весеннего «цветения» (сроки, продолжительность, интенсивность) фитопланктона представляет особый интерес для промысловых задач, поскольку определяет особенности развития трофической цепи в акваториях Мирового океана (МО) (Platt et al., 2003). Известно, что первичное продуцирование морского фитопланктона является неотъемлемым процессом для развития промыслового потенциала МО, поскольку фитопланктон – это первое звено его трофической цепи. Синтезируя органические соединения из неорганических в процессе фотосинтеза, он создаёт материал для развития своих клеток, тем самым увеличивая фитомассу, являющуюся кормом для последующих трофических уровней, включая основные промысловые объекты Норвежского моря: скумбрию, сельдь и путассу.

В морях Северо-Европейского бассейна – Баренцево, Норвежское и Гренландское моря – во время ВЦ происходит формирование большей части годовой первичной продукции (Qu et al., 2016). В МО скорость фотосинтеза не является постоянной во времени и пространстве; пространственная и фенологическая изменчивости (сроки и продолжительность «цветения») возникают из-за сложных биофизических факторов, контролирующих «цветение» фитопланктона через разность между скоростью размножения клеток и смертностью, связанной с естественной смертью и выеданием (Friedland et al., 2018).

Для определения сроков и продолжительности ВЦ в Норвежском море использовались спутниковые данные цвета океана из базы Ocean Colour Climate Change Initiative (OC CCI), версия 5, которые представляют собой объединённую информацию с датчиков MODIS, MERIS, OLCI, SeaWiFS и VIIRS: концентрация хлорофилла-а (Хл-а)

(мг/м³) за период 1998-2022 гг. с пространственным разрешением 4x4 км и временным разрешением 8 дней.

Классические пороговые методы определения сроков «цветения», основанные на биомассе фитопланктона (Racault et al., 2012) или на кумулятивной биомассе (Silva et al., 2021), как правило, полагаются на наличие полного годового ряда данных, что ограничивает их применение в высоких широтах из-за отсутствия зимних значений в спутниковых данных. В случае определения ВЦ в Норвежском море не представляется возможным использование классических пороговых методов, поскольку данных за зимние месяцы недостаточно. Поэтому в данной работе была предпринята попытка определения сроков ВЦ по датам, в которые была зафиксирована концентрация Хл-а равная 25%-ому значению концентрации первого пика Хл-а в рассматриваемом временном ряду с марта по июль. Второй и последующие пики не рассматривались – такие вспышки относились к вторичному «цветению». Значение в 25% было выбрано на основании рассмотренной случайной выборки – 160 временных рядов концентрации Хл-а в разных точках рассматриваемого района за весь период 1998-2022 гг. За дату начала никогда не брались первые значения временного ряда, поскольку по интерполированным значениям в начале ряда невозможно понять, происходило ли заметное увеличение концентрации Хл-а до или нет. В 86% рассмотренных случаев предложенный пороговый метод верно определил сроки ВЦ.

В Норвежском море выражено широтное распределение даты начала ВЦ: раньше всего (70-90 дней) ВЦ развивалось в низких широтах района (< 70° с.ш.); чем севернее, тем позже было ВЦ, что, вероятно, связано с отступлением кромки льда. Также, на сроки ВЦ в Норвежском море заметно повлияло проникновение тёплых атлантических вод. ВЦ были менее продолжительными (< 40 дней) в более тёплых и солёных атлантических водах, огибающих Скандинавский полуостров. Пространственное распределение осредненных значений дней пика ВЦ практически повторило распределение даты начала ВЦ: более ранние пики отмечены в прибрежных водах Скандинавского полуострова. Области с более частой облачностью (низкие значения ФАР в высоких широтах) соответствовали более поздним дням пика ВЦ.

В каждой ячейке сетки исследуемого района проводилась оценка корреляционной связи даты начала ВЦ с продолжительностью и интенсивностью. Корреляция Пирсона рассчитывалась в ячейках сетки с минимум 8 обнаруженными ВЦ. Для анализа использовались только значимые корреляции с уровнем значимости $p < 0.05$. Вдоль Скандинавского полуострова отмечена значимая отрицательная связь – чем раньше

начиналось ВЦ, тем дольше оно длилось. В центральной части Норвежского моря наблюдалась противоположная картина (значимая положительная корреляция): более ранние ВЦ были короткими, чем позже – тем дольше. Значимая положительная связь даты начала ВЦ с интенсивностью доминировала в основном в центральной части Норвежского моря. Такое распределение говорит о том, что ВЦ, начавшиеся позже, были более интенсивными, чем те, что происходили ранее.

Полученное пространственное распределение корреляционной связи между датой начала ВЦ и его продолжительностью и интенсивностью может быть связано с тем, что в глубоком Норвежском море, где в среднем значения концентрации Хл-а во время ВЦ были невысокие, весенняя вспышка «цветения» происходит раньше с увеличением фотосинтетически-активной радиации (ФАР) весной, но быстро заканчивается, поскольку после установления стратификации прекращается поступление биогенных элементов (БЭ) в эвфотический слой, что отражается на процессах жизнедеятельности фитопланктона, и, соответственно, на его способности к фотосинтезу (Friedland et al., 2016). Кроме того, одной из причин непродолжительных поздних ВЦ также может являться наложение фазы развития зоопланктона, выедающего фитопланктон (Platt et al., 2003, Racault et al., 2012, Friedland et al., 2016).

В регионе Северо-Европейского бассейна, включая Норвежское море, наблюдалась тенденция к увеличению интенсивности ВЦ за последние 25 лет (в среднем увеличение шло на 0.02 мг/м³ в год), что можно связать с положительным трендом температуры поверхности океана (ТПО) и ФАР, а также с сокращением концентрации льда – площадь открытых вод расширялась в совокупности с увеличением потока солнечной радиации. В отдельные годы интенсивность снижалась при более сильных ветрах. Остальные фенологические параметры были более стабильны во времени, но отмечались особенности межгодовой изменчивости в зависимости от параметров среды: ВЦ происходило раньше в годы с высокими ТПО, ФАР и меньшим количеством льда, при положительной фазе климатического индекса Северо-Атлантического колебания (NAO) в предшествующую зиму, тогда как холодные зимы задерживали наступление ВЦ, что происходило в годы с отрицательной фазой NAO; чем прохладнее было во время ВЦ, тем менее продолжительно оно происходило.

Анализ многолетней изменчивости фенологических параметров, осреднённых по широтам, показал, что сдвиги в сроках ВЦ, как правило, проявлялись на всех широтах. В периоды 2003-2007, 2010-2012, 2015-2019, 2022 гг. наблюдались более ранние даты начала и пика ВЦ. Позже ВЦ происходило в 1999, 2009, 2013, 2020-2021. Вероятно,

предшествующее «цветению» сильное ветровое перемешивание способствовало подъёму ВЭ в эвфотический слой, что в совокупности с интенсивным поступлением света способствовало ускоренному развитию ВЦ морского фитопланктона. Большой прогрев способствовал более быстрому очищение акватории ото льда и ускоренным процессам конвекции при таянии льда, что способствовало более раннему «цветению». Продолжительность ВЦ была наибольшая по всем широтам в 1998-2001, 2016-2017, 2019, 2021 гг. Меньшая продолжительность ВЦ наблюдалась в 2005, 2010, 2018, 2020 гг. По всей видимости, на продолжительность ВЦ в большей степени могли повлиять изменения в температурном режиме и силе ветрового перемешивания вод, что было отмечено ранее (Friedland et al., 2012). Отсутствие вертикального перемешивания под действием ветра, по-видимому, могло способствовать поддержанию роста клеток фитопланктона, продлевая ВЦ (Townsend et al., 1992).

Представленное исследование имеет ключевое значение для промысла рыб, поскольку фенология весеннего «цветения» фитопланктона — основного продуцента морских экосистем — напрямую определяет особенности развития всей трофической цепи. Фитопланктон является первым звеном этой цепи, создавая необходимую кормовую базу для последующих трофических уровней, включая такие важные промысловые объекты Норвежского моря, как скумбрия, сельдь и путассу. Точное определение сроков, продолжительности и интенсивности весеннего «цветения», как это предложено в данном исследовании, позволяет лучше понимать динамику кормовой базы и потенциальные изменения в распределении и численности промысловых запасов. Таким образом, полученные данные служат основой для более эффективного прогнозирования и управления рыбными ресурсами в условиях изменяющегося климата и изменчивости океанографических условий.

3.2 Метод определения сроков весеннего «цветения»

Для определения сроков ВЦ использовался пороговый 25% метод (25% от значения концентрации пика ВЦ), разработанный авторами ранее для данного района (Malysheva, Lobanova, 2024). Для каждого узла сетки рассматривался временной ряд концентрации Хл-а с марта по июль (19 недель) с более 50% заполненных значений за каждый год с 1998 по 2022 г. Если пропуски содержались в начале/конце временного ряда, они заполнялись значениями последующих/предыдущих ячеек. При наличии пропусков внутри ряда пробелы заполнялись линейной интерполяцией. Поскольку временное разрешение данных концентрации Хл-а – 8 дней, значение концентрации за одну дату принималось как средняя характеристика концентрации за 8-дневный период начиная с этой даты. Первые значения

временного ряда не рассматривались за дату начала ВЦ, поскольку неизвестно, было ли в пропущенных значениях заметное увеличение концентрации Хл-а или нет. При определении даты окончания «цветения» использовался день перед следующим 8-дневным периодом (например, когда дата окончания выпадала на 10 июня, записывалась дата окончания этого 8-дневного срока (17 июня)).

Рассматривались следующие фенологические параметры ВЦ: дата начала «цветения» – день года, в который было обнаружено ВЦ. Промежуток времени между началом и окончанием ВЦ – продолжительность (в днях). День пика – дата максимальной концентрации Хл-а во время «цветения». Пик «цветения» – концентрация Хл-а в день пика «цветения» ($\text{мг}/\text{м}^3$). Интенсивность – медиана концентрации Хл-а за период ВЦ ($\text{мг}/\text{м}^3$).

В трех районах, где были выделены ячейки сетки с наибольшей частотой ВЦ (Malysheva, Lobanova, 2024), т.е. ВЦ происходило в более 90% рассмотренных лет (23–25 из 27 лет), были осреднены фенологические и абиотические параметры (Таблица 3.1, Рис. 3.1).

Таблица 3.1. Статистические характеристики фенологических параметров в трех районах, осредненные за период 1998–2022 гг. Среднее ± СКО (среднеквадратическое отклонение)

Параметр	Среднее ± СКО	Минимум	Максимум
Район 1 (70.0 - 71.7°с.ш. 35.6 - 39.5°в.д.) 23 точки, $N = 575$			
День начала (день года)	102 ± 11	73	145
Продолжительность (дни)	45 ± 14	24	96
День пика (день года)	120 ± 12	89	153
Интенсивность ($\text{мг}/\text{м}^3$)	2.47 ± 1.38	0.31	5.96
Частота (%)	93 ± 2	92	96
Район 2 (64.2 - 65.6°с.ш. 2.2 - 6.4°з.д.) 19 точек, $N = 475$			
День начала (день года)	87 ± 14	73	129
Продолжительность (дни)	44 ± 19	24	136
День пика (день года)	109 ± 18	81	153
Интенсивность ($\text{мг}/\text{м}^3$)	0.59 ± 0.34	0.15	2.29
Частота (%)	93 ± 2	92	96
Район 3 (77.6 - 78.2°с.ш. 12.2 - 13.8°в.д.) 19 точек, $N = 475$			
День начала (день года)	109 ± 10	89	145
Продолжительность (дни)	43 ± 13	24	88
День пика (день года)	125 ± 11	105	161
Интенсивность ($\text{мг}/\text{м}^3$)	1.88 ± 0.91	0.26	4.57
Частота (%)	90 ± 4	88	96

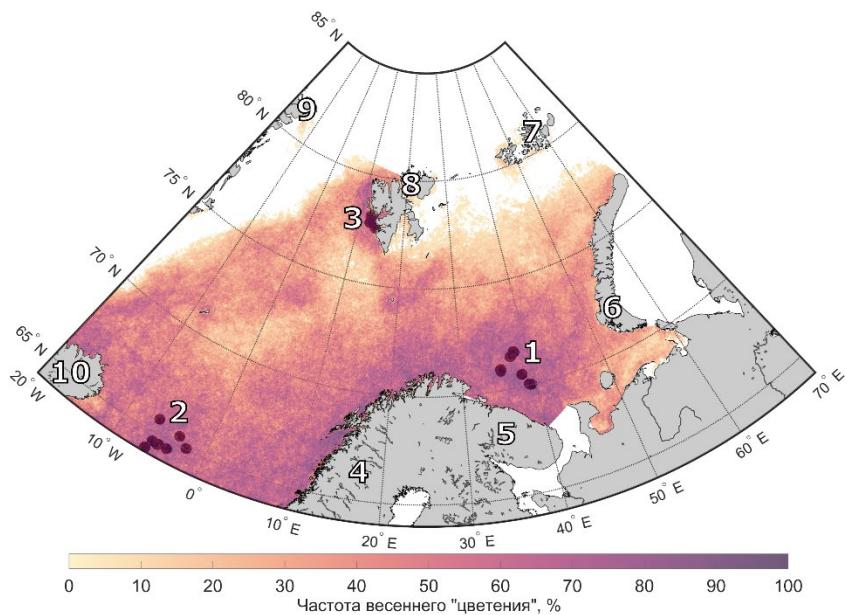


Рис. 3.1. Выделенные районы с наибольшей частотой весеннего «цветения» (%) в Северо-Европейском бассейне. Чёрные точки – выбранные точки с частотой более 90%. Подписи объектов: 1 – район 1 (Баренцево море), 2 – район 2 (Норвежское море), 3 – район 3 (Гренландское море), 4 – Скандинавский п-ов, 5 – Кольский п-ов, 6 – арх. Новая Земля, 7 – арх. Земля Франца-Иосифа, 8 – арх. Шпицберген, 9 – о. Гренландия, 10 – о. Исландия.

3.3. Анализ спутниковых данных для морей Северо-европейского бассейна

Баренцево море (район 1). В районе 1 фенологические характеристики слабо менялись за рассматриваемый период – значимых трендов зафиксировано не было (при p уровне > 0.05), но выделено смещение сроков ВЦ (-0.3 дня/год) и незначительное увеличение интенсивности за 25 лет (Рис. 3.2).

В многолетней изменчивости абиотических параметров в данной районе был выявлен значимый положительный тренд в значения ТПО зимнего периода (+0.040 °C/год) (Рис. 3.1б). С учетом положительных трендов в ТПО, можно предположить, что в последнее десятилетие в данном районе наблюдалось увеличение притока атлантических вод. Скорость ветра оставалась стабильной во времени (Рис. 3.1.3е).

Более ранние ВЦ происходили в 1998, 2005, 2014, 2018, 2020 гг. – годы с более теплыми водами в зимний и весенний период и с меньшими скоростями ветра (Рис. 3.1а-б, е). Тогда как в 1999, 2007, 2015 и 2019 г. наблюдались более поздние даты при меньших температуре и интенсивности света, а также сильных ветрах (Рис. 3.1а-в, е).

Сроки ВЦ имели оптимальный температурный диапазон: ВЦ в районе 1 развивалось при ТПО 2.0–5.5°C, причем завершение ВЦ происходило после увеличения ТПО на 0.5–1°C

с задержкой 1–2 недели (Рис. 3.2а). Кроме того, началу ВЦ предшествовало повышение ФАР на 5 моль квантов м^{-2} день^{-1} (Рис. 3.2б). Действительно, при оценке корреляционных связей фенологических параметров с абиотическими наблюдалась сильные связи с ФАР в день и за неделю до дат ВЦ ($0.68 \leq r \leq 0.73$), а также в месяц «цветения». С ТПО во время и до ВЦ, а также со скоростью ветра отмечалась умеренная и средняя отрицательная связь сроков ВЦ. В данном районе ВЦ начиналось раньше при более теплых условиях при увеличении интенсивности света и сильном ветровом перемешивании.

Непродолжительные ВЦ наблюдались в 2001, 2005 и 2019 гг. при снижении ТПО во время ВЦ (Рис. 3.2б, Рис. 3.1а). Годы с более длительными ВЦ (1999, 2008, 2014, 2016 и 2021 гг.) совпали с фазами увеличения ТПО в зимний и в весенний периоды. Продолжительность ВЦ в районе 1 имела умеренную отрицательную связь с ТПО (месячные) и ФАР ($-0.46 \leq r \leq -0.42$). Соответственно, более длительное ВЦ происходило при низких значениях ФАР (что может быть объяснено высоким уровнем облачности) в прохладных водах.

Минимальная интенсивность ВЦ в районе 1 отмечалась в 1999, 2007, 2009 и 2019 гг. при меньшем количестве ФАР и снижении ТПО во время ВЦ (Рис. 3.2г, Рис. 3.1а,в). Более интенсивные ВЦ наблюдались в годы с большими значениями ФАР: 2003–2004, 2006, 2011, 2013–2014 и 2018 гг. С ФАР значимая положительная корреляция отмечена только со среднемесячным значением интенсивности. Более интенсивно ВЦ в районе 1 происходило при большем количестве поступающего света.

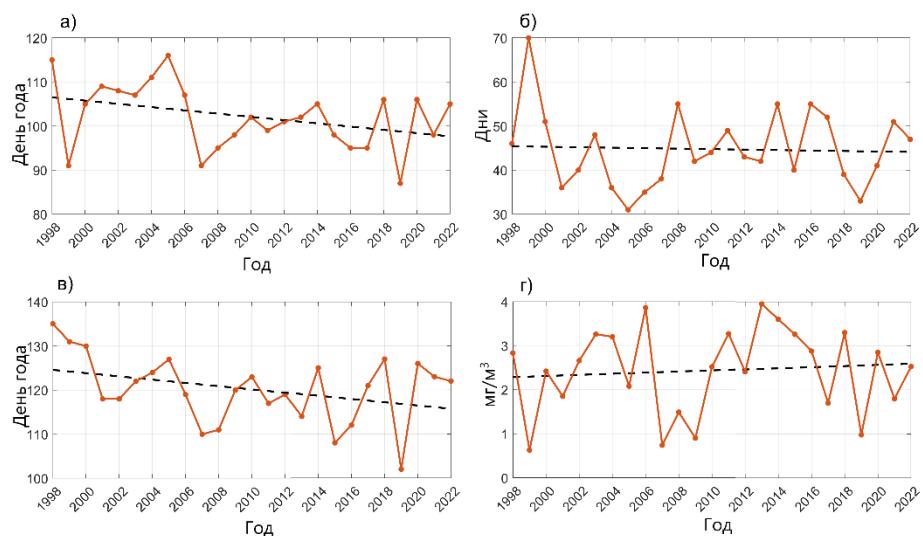


Рис. 3.2. Многолетние тренды фенологических параметров в районе 1 (Баренцево море): а – день начала ВЦ; б – продолжительность; в – день пика ВЦ; г – интенсивность. Чёрная пунктирная линия – незначимый тренд.

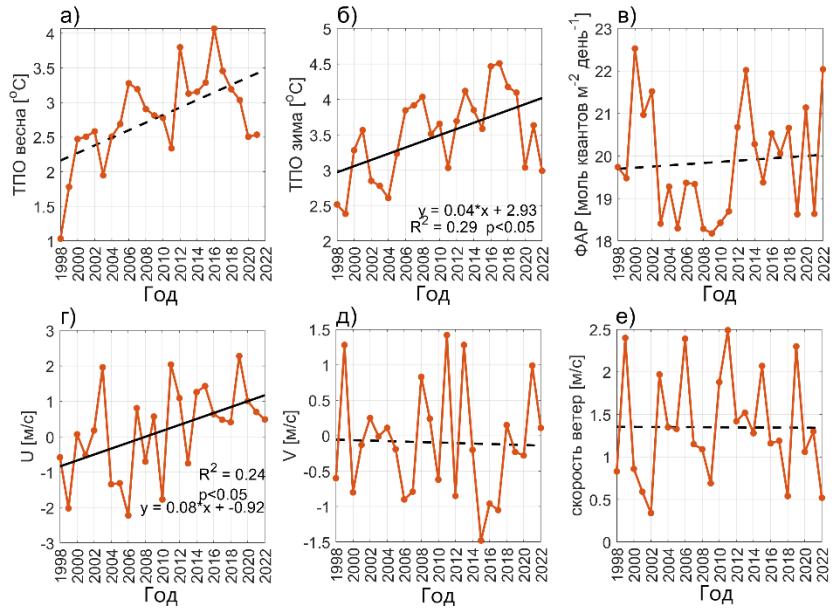


Рис. 3.1. Многолетние тренды абиотических параметров в районе 1 (Баренцево море): а – ТПО во время ВЦ (март-май); б – ТПО до ВЦ (декабрь-февраль); в – ФАР (март-май); г – U компонента ветра (март-май); д – V компонента ветра (март-май); е – скорость ветра (март-май). Чёрная пунктирная линия – незначимый тренд. Чёрная жирная линия – значимый тренд. У значимых трендов на графике приведены уравнения линейной регрессии и уровень значимости тренда.

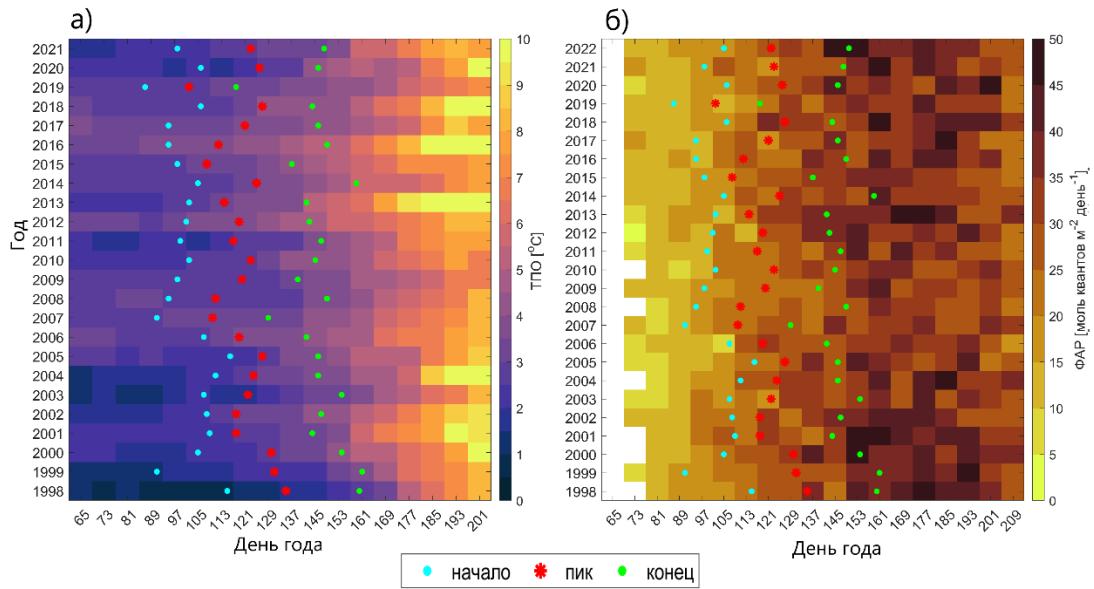


Рис. 3.2. Межгодовая изменчивость временных рядов: а – ТПО; б – ФАР с выделенными сроками весеннего «цветения» в районе 1 (Баренцево море).

Норвежское море (район 2). Аналогично району 1 в районе 2 фенологические характеристики не имели выраженной тенденции за рассматриваемый период (Рис. 3.3).

Среди абиотических параметров значимых трендов не обнаружено, но заметна тенденция к увеличению ТПО, ФАР и скорости ветра во время ВЦ (Рис. 3.4).

Раннее начало ВЦ отмечено в 2000, 2007, 2012, 2016 гг. – годы с более теплыми водами в зимний период относительно других годов и ветрами западного и юго-западного направления (скорости ≤ 2 м/с) (Рис. 3.4б, г-д). Тогда как в 2001, 2003, 2006 и 2020 гг. наблюдались более поздние даты при меньших температурах весной и зимой, а также преобладающие ветра восточного направления (Рис. 3.4 а-б, г).

В районе 2 оптимальный температурный диапазон для ВЦ составил 2.3–5.3°C. До начала ВЦ резких скачков ТПО не отмечалось, завершение ВЦ происходило после увеличения ТПО на 0.5–1.0°C с задержкой до 1–2 недели (Рис. 3.5а). Развитию ВЦ предшествовало повышение ФАР на 0–5 моль квантов m^{-2} $день^{-1}$, а завершение ВЦ происходило до пика солнечной интенсивности (130–180 день года) (Рис. 3.5б). При оценке корреляционных связей сроков ВЦ с абиотическими факторами наблюдались сильная положительная связь с ФАР ($0.87 \leq r \leq 0.90$). С ТПО, в отличии от района 1, до и во время ВЦ отмечена положительная связь ($0.44 \leq r \leq 0.73$). Со скоростью ветра отмечалась умеренная отрицательная связь ($r = -0.43$). В данном районе ВЦ начиналось раньше при низких значениях ТПО и ФАР с усиленным ветровым перемешиванием; позднее ВЦ происходило при большем прогреве вод и меньшей силе ветра.

Продолжительность ВЦ незначительно возросла за рассматриваемый период: короткопериодные ВЦ наблюдались в 2000, 2007 и 2019–2020 гг. при снижении ТПО во время ВЦ и зимой по сравнению с годами до и после (Рис. 3.3б, Рис. 3.4а-б). Годы с длительными ВЦ (1999, 2005, 2011, 2018 и 2021 гг.) совпали с фазами увеличения ТПО в зимний период. С ФАР отмечена положительная корреляционная связь ($0.45 \leq r \leq 0.52$). Более длительное ВЦ происходило при большем количестве поступающего света (как и в районе 1). По всей видимости, ТПО внесла больший вклад в изменчивость продолжительности, так как в последнее десятилетие ТПО увеличилась, а средняя продолжительность в данном районе возросла.

Минимальная интенсивность ВЦ в районе 2 зафиксирована в 2000, 2010, 2012 и 2015–2016 гг. при невысоких средних значениях ФАР и ТПО во время ВЦ, а также с преобладающими ветрами западного направления (Рис. 3.3г, Рис. 3.4 а,в-г). Более интенсивные ВЦ отмечены в годы с большими значениями ФАР и значениями ТПО выше среднего весной и зимой, с преобладающими восточными румбами ветра: 2001, 2003, 2006, 2018–2019 гг. С ФАР интенсивность ВЦ имела значимую среднюю положительную

корреляцию с ($r = 0.68$) и умеренную положительную связь с ТПО ($0.46 \leq r \leq 0.60$) (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Более интенсивно ВЦ в районе 2 происходило при большем поступлении света и тепла во время «цветения».

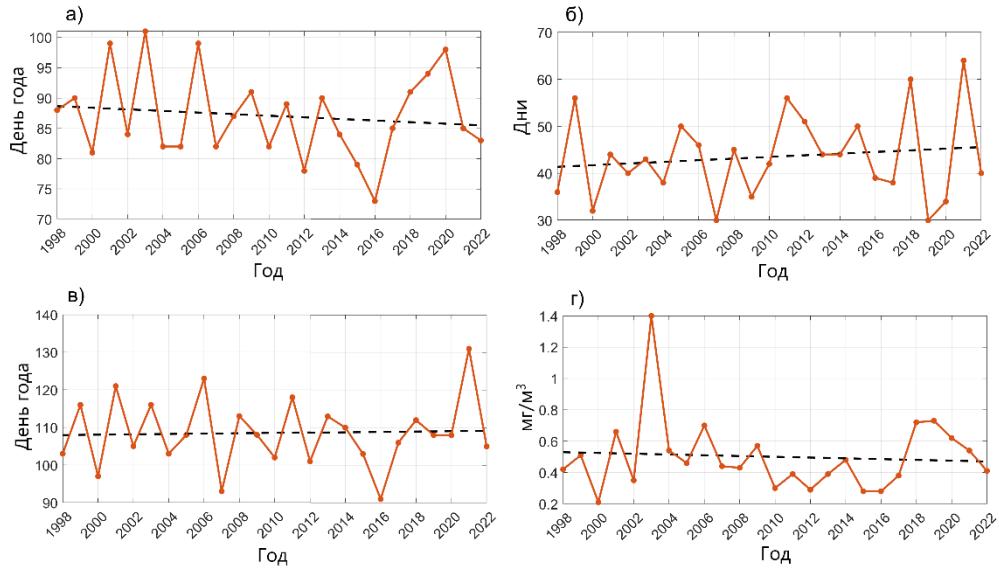


Рис. 3.3. Многолетние тренды фенологических параметров в районе 2: а – день начала ВЦ; б – продолжительность; в – день пика ВЦ; г – интенсивность. Черная пунктирная линия – незначимый тренд. Черная жирная линия – значимый тренд. У значимых трендов на графике приведены уравнения линейной регрессии и уровень значимости тренда.

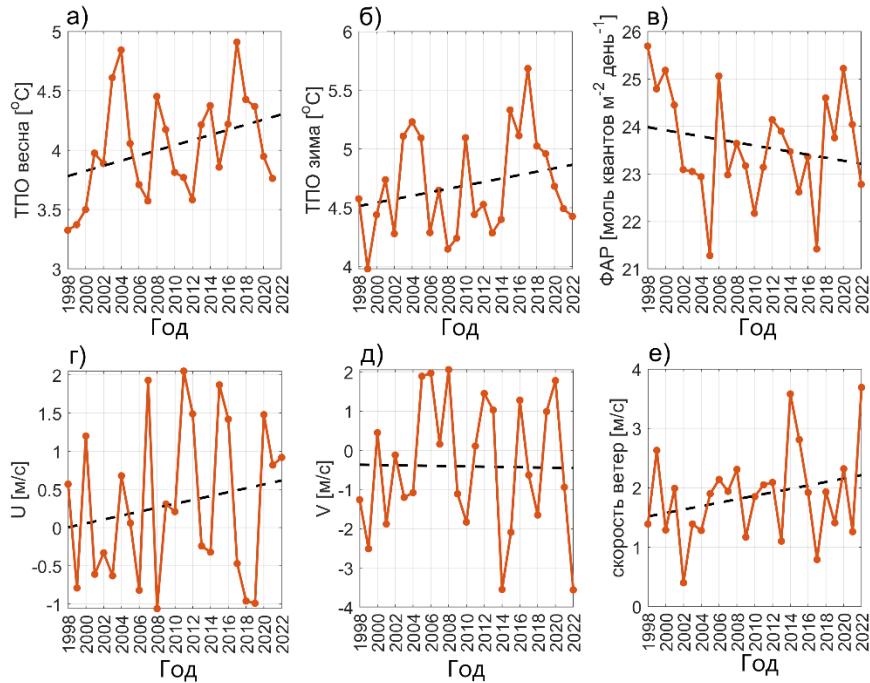


Рис. 3.4. Многолетние тренды абиотических параметров в районе 2: а – ТПО во время ВЦ (март-май); б – ТПО до ВЦ (декабрь-февраль); в – ФАР (март-май); г – U компонента ветра (март-май); д – V компонента ветра (март-май); е – скорость ветра (март-май). Черная

пунктирная линия – незначимый тренд. Черная жирная линия – значимый тренд. У значимых трендов на графике приведены уравнения линейной регрессии и уровень значимости тренда.

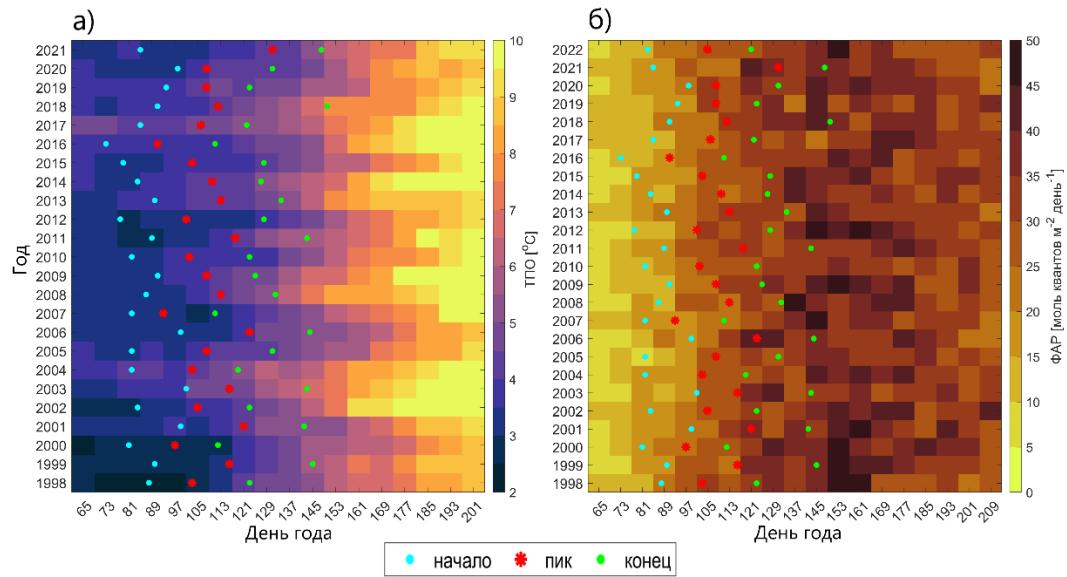


Рис. 3.5. Межгодовая изменчивость временных рядов: а – ТПО; б – ФАР с выделенными сроками весеннего «цветения» в районе 2 (Норвежское море).

Гренландское море (район 3). В районе 3 был зафиксирован значимый отрицательный тренд в многолетней изменчивости продолжительности ВЦ: период «цветения» уменьшился на 12 дней за 25 лет (Рис. 3.6б). Сроки ВЦ не имели значимой тенденции, однако можно выделить смещение даты пика на несколько дней раньше (Рис. 3.6а,в). Интенсивность ВЦ практически не менялась во времени (Рис. 3.6г).

Данный район – самый северный из рассматриваемых. В этой области ($77\text{--}78^{\circ}$ с.ш.) были наибольшие значения ФАР (выше угол падения солнечных лучей), а также более сильные ветра, преимущественно восточного направления, имеющие отрицательный тренд за последние 25 лет (Рис. 3.7 в,д-ж). ТПО имела положительный тренд, что указывает на потепление условий в данном районе: усиленный приток атлантических вод и сокращение концентрации льда (Рис. 3.7 а-б,г,з). Выделяется заметное повышение ТПО во время ВЦ после 2011 года ($0.5\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$): если в 1998–2011 гг. в среднем ТПО была отрицательной с марта по май, то после 2011 г. средние значения стали положительными.

Раньше всего ВЦ происходили в 2006, 2012, 2014, 2017 и 2021 гг. – годы с более высокими значениями ФАР и ТПО в зимний и весенний период, а также низкой концентрации льда (Рис. 3.7 а-г). При обратных аномалиях этих абиотических факторов ВЦ происходили позднее (1998, 2002, 2009–2011, 2016 и 2019 гг.).

Сроки ВЦ сдвинулись на 1 неделю раньше при смещении температурного диапазона во время ВЦ (1998–2011 гг.: от -1.45°C до 1.7°C ; 2011–2021 гг.: -0.30°C до 2.3°C) (Рис. 3.8а). Заметно смещение ВЦ на ранние числа в отдельные годы потепления (2000–2001, 2006, 2012, 2014 гг.). Отклик начала и пика ВЦ на изменение интенсивности света более явный, чем на изменение ТПО (задержка 1–2 недели) (Рис. 3.8б) – ВЦ в районе 3 наблюдались при более высоких значениях ФАР, чем в других районах. Хорошо заметно, что у западного побережья Шпицбергена ВЦ ежегодно начиналось практически сразу после уменьшения концентрации льда (Рис. 3.8 в), т.е. в процессе таяния льда. Окончание ВЦ, по всей видимости, связано с увеличением стратификации вод (увеличивается прогрев), сокращением БЭ и выеданием фитопланктона зоопланктоном. При оценке корреляционных связей сроков ВЦ с абиотическими факторами наблюдались сильные положительные связи с ФАР ($0.68 \leq r \leq 0.98$), особенно со значениями ФАР за 2 недели до начала ВЦ. С ТПО до и во время ВЦ отмечалась умеренная и средняя отрицательная связь сроков ВЦ (чем теплее, тем раньше ВЦ). С концентрацией льда (месячное значение) была умеренная положительная корреляция ($r = 0.47$): больше льда в акватории, позже пик ВЦ. В районе 3 ВЦ начиналось раньше при более теплых водах после таяния льда.

В межгодовых колебаниях абиотических параметров не было выявлено заметных изменений, соответствующих разным фазам продолжительности ВЦ. Менее продолжительными ВЦ были в 2003, 2012, 2019 и 2021 гг., и в эти годы значения ТПО во время ВЦ были выше (Рис. 3.6б, Рис. 3.7а). В отдельные годы с длительными ВЦ (1998, 2008, 2010–2011, 2017 и 2020 гг.) отмечалось увеличение ФАР. С ТПО продолжительность в районе 3 имела умеренную и среднюю отрицательную корреляцию ($-0.54 \leq r \leq -0.43$). Отрицательная умеренная связь была с концентрацией льда в день начала ВЦ, при среднемесячном осреднении отмечалась положительная средняя корреляция. В данном районе ВЦ длилось дольше в менее теплых водах при низкой концентрации льда.

Интенсивность ВЦ в районе 3 была минимальна в 1998, 2012, 2014 и 2021 гг. при низкой скорости ветра во время ВЦ (Рис. 3.6г, Рис. 3.7 д,ж). Более интенсивные ВЦ характерны в годы с большими значениями ФАР, а также с большими скоростями ветра: 2001, 2006, 2011, 2015 гг. (Рис. 3.7 в,ж). На момент начала ВЦ интенсивность имела значимую корреляцию с ТПО и ФАР ($r = 0.45$, $r = 0.63$, соответственно), причем между собой в этот срок данные параметры коррелировали очень слабо ($r = -0.12$), тогда как за 2 недели до ВЦ при наибольшей корреляции ФАР с интенсивностью ($r = 0.95$) отмечалась средняя положительная связь ФАР с ТПО. Со среднемесячной скоростью ветра выявлена умеренная положительная связь (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Более

интенсивно ВЦ в районе 3 происходило при большем количестве поступающего света и более теплых водах, а также при усилении ветрового перемешивания.

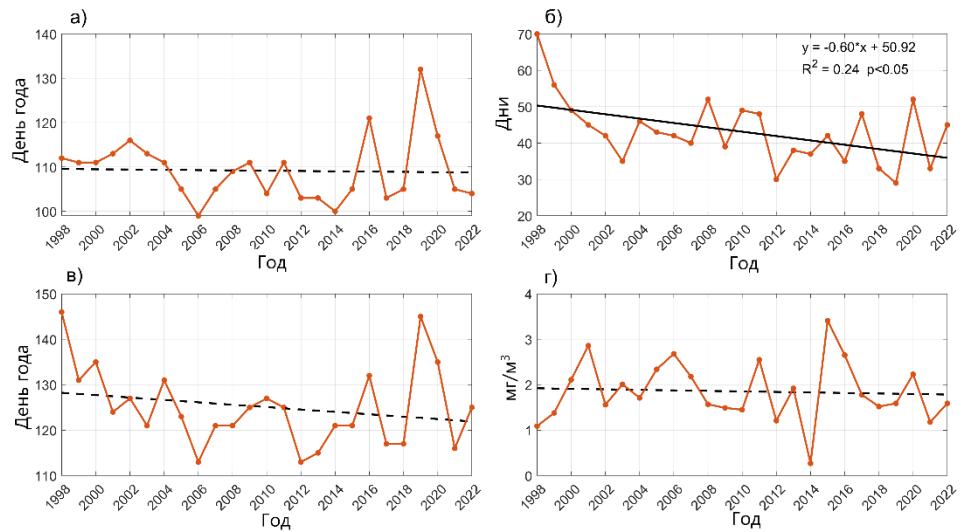


Рис. 3.6. Многолетние тренды фенологических параметров в районе 3: а – день начала ВЦ; б – продолжительность; в – день пика ВЦ; г – интенсивность. Чёрная пунктирная линия – незначимый тренд. Чёрная жирная линия – значимый тренд. У значимых трендов на графике приведены уравнения линейной регрессии и уровень значимости тренда.

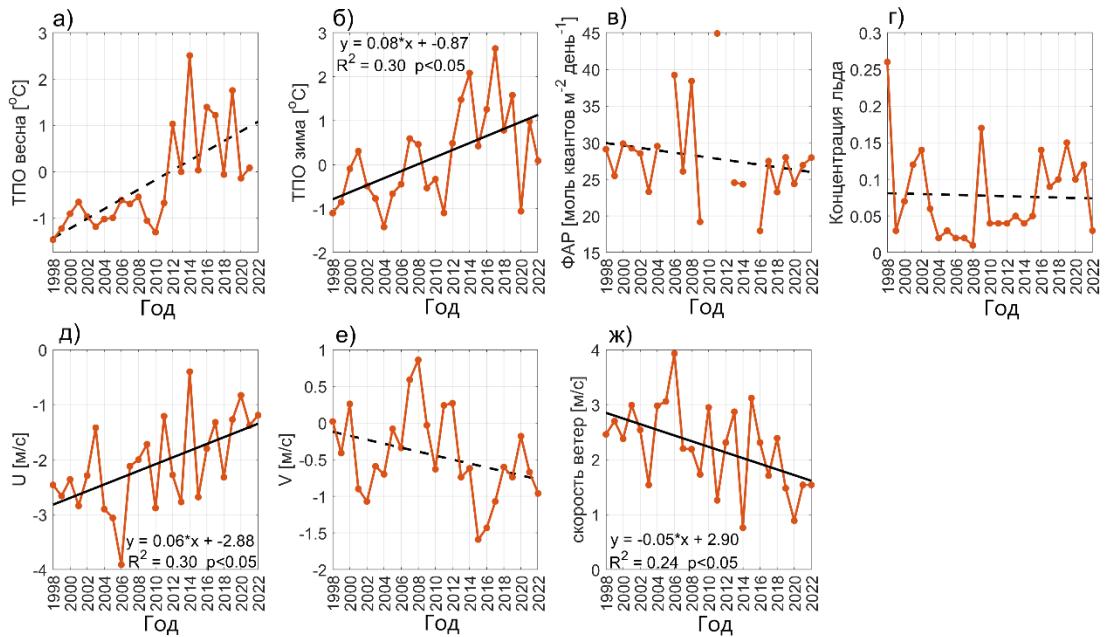


Рис. 3.7. Многолетние тренды абиотических параметров в районе 3: а – ТПО во время ВЦ (март-май); б – ТПО до ВЦ (декабрь-февраль); в – ФАР (март-май); г – Концентрация льда (март-июль); д – U компонента ветра (март-май); е – V компонента ветра (март-май); ж – скорость ветра (март-май). Чёрная пунктирная линия – незначимый тренд. Чёрная жирная линия – значимый тренд. У значимых трендов на графике приведены уравнения линейной регрессии и уровень значимости тренда.

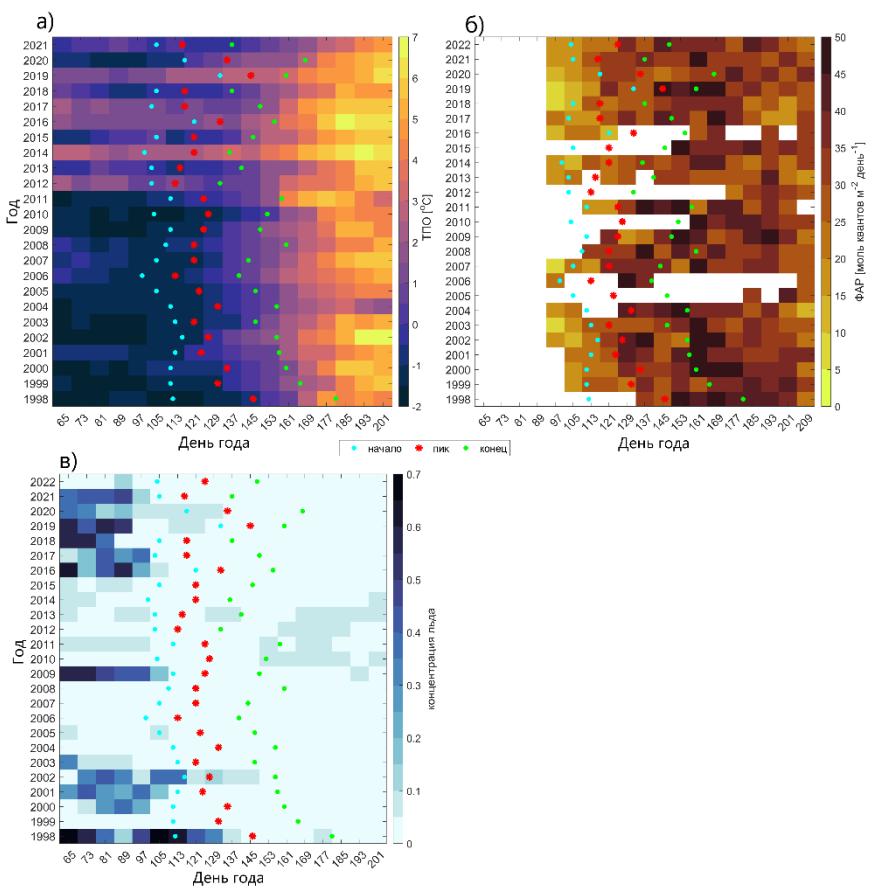


Рис. 3.8. Межгодовая изменчивость временных рядов: а – ТПО; б – ФАР; в – концентрации льда с выделенными сроками весеннего «цветения» в районе 3.

Изучение фенологии весеннего «цветения» фитопланктона (ВЦ) имеет прямое и критически важное значение для промысловых исследований, особенно в таких продуктивных регионах, как Норвежское море. Поскольку ВЦ является основой морских пищевых цепей, его сроки, продолжительность и интенсивность определяют доступность и качество кормовой базы для зоопланктона и личинок рыб. Эти изменения в свою очередь напрямую влияют на выживаемость ранних стадий развития промысловых видов, скорость их роста и, как следствие, на численность пополнения промысловых запасов и общую продуктивность рыболовства.

Понимание факторов, контролирующих ВЦ (таких как температурные условия, солнечная радиация, биогенные элементы, глубина перемешанного слоя, морской лед и ветровое перемешивание), позволяет разрабатывать более точные модели прогнозирования распределения и успешности промысловых скоплений. Интеграция данных о фенологии ВЦ с океанографическими условиями и данными по промыслу является фундаментом для адаптивного управления рыболовством, позволяя оптимизировать стратегии вылова и минимизировать экологические риски в условиях изменения климата. Таким образом, детальный анализ ВЦ фитопланктона и его связи с абиотическими факторами является неотъемлемой частью комплексного подхода к анализу океанографических условий промысла рыб.

3.4. Публикации

Результаты опубликованы:

Malysheva A.S., Lobanova P.V. Interannual Variability of Marine Phytoplankton Spring Bloom Phenology in the North European Basin // Oceanology. – 2024. – Vol. 64, Suppl. 1. – P. S107–S117. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001437024700929>. Scopus/WOS CC, Белый список (уровень 2), ядро РИНЦ.

Малышева А.С., Лобанова П.В. Влияние параметров среды на фенологию весеннего «цветения» фитопланктона в морях Северо-Европейского бассейна // Исследование Земли из космоса. – 2025. – №6 (принята в печать). Scopus/WOS CC, Белый список (уровень 2), ядро РИНЦ.

4 ПРИМЕНЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН ДЛЯ АНАЛИЗА УСЛОВИЙ ПРОМЫСЛА РЫБ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

4.1. Данные об уловах атлантической скомбрии и их анализ

На рисунке 4.1 показана обобщающая карта пространственного распределения промысла Атлантической скомбрии за три года: 2015, 2016 и 2020. На ней отображены все зафиксированные за эти годы траления с их географической привязкой. На рисунке отображены только те точки тралений, которые попали в рыболовную зону открытой части Норвежского моря (ОЧНМ). Границы промысловых районов обозначены красными линиями. Открытая часть Норвежского моря поделена на два подрайона: северную и южную части, обозначенные цифрами I и II, соответственно.

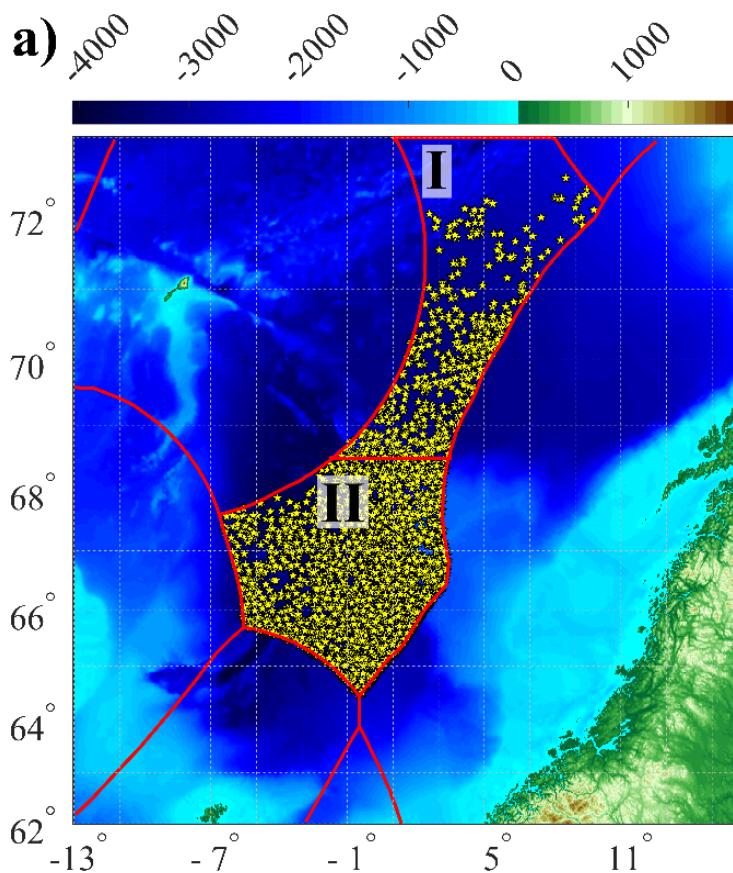


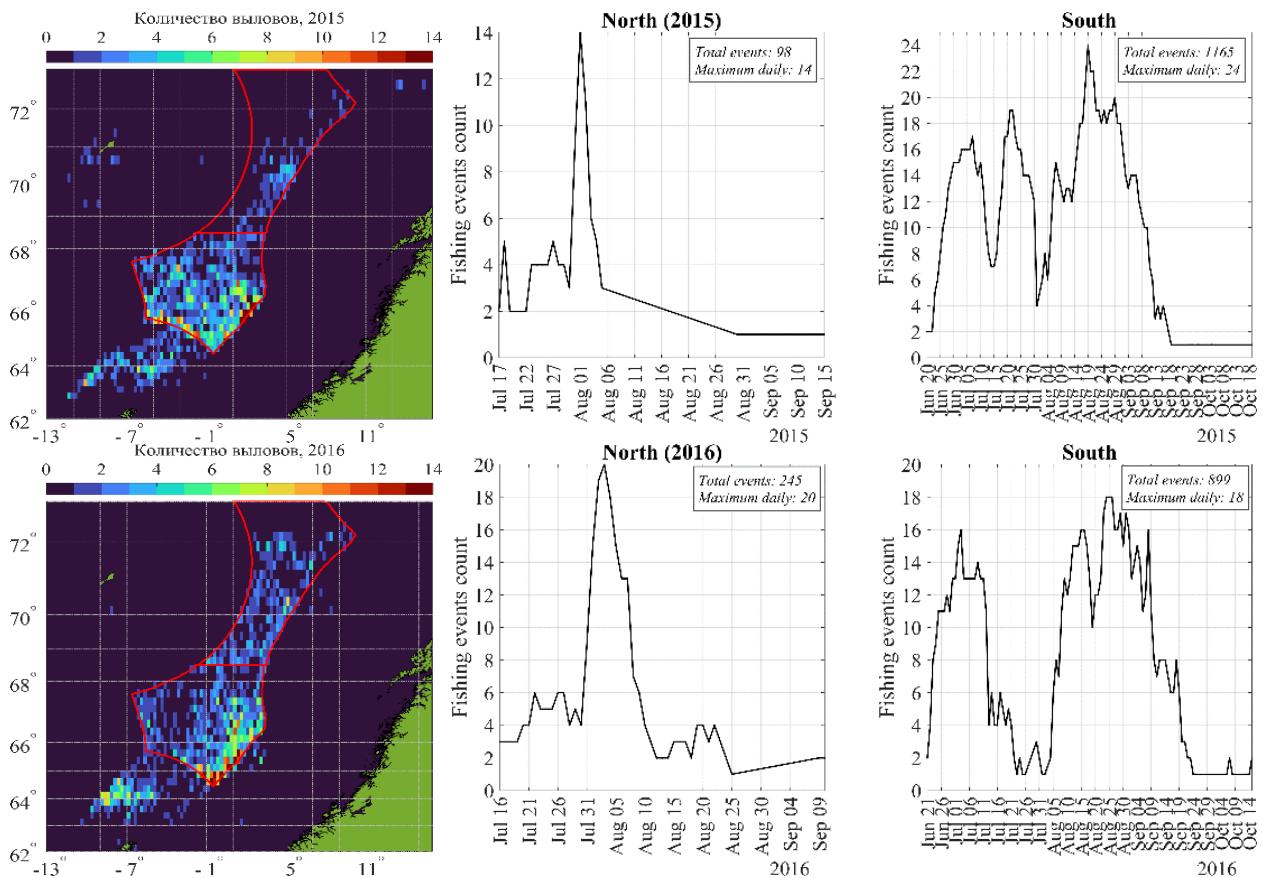
Рис. 4.1. Карта исследуемого района. Красными линиями обозначены границы промысловых зон. Звёздочки – композиция мест промысла за 2015, 2016 и 2020 годы. I – северная часть ОЧНМ, II – южная часть ОЧНМ.

На рисунке 4.2 представлено пространственно-временное распределение промысловой активности в Норвежском море за 2015, 2016 и 2020 годы. Для количественной оценки исследуемый регион был разбит на ячейки сеткой с шагом $1/4$

градуса, после чего для каждой ячейки определялось количество совершенных в ней промысловых операций.

Анализ карт позволяет выявить зоны наиболее интенсивного промысла, которые были сосредоточены в южной части моря со смещением к его восточной границе. Для изучения временной динамики были построены отдельные графики распределения промысловой активности по времени для северной и южной частей.

Согласно полученным данным, промысел в северной части характеризовался более коротким сезоном (июль–сентябрь) по сравнению с южной (июнь–октябрь). Пики активности также различались: на севере максимум отмечался в начале августа, тогда как на юге высокая интенсивность сохранялась с августа до середины сентября. Общая интенсивность промысла на юге была на порядок выше: за указанные годы здесь было зафиксировано 1165, 899 и 1061 трапление соответственно, против 98, 245 и 172 траплений в северной части.



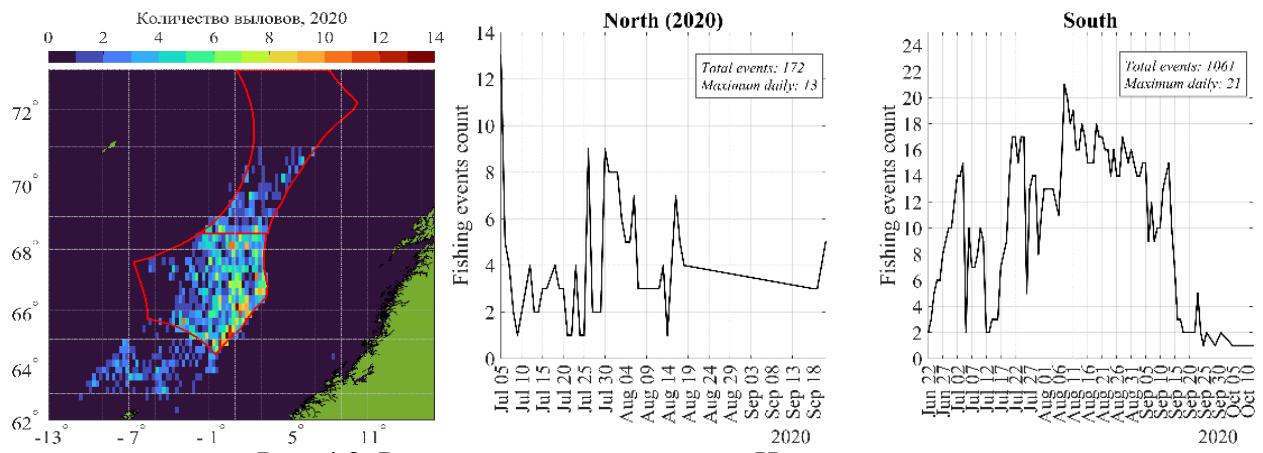
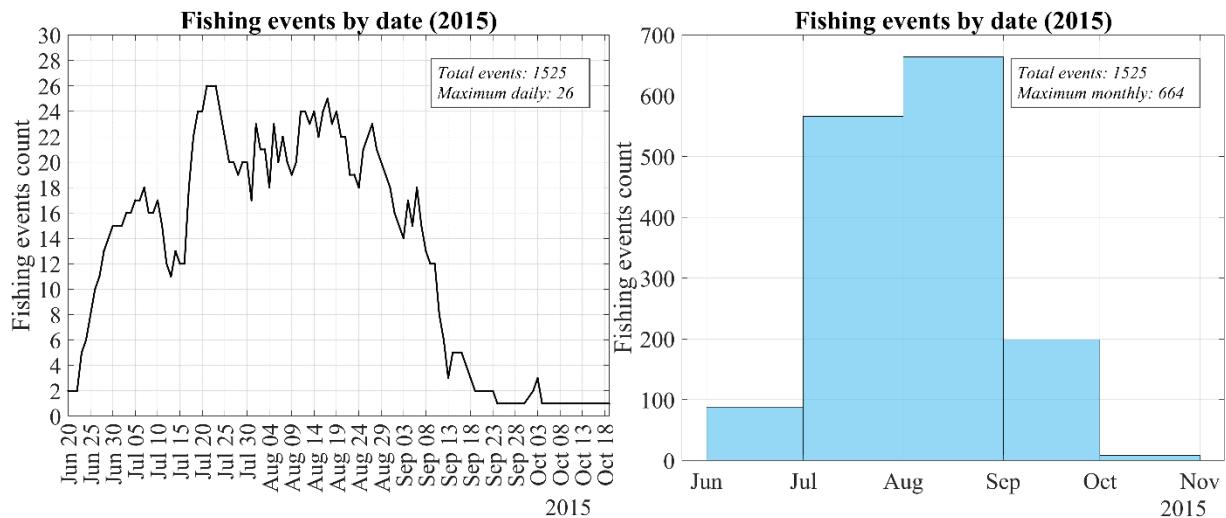


Рис. 4.2. Распределение промысла в Норвежском море.

Анализ рисунков 4.1 и 4.2 показывает, что для южной части больше данных по промыслу, поэтому результаты анализа для южной части более репрезентативные, чем для северной.

На рисунке 4.3 представлены графики динамики промысловой активности (числа операций) при добывче атлантической скомбрии (*Scomber scombrus*) в Норвежском море по годам (2015, 2016 и 2020). Весь промысловый сезон длится с конца июня по середину октября, при этом наиболее активными месяцами являются июль, август и сентябрь. Данные визуализированы в двух формах для каждого года: слева — суточное распределение (line plot), справа — агрегированное по месяцам (histogram).



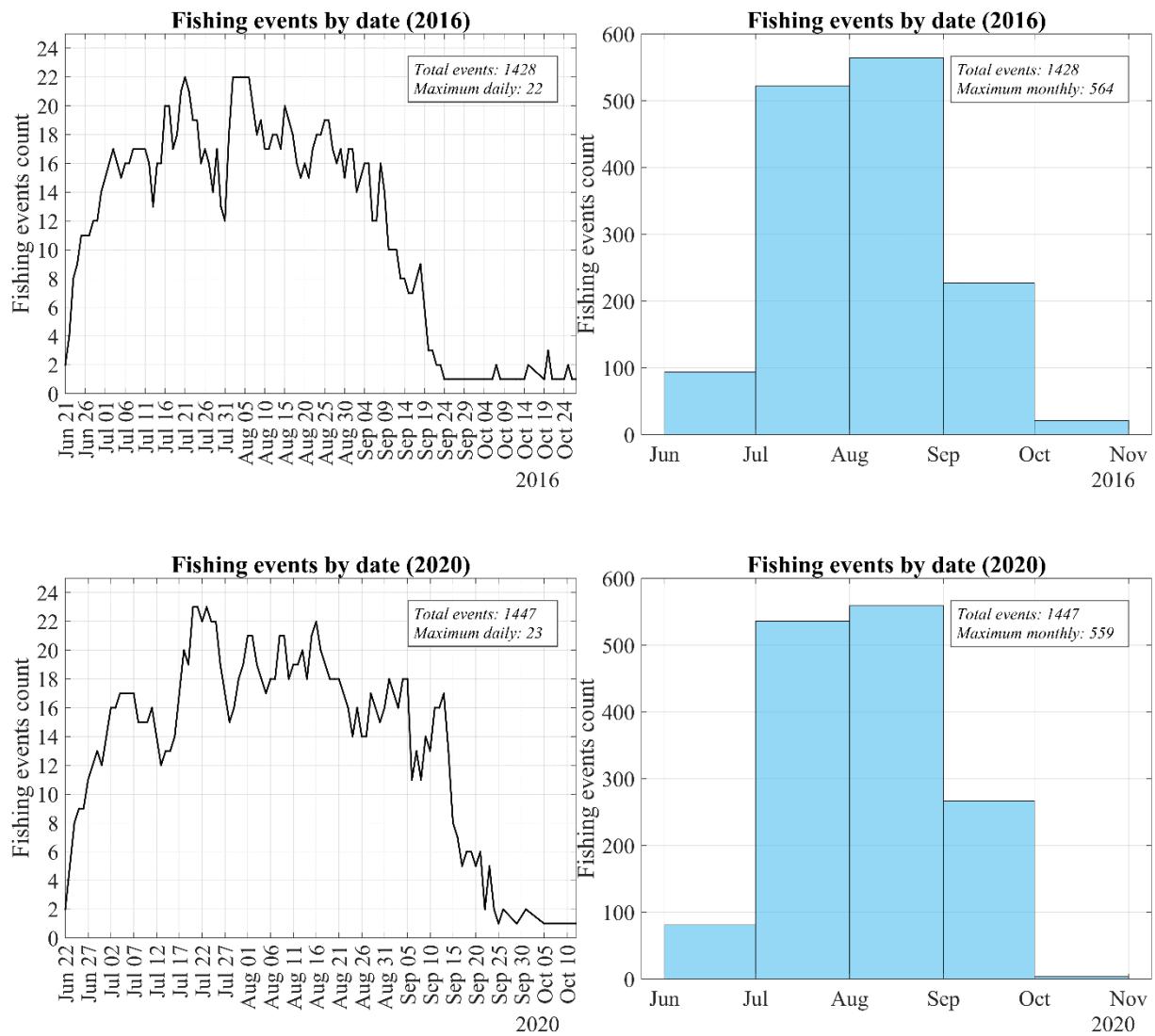


Рис. 4.3. Количество промысловых операций по времени.
 Ниже представлен анализ сезонной и межгодовой динамики промысла.

Во-первых, следует отметить сезонный характер промысла. Во все годы промысел скомбрии носит ярко выраженный летне-осенний сезонный характер. Активность начинается в июне, достигает пика в августе–сентябре, после чего резко снижается и практически прекращается к октябрю. Это отражает сезонные миграции скомбрии, приуроченные к периоду нагула в относительно тёплых и продуктивных водах Норвежского моря.

Во-вторых, интенсивность промысла. В 2015 году зафиксировано 1525 промысловых событий, с максимумом 26 операций в сутки и 664 — в месяц (август). В 2016 году общее количество операций немного снизилось — 1423, максимум 22 в сутки и 564 в месяц. В 2020 году показатели аналогичны 2016 году (1427 событий, максимум 23 в сутки, 589 в месяц).

Таким образом, интенсивность промысла сохранялась стабильной на уровне 1400–1500 операций в сезон, что указывает на устойчивость промысловых усилий и, вероятно, стабильные запасы скунбрии в регионе.

Длительность активного промысла составляла около 3,5 месяцев (июль–сентябрь). Незначительное смещение начала активности в отдельные годы может быть связано с температурными аномалиями, положением фронтальных зон и межгодовой изменчивостью распределения косяков. Наблюдается снижение активности после сентября. Резкое падение числа операций после конца сентября во все годы отражает уход скунбрии из прибрежных и промысловых районов Норвежского моря в более южные широты на зимовку, что согласуется с известной биологией вида.

Что касается межгодовых различий, то незначительное снижение интенсивности промысла после 2015 г. может быть обусловлено как регулированием вылова (квоты, погодные ограничения), так и изменениями в распределении запасов вследствие колебаний температуры поверхности моря и гидродинамических условий.

Таким образом, промысел атлантической скунбрии в Норвежском море характеризуется:

- выраженной летне-осенней сезонностью (июль–сентябрь — пик активности);
- стабильной межгодовой динамикой количества операций (1400–1500 событий за сезон);
- высокой синхронностью промысловой активности с биологическим циклом вида и океанологическими условиями (теплые поверхностные воды и фронтальные зоны в летний период);
- тенденцией к умеренной межгодовой вариации интенсивности, связанной с изменением погодных и океанографических факторов.

4.2. Лагранжево моделирование по данным реанализа GLORYS12V1 и спутниковой альtimетрии

Для расчёта лагранжевой характеристики S использовалось два источника поля скорости на поверхности: реанализ GLORYS12V1 и альтиметрия AVISO. На рисунке 4.4 представлены поля характеристики S , рассчитанные по разным источникам полей скорости, а также градиенты характеристики S . При сравнении этих рисунков становится очевидно, что поля не совпадают. Тем не менее, при усреднении полей скорости по реанализу GLORYS12V1 и альтиметрии AVISO становится видно, что осредненные поля S

практически идентичны (рис. 4.5). Это указывает на то, что расхождения в мгновенных или короткопериодных полях S , вероятно, обусловлены различиями в пространственно-временном разрешении исходных данных и их способности воспроизводить мезомасштабную и субмезомасштабную динамику.

Дальнейший анализ выявил, что основные различия в полях S на коротких временных масштабах связаны с более высокой детализацией AVISO в воспроизведении мезомасштабных вихрей и фронтов, в то время как GLORYS12V1, несмотря на свою детальность, может усреднять некоторые динамические особенности. Однако для целей долгосрочного анализа переноса и оценки общих паттернов циркуляции, где важна устойчивость крупномасштабных структур, обобщенные характеристики S , полученные из обоих источников, демонстрируют высокую степень конвергенции. Это позволяет сделать вывод о применимости обоих источников данных для анализа долгосрочных процессов, при этом выбор конкретного источника должен определяться требуемым масштабом разрешения динамических явлений.

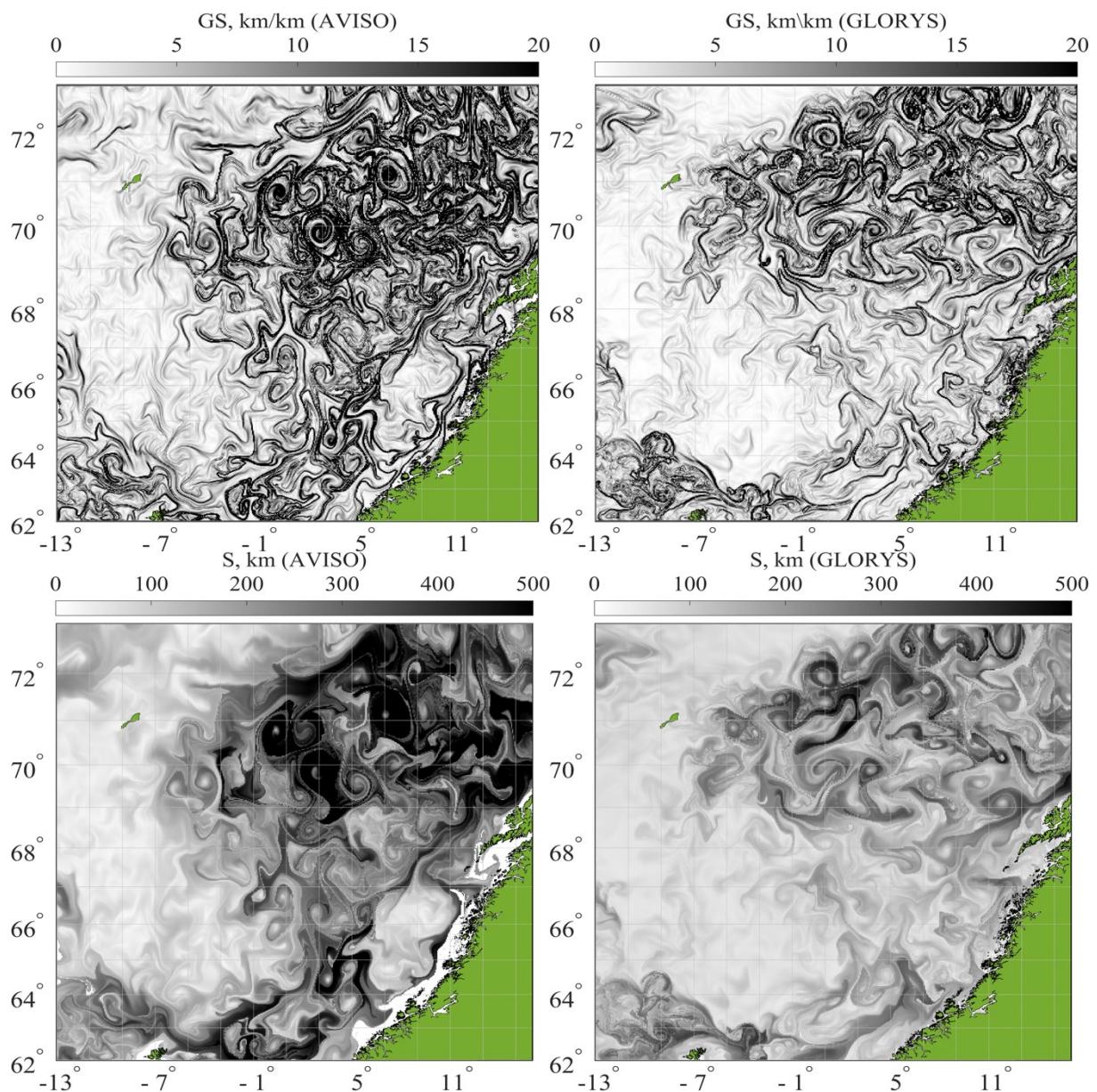


Рис. 4.4. Пример S карт и градиентов S по данным AVISO и GLORYS12V1 за 20 июня 2015 года.

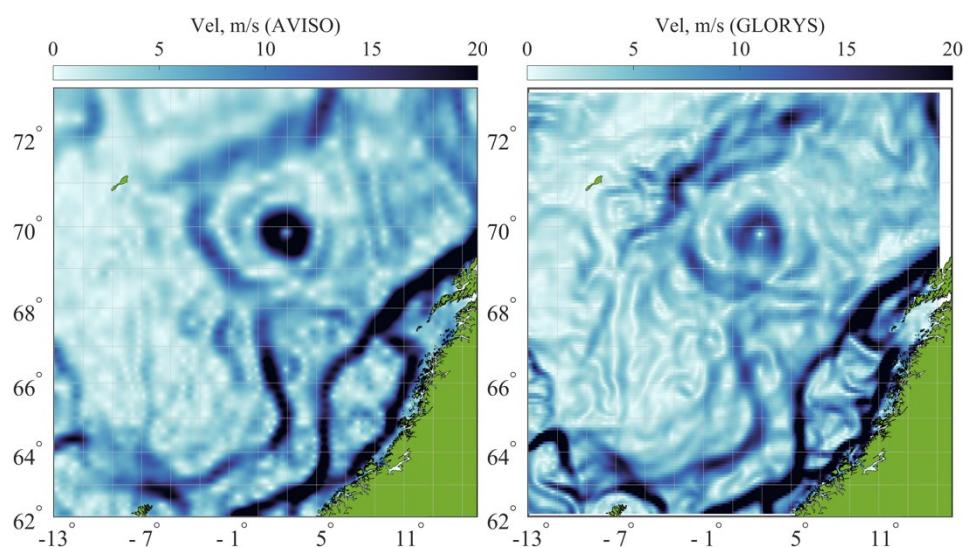


Рис. 4.5. Среднее поле скорости за период путины в 2015 году по данным AVISO и GLORYS12V1.

4.3. Градиенты динамических и термохалинных характеристик

В таблицах 4.1 и 4.2 представлены значения градиентов рассматриваемых характеристик, соответствующие квантилю 0.8 по функции распределения вероятностей. Самые значимые отличия между районами наблюдаются по градиенту лагранжевой характеристики S. Для южного района значения градиента значительно ниже. Причём для gS проводилось ещё сравнение полей по реанализу GLORYS12V1 и альтиметрии AVISO.

Таблица 4.1. Значения функции распределения вероятностей (для северной части).

	centr_Norw_sea_north (2015)	centr_Norw_sea_north (2016)	centr_Norw_sea_north (2020)
0.8			
Gdens	0.0037	0.0036	0.0035
Gtemp	0.0285	0.0257	0.0295
Gsal	0.0020	0.0024	0.0019
S (15) 400x400, 1.5m, GLORYS	17.6079	17.2758	17.9524
S (15) 500x500, AVISO	11.4249	12.2618	11.4305

Таблица 4.2. Значения функции распределения вероятностей (для южной части).

	centr_Norw_sea_south (2015)	centr_Norw_sea_south (2016)	centr_Norw_sea_south (2020)
0.8			
Gdens	0.0028	0.0031	0.0031
Gtemp	0.0187	0.0194	0.0249
Gsal	0.0034	0.0033	0.0031
S (15) 400x400, 1.5m, GLORYS	5.3676	5.3332	6.0632
S (15) 500x500, AVISO	5.0605	5.2332	5.8441

Для градиента лагранжевой характеристики S, рассчитанной на 15 суток по полям скорости из реанализа GLORYS12V1 (рис. 4.6) и альтиметрии AVISO (рис. 4.7) проводился отдельный расчёт гистограмм расстояний для сравнения полученных результатов.

Гистограммы были построены отдельно по всем рассматриваемым годам для северной и южной частей ОЧНМ.

Для GLORYS12V1: на гистограммах для северной части не проявляется ожидаемых эффектов – не видно ни избегания больших расстояний, ни тяготения к малым расстояниям до выделенных фронтальных зон. Медианное значение для реальной выборки значительно выше такового для случайной. Вероятно, это стало следствием малого количества данных по промыслу Атлантической скумбрии. На гистограммах для южной части отмечается эффект предпочтения малых расстояний до фронтальных зон – медианные расстояния для реальной выборки меньше, чем для случайной.

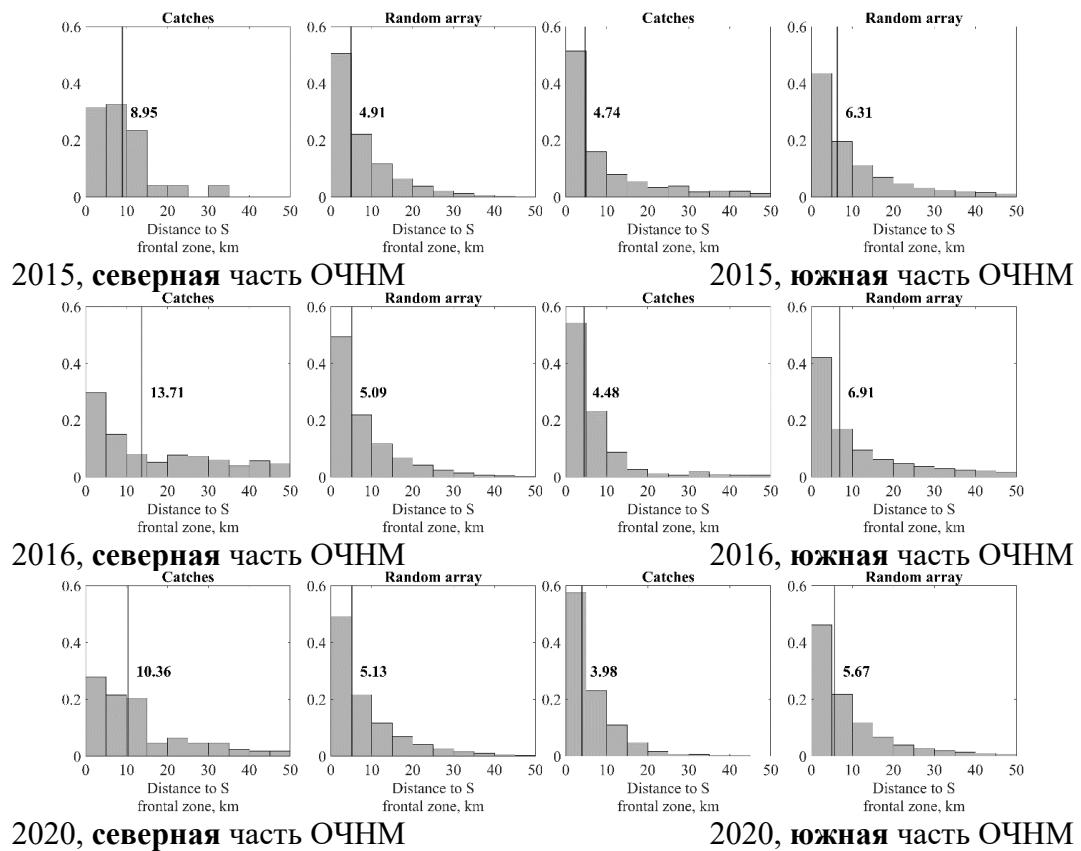


Рис. 4.6. Гистограммы расстояний от мест промысла и случайных точек до фронтальных зон, выделенных по градиенту лагранжевой характеристики S в поле скорости GLORYS12V1.

Для AVISO: при сравнении результатов между собой можно отметить, что в северной части разницы между медианными значениями расстояний для реальной и случайной выборок практически нет, а в южной части разница составляет несколько километров.

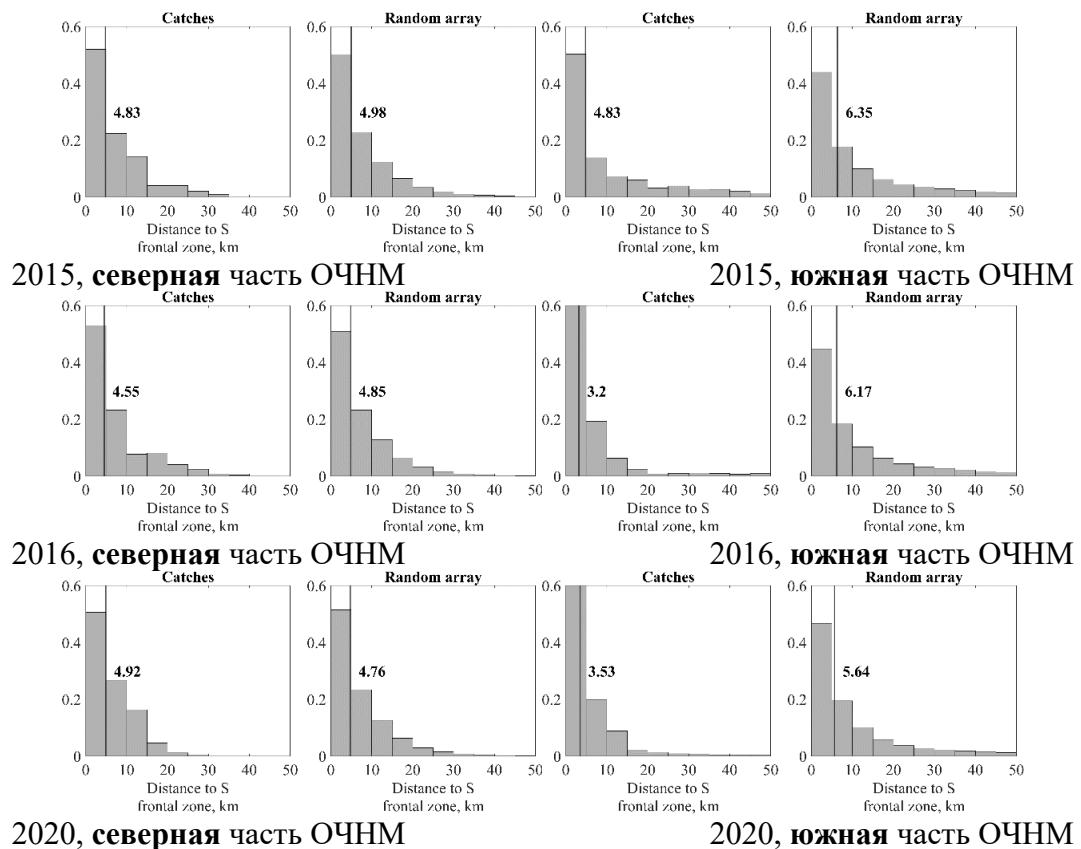


Рис. 4.7. Гистограммы расстояний от мест промысла и случайных точек до фронтальных зон, выделенных по градиенту лагранжевой характеристики S в поле скорости AVISO.

Таким образом, несмотря на различия в абсолютных величинах, оба используемых массива данных (GLORYS12V1 и AVISO) демонстрируют согласованную картину: в южном районе наблюдается устойчивая приуроченность промысловых скоплений к фронтальным зонам, тогда как для северного района такая связь не подтверждается, что, по-видимому, объясняется малым количеством исходных промысловых данных. Таким образом, результаты анализа для южного района являются статистически надежными и воспроизводимыми при использовании разных наборов данных о полях скорости.

На рисунке 4.8 представлены гистограммы, отражающие расстояния от мест траплений и случайных точек до ближайших фронтальных зон по градиенту температуры, рассчитанному по реанализу GLORYS12V1.

В северной части ОЧНМ в 2015 и 2016 годах совсем не проявляются эффекты «отталкивания» и «тяготения». В 2015 году промысел отмечается на больших расстояниях от фронтальных зон (более 40 км), медианное значение для расстояний от мест реального промысла 18,35 км, что значительно выше медианного значения расстояний от точек случайной выборки (11,93 км).

В 2016 и 2020 годах в северной части ОЧНМ слабо проявляется эффект «отталкивания» (мало значений на расстоянии более 40 км от фронтальных зон) и хорошо выражен эффект «тяготения» - медианные значения для расстояний от мест промысла до ближайшей фронтальной зоны значительно меньше таковых для случайной выборки.

В южной части ОЧНМ в 2015 и 2016 годах не проявляется эффект «отталкивания», однако проявляется эффект «тяготения». В 2020 году слабо проявляется эффект «отталкивания» и плохо проявляется эффект «тяготения».

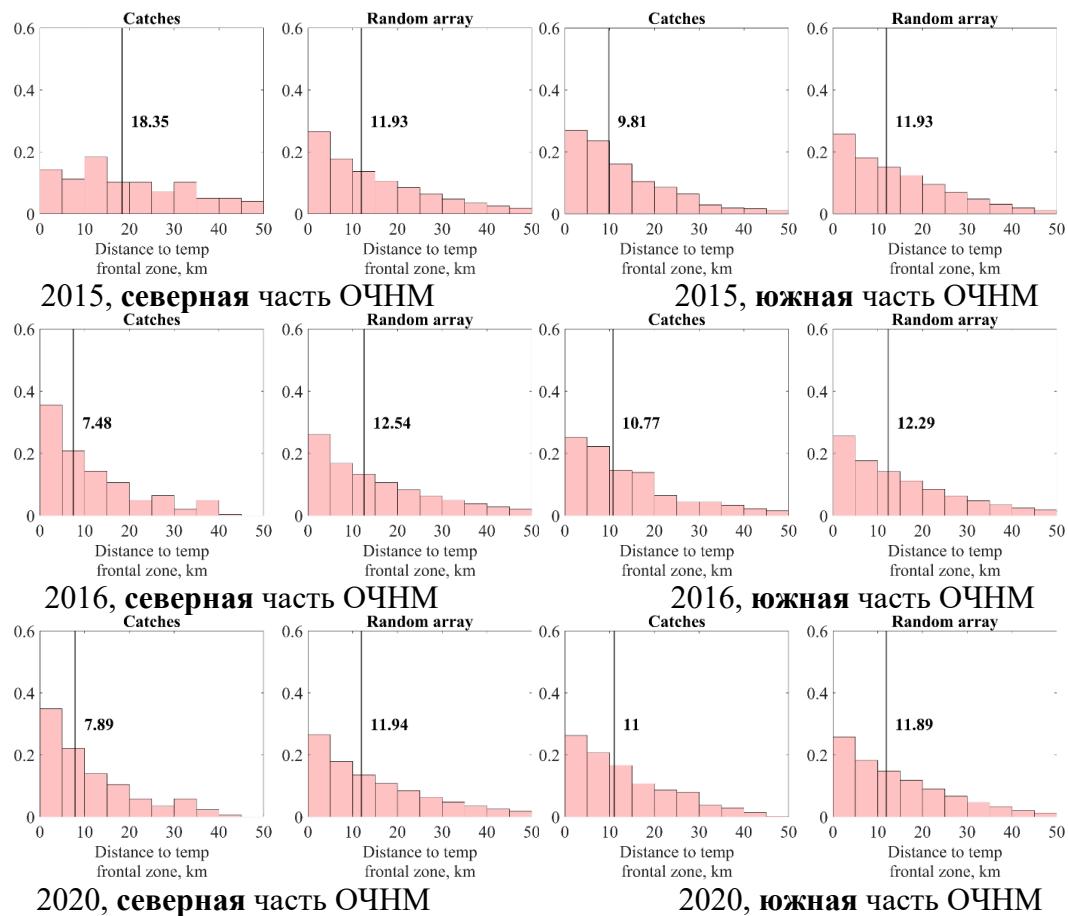


Рис. 4.8. Гистограммы расстояний от мест промысла и случайных точек до фронтальных зон, выделенных по градиенту температуры.

Таким образом, анализ динамики температуры не выявил единой закономерности. Эта изменчивость хорошо иллюстрируется сравнением северной и южной частей в разные годы: в 2015 году в южной части наблюдался эффект «тяготения» к фронтальным зонам, в северной – нет. При этом в 2016 году и в северной, и в южной частях эффект «тяготения» проявился достаточно хорошо, а в 2020 в северной части эффект «тяготения» проявился даже лучше, чем в южной.

Аналогичные гистограммы были построены для расстояний до фронтальных зон по градиенту плотности (рис. 4.9). Для обеих частей - и северной, и южной, во все годы наблюдаются два ожидаемых эффекта.

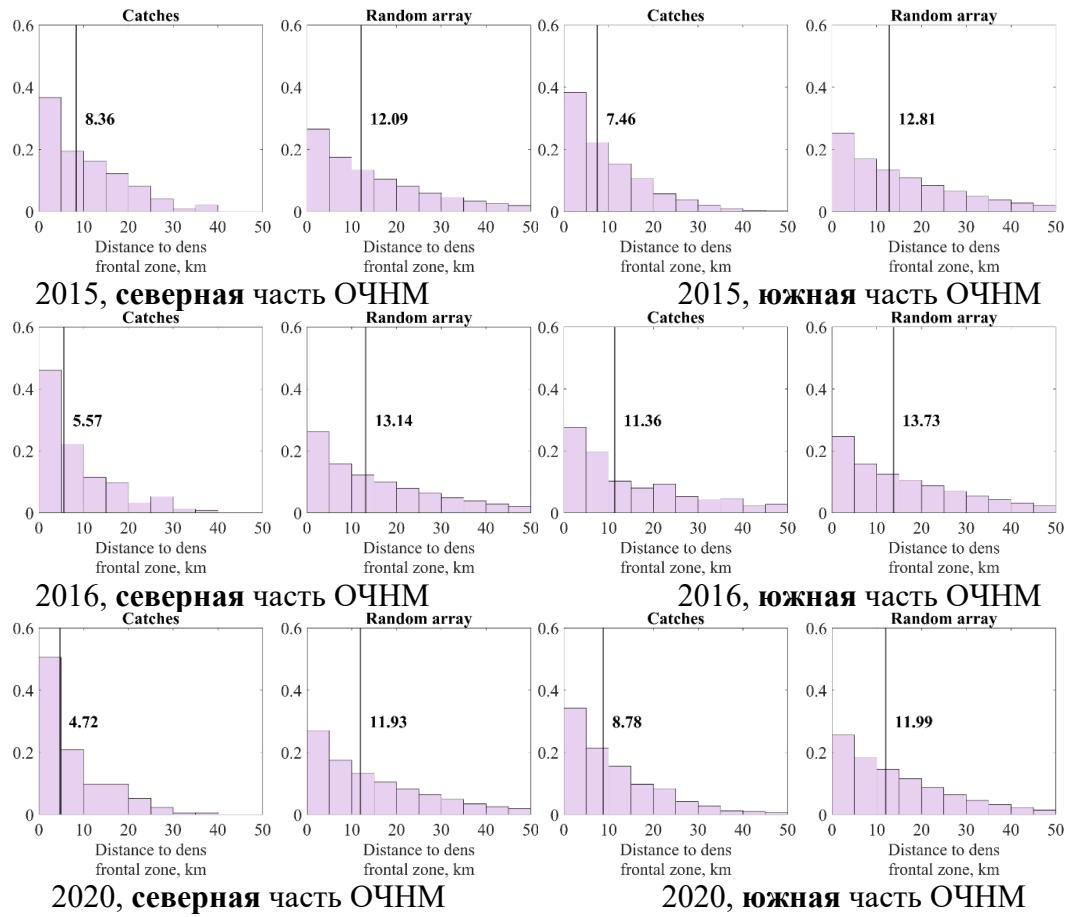


Рис. 4.9. Гистограммы расстояний от мест промысла и случайных точек до фронтальных зон, выделенных по градиенту плотности.

Таким образом, и в северной, и в южной части плотность проявляет себя как наиболее надёжная для прогнозирования мест промысла характеристика, при этом в северной части наблюдается наиболее выраженная зависимость между положением мест тралений и фронтальными зонами.

Аналогичная работа была проведена с расчётом расстояний до фронтальных зон, выделенных по градиентам солёности (рис. 4.10). В северной части в 2015 и 2020 годах медианные значения по расстояниям для фронтальных зон практически не различаются, в 2016 году медиана для реальных выловов значительно больше, чем для случайной выборки. Значимого эффекта «отталкивания» не наблюдается ни в один из рассматриваемых годов.

В южной части эффекта «отталкивания» не проявляется ни в один из годов, однако медианные значения расстояний для реальной выборки меньше, чем для случайной, что свидетельствует о «тяготении» промысла к фронтальным зонам, выделенным по солёности.

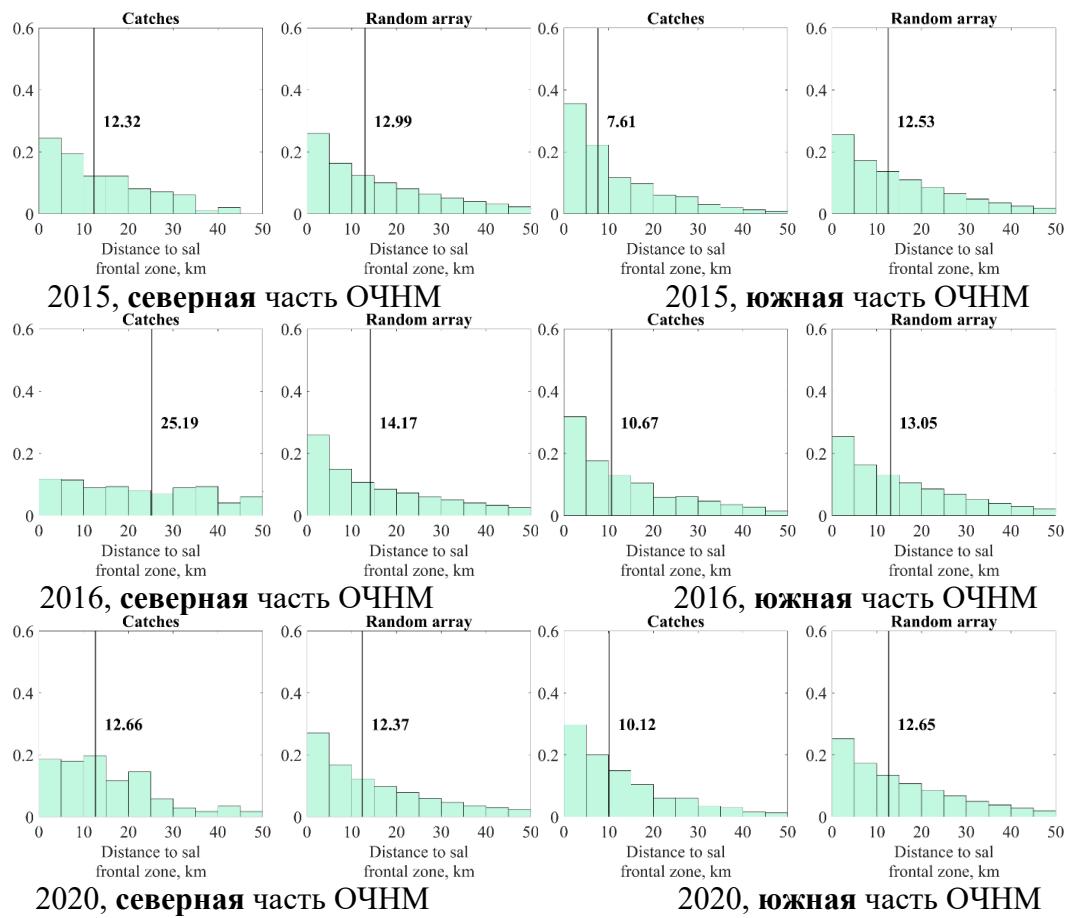


Рис. 4.10. Гистограммы расстояний от мест промысла и случайных точек до фронтальных зон, выделенных по градиенту солёности.

Таким образом, в северной части между фронтальными зонами по солёности и метами промысла не наблюдается никакой зависимости, а в южной части существует некая приуроченность промысла к ФЗ, однако выраженная не очень ярко.

4.4. Сравнение основных промысловых зон в Норвежском море

На рисунках 4.11 и 4.12 представлены диаграммы, отражающие результаты пространственного анализа распределения мест промысла Атлантической скумбрии и случайных точек относительно «тёплой» и «холодной» сторон фронтальных зон, выделенных по градиенту температуры. Верхняя панель иллюстрирует расположение случайно сгенерированных точек, тогда как нижняя панель демонстрирует фактические координаты выловов за каждый из трёх исследуемых лет: 2015, 2016 и 2020 годы.

Для расчёта применялась методика, подробно описанная в главах 1 и 2. В северной части ОЧНМ в 2015 и 2016 годах промысел, в основном, вёлся с холодных сторон фронтальных зон. В 2020 году наоборот – с тёплых сторон фронтальный зон. В южной части выловы были в течение всех трёх лет с основным с тёплых сторон фронтальных зон, однако различия между случайной и реальной выборками статистически не значимы.



Рис. 4.11. Распределение по сторонам ФЗ по температуре. Верхний ряд: случайные точки; нижний – реальные выловы.

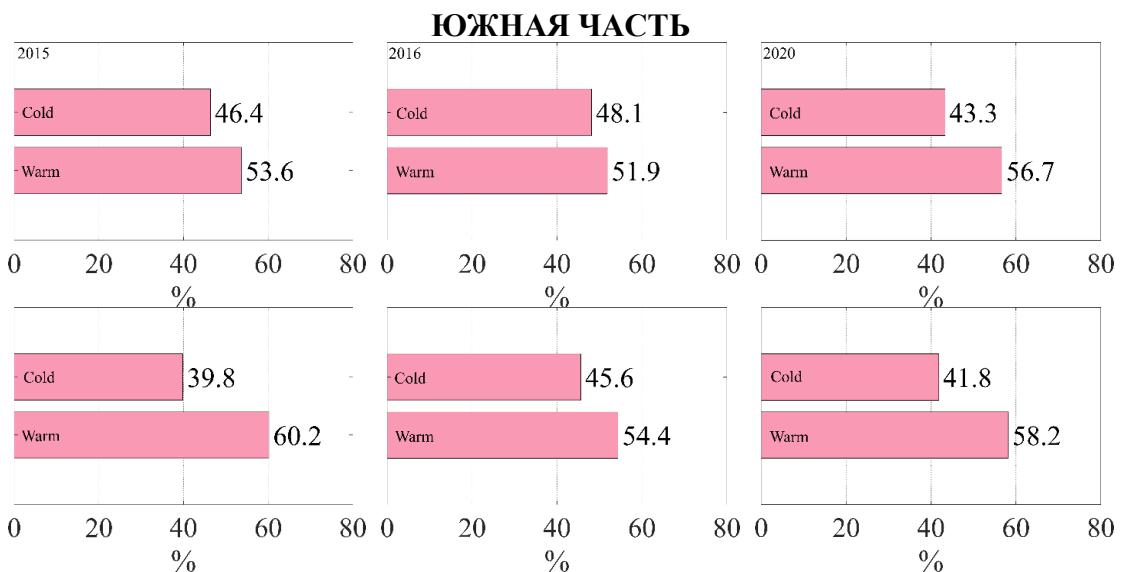


Рис. 4.12. Распределение по сторонам ФЗ по температуре. Верхний ряд: случайные точки; нижний – реальные выловы.

Анализ рисунков 4.11 и 4.12 показывает, что в южной части района большинство уловов было сделано с теплой стороны фронтальных зон. Это распределение почти не отличалось от случайного. В северной части картина менялась по годам: в 2015 и 2016 годах лов шел в основном с холодной стороны фронтов, но в 2020 году ситуация сменилась на противоположную – уловы сместились к теплой стороне. Это говорит о том, что в северной части связь между поведением рыбы и океанологическими условиями нестабильна и требует дополнительного изучения.

На рисунках 4.13 и 4.14 представлены диаграммы, отражающие результаты пространственного анализа распределения мест промысла Атлантической скунбрии и

случайных точек относительно «быстрой» и «медленной» сторон фронтальных зон, выделенных по градиенту лагранжевой характеристики S в поле скорости GLORYS12V1.

В северной части в 2015 и 2020 годах промысле тяготел к «быстрым» сторонам фронтальных зон, а в 2016 – к «медленным». В южной части разница между реальной и случайной выборками была практически незначимая, но в 2015 году немножко проявился эффект тяготения к «медленным» сторонам фронтальных зон, а в 2016 и 2020 – к «быстрым».

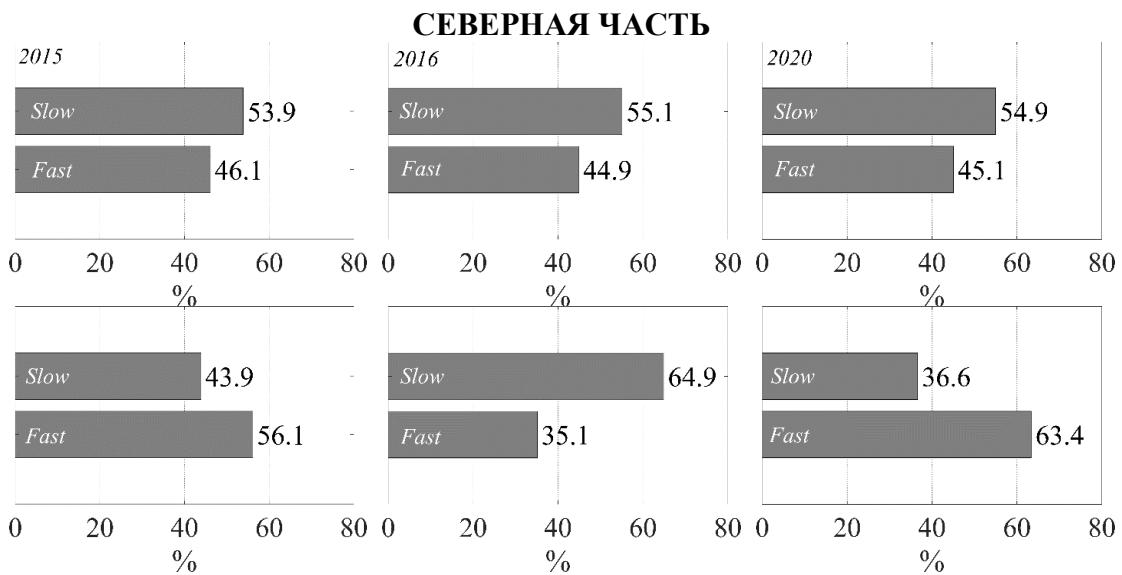


Рис. 4.13. Распределение по сторонам ФЗ по градиенту S (по GLORYS12V1). Верхний ряд: случайные точки; нижний – реальные выловы.



Рис. 4.14. Распределение по сторонам ФЗ по градиенту S (по GLORYS12V1). Верхний ряд: случайные точки; нижний – реальные выловы

Анализ рисунков 4.13 и 4.14 приводит к выводу, что однозначных закономерностей в тяготении к определённой стороне ФЗ по градиенту S выявлено не было. В разные годы и для разных районов результаты различались. Для более полного понимания

образующихся зависимостей необходимо иметь больше данных по промыслу за различные годы.

4.5. Исследование фронтогенеза в Норвежском море

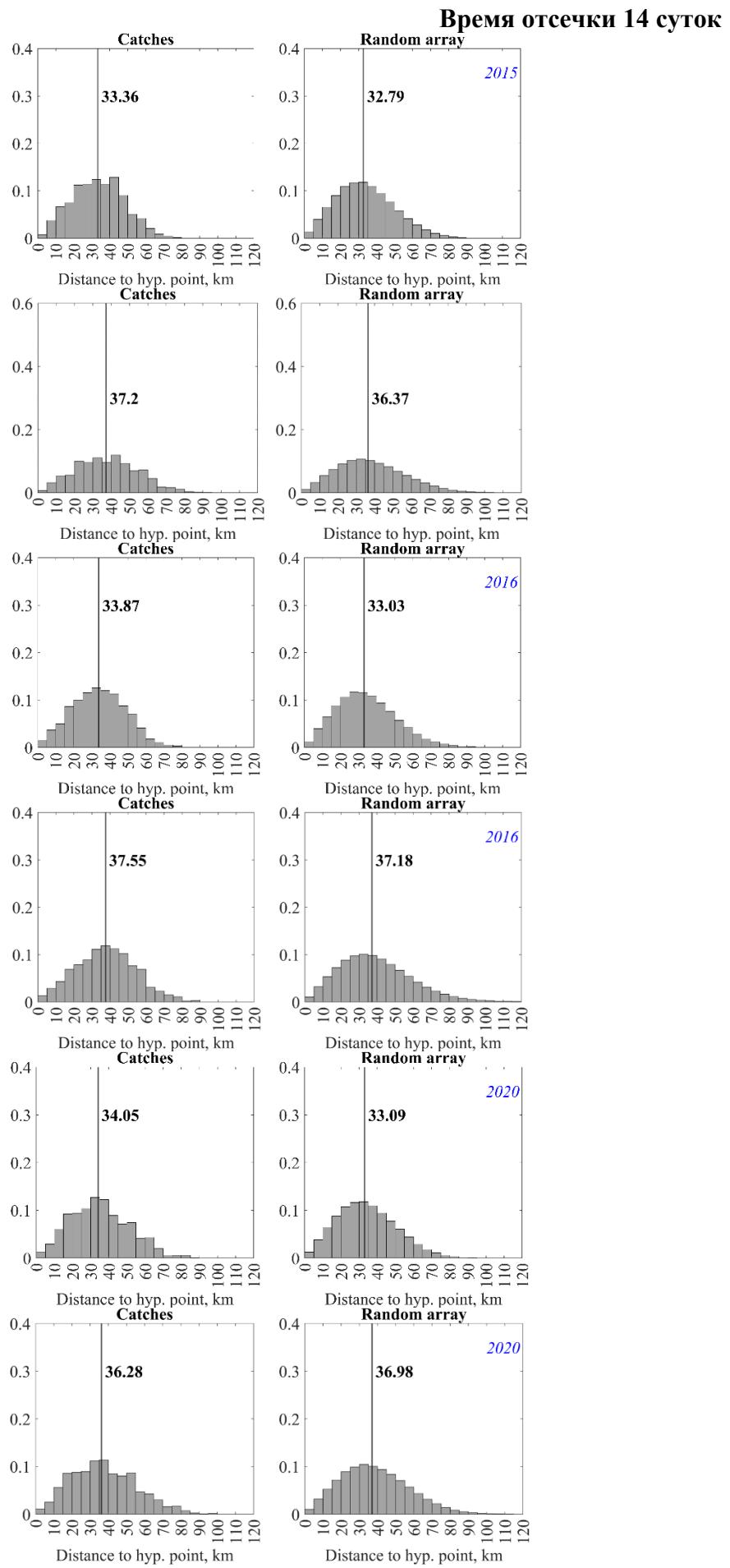
На основании идеи о том, что фронтальные зоны важны для образования промысловых скоплений рыб, проявилась задача изучения вклада океанических вихрей в создание благоприятных условий для скоплений Атлантической скумбрии.

Центры вихрей и гиперболические точки были найдены по алгоритму НЕРТА (Udalov, Uleysky, 2025). Далее анализировались распределения по расстояниям от точек вылова и случайной выборки до гиперболических точек (по AVISO).

Как известно, гиперболические точки являются своего рода «генераторами фронтов» (Prants, 2025). Фронт можно представить как неустойчивое многообразие гиперболической точки, поэтому для анализа пространственного распределения промысла относительно фронтальных зон для каждого пункта лова было рассчитано расстояние до ближайшей гиперболической точки (рис. 4/15). С целью статистического сравнения и проверки значимости полученных распределений аналогичная процедура была выполнена для контрольной выборки, состоящей из тысячи случайных точек, равномерно распределенных по всей акватории исследуемого района. Данная выборка имитировала гипотетический промысел в случае отсутствия избирательности по отношению к фронтальным зонам.

Исходное количество гиперболических точек в регионе оказалось чрезмерно велико для проведения содержательного анализа. В связи с этим, для фильтрации и выделения наиболее устойчивых и, предположительно, значимых для пелагической экосистемы фронтов, было применено дополнительное условие по минимальной продолжительности их существования. В качестве критериев были выбраны пороги в 14, 30 и 60 суток. Таким образом, последующий анализ проводился для четырёх независимых наборов данных, включавших все гиперболические точки и те, время жизни которых превышало указанные значения.

Без отсечки



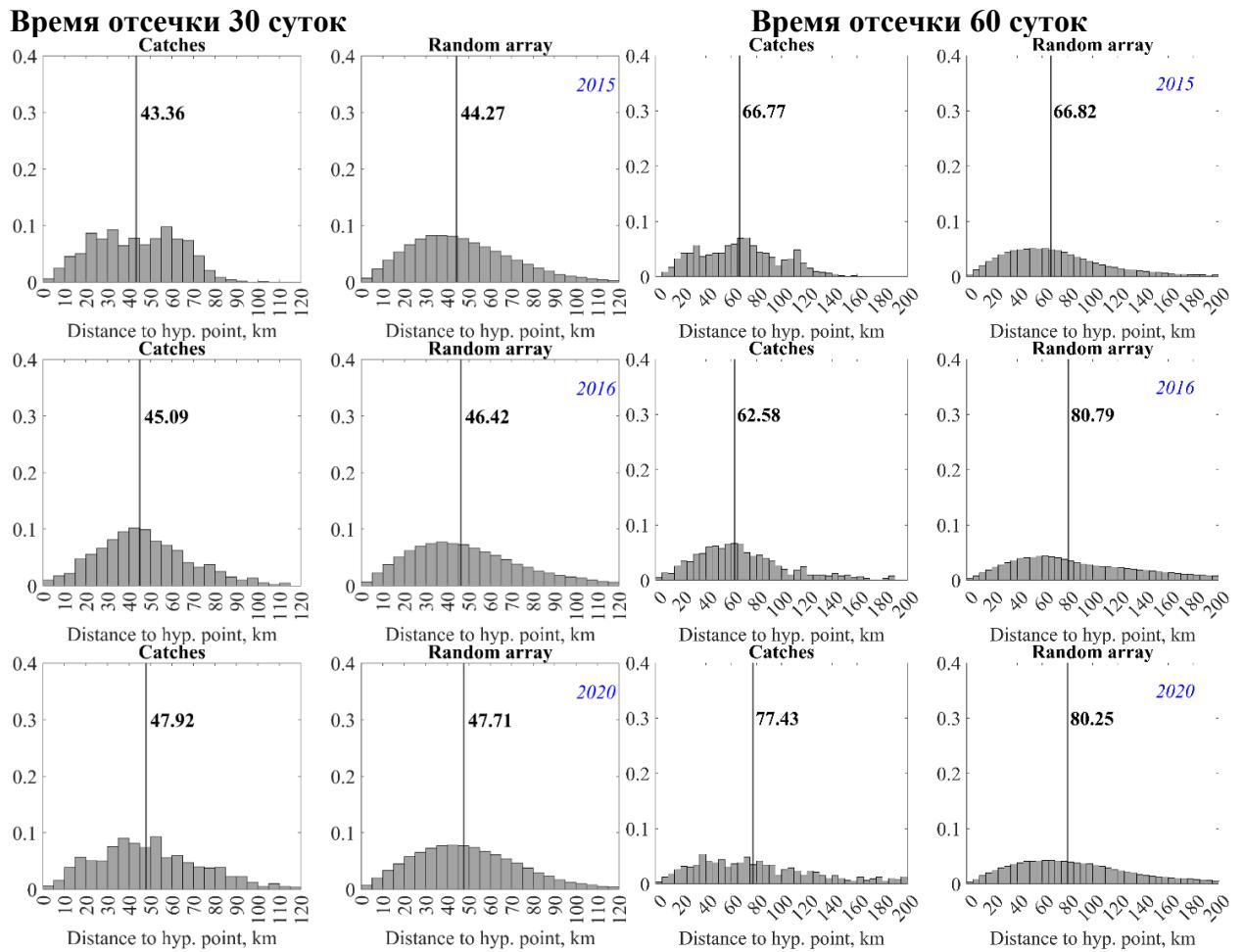
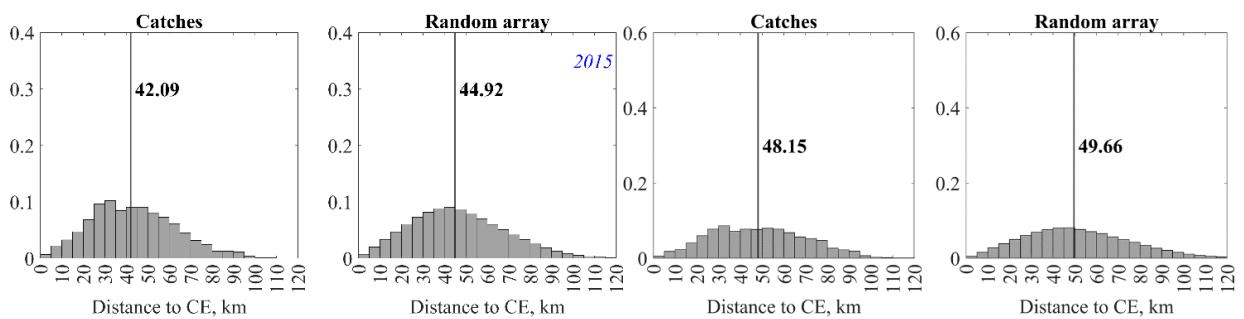


Рис. 4.15. Гистограммы расстояний от мест промысла и точек случайной выборки до ближайшей гиперболической точки.

Таким образом, сдвиг медианы в сторону меньших значений для реальных выловов наблюдается практически для всех наборов данных, но он слишком мал, чтобы говорить о существовании значимой закономерности между распределением промысловых скоплений и гиперболическими точками.

Аналогичная работа была проведена для центров циклонов (рис. 4.16) и антициклонов (рис. 4.17).

Без отсечки



Время отсечки 14 суток

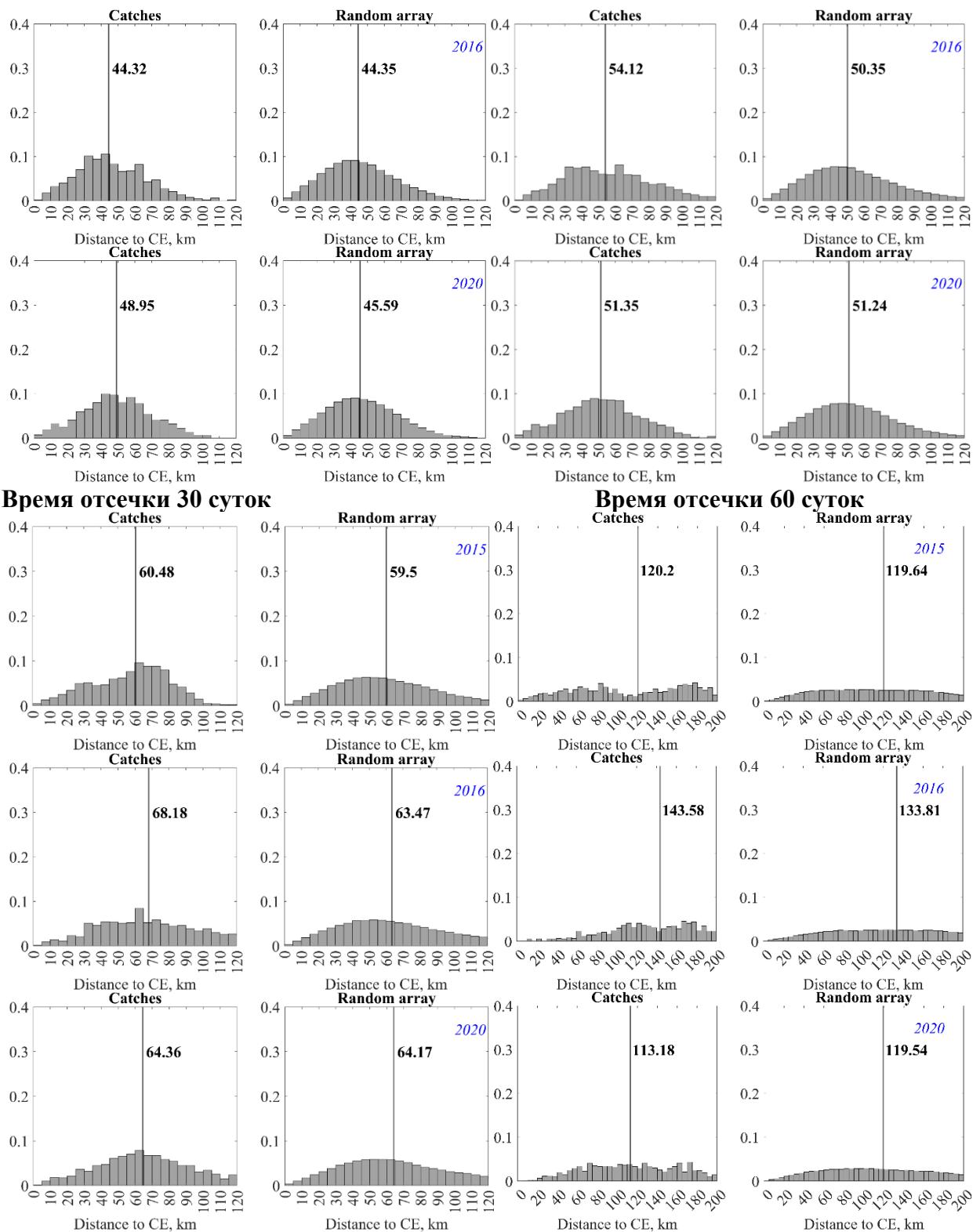
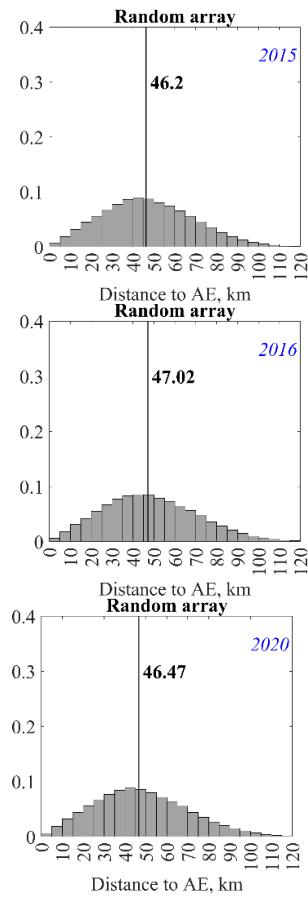
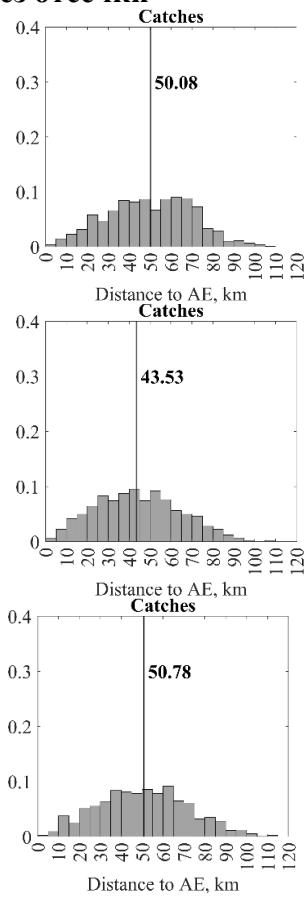


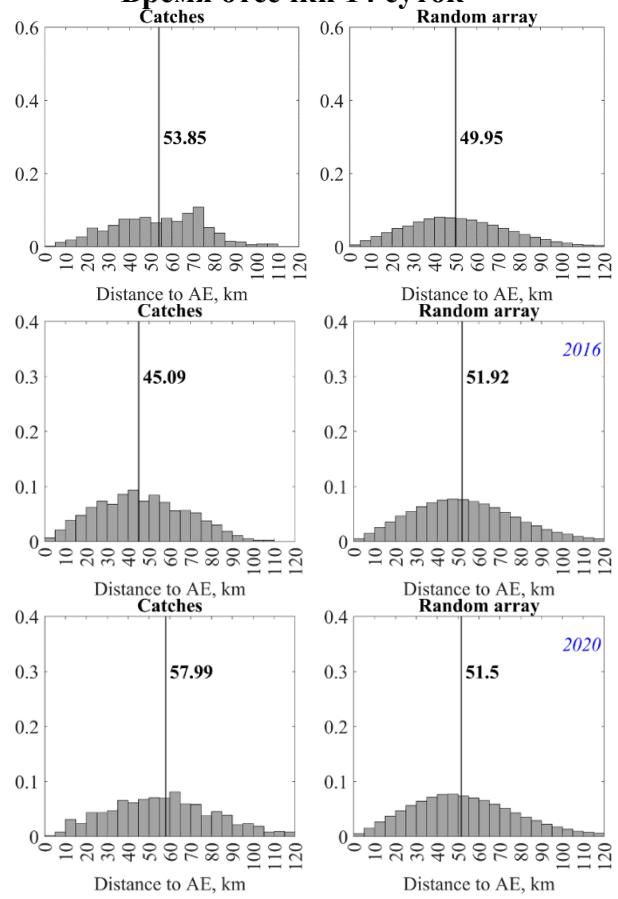
Рис. 4.16. Гистограммы расстояний от мест промысла и точек случайной выборки до центра ближайшего циклона.

Вывод: анализ гистограмм расстояний от мест промысла и точек случайной выборки до центра ближайшего циклона показывает, что нет никаких статистически значимых различий.

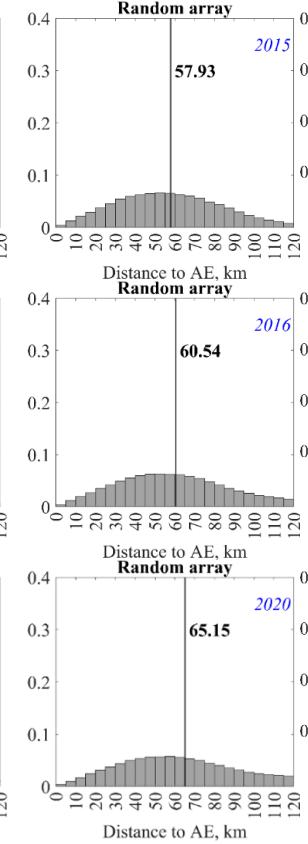
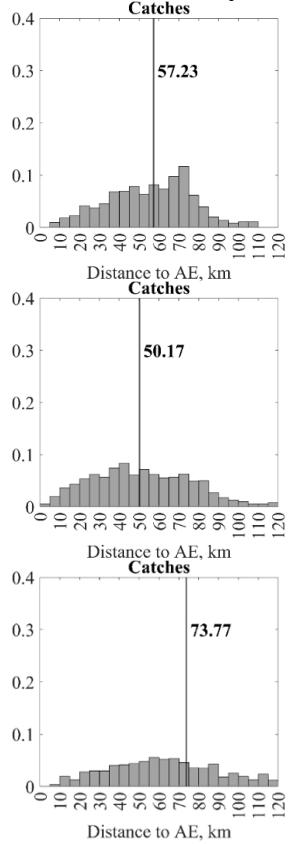
Без отсечки



Время отсечки 14 суток



Время отсечки 30 суток



Время отсечки 60 суток

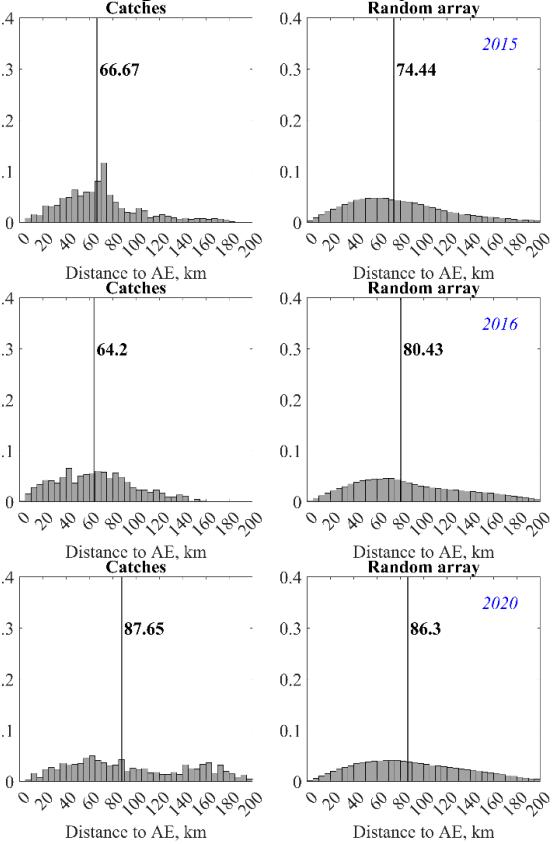


Рис. 4.17. Гистограммы расстояний от мест промысла и точек случайной выборки до центра ближайшего антициклона.

Вывод аналогичный: никаких закономерностей не выявлено. Распределения реальных выловов и случайных точек совпадают.

Таким образом, анализ распределений расстояний от мест промысла до центра ближайшего циклона/антициклона не выявил статистически значимых закономерностей. Наблюдаемые распределения для фактических выловов и случайной выборки оказались сходными, что позволяет предположить отсутствие прямой корреляции между расположением промысла и близостью к центрам вихрей в рассматриваемом регионе.

4.6. Сравнительная оценка продукта реанализа GLORYS12V1 и спутниковых данных MODIS

Современные методы анализа океанографических данных для нужд рыбного промысла традиционно опираются на спутниковые наблюдения. Однако ключевым недостатком этой информации является её высокая зависимость от атмосферных условий, в частности, облачности, которая препятствует получению спутником данных о состоянии поверхности океана. В качестве альтернативы используются продукты реанализа, такие как GLORYS12V1, которые предоставляют непрерывные и полные по охвату временные ряды параметров океана.

В рамках данного исследования была проведена сравнительная оценка продукта реанализа GLORYS12V1 и спутниковых данных MODIS. На рисунке 47 визуализированы результаты идентификации особых точек динамики океана: гиперболические точки обозначены крестиками, центры антициклонических вихрей – красными треугольниками, а циклонических – синими. Данные структуры были рассчитаны как по альtimетрическим данным AVISO, так и по полю скорости из GLORYS12V1. Анализ показал, что поле температуры поверхности океана (ТПО), полученное со спутника MODIS, демонстрирует хорошее соответствие с положением особых точек, рассчитанных по AVISO. Как и следовало ожидать, поле ТПО из реанализа GLORYS12V1 полностью согласуется с особыми точками, выявленными по его собственному полю скорости.

Помимо данных MODIS, в работе были задействованы и другие спутниковые продукты, полученные с общедоступного портала Copernicus, что позволило обеспечить более полное покрытие и валидацию результатов (рис. 4.18).

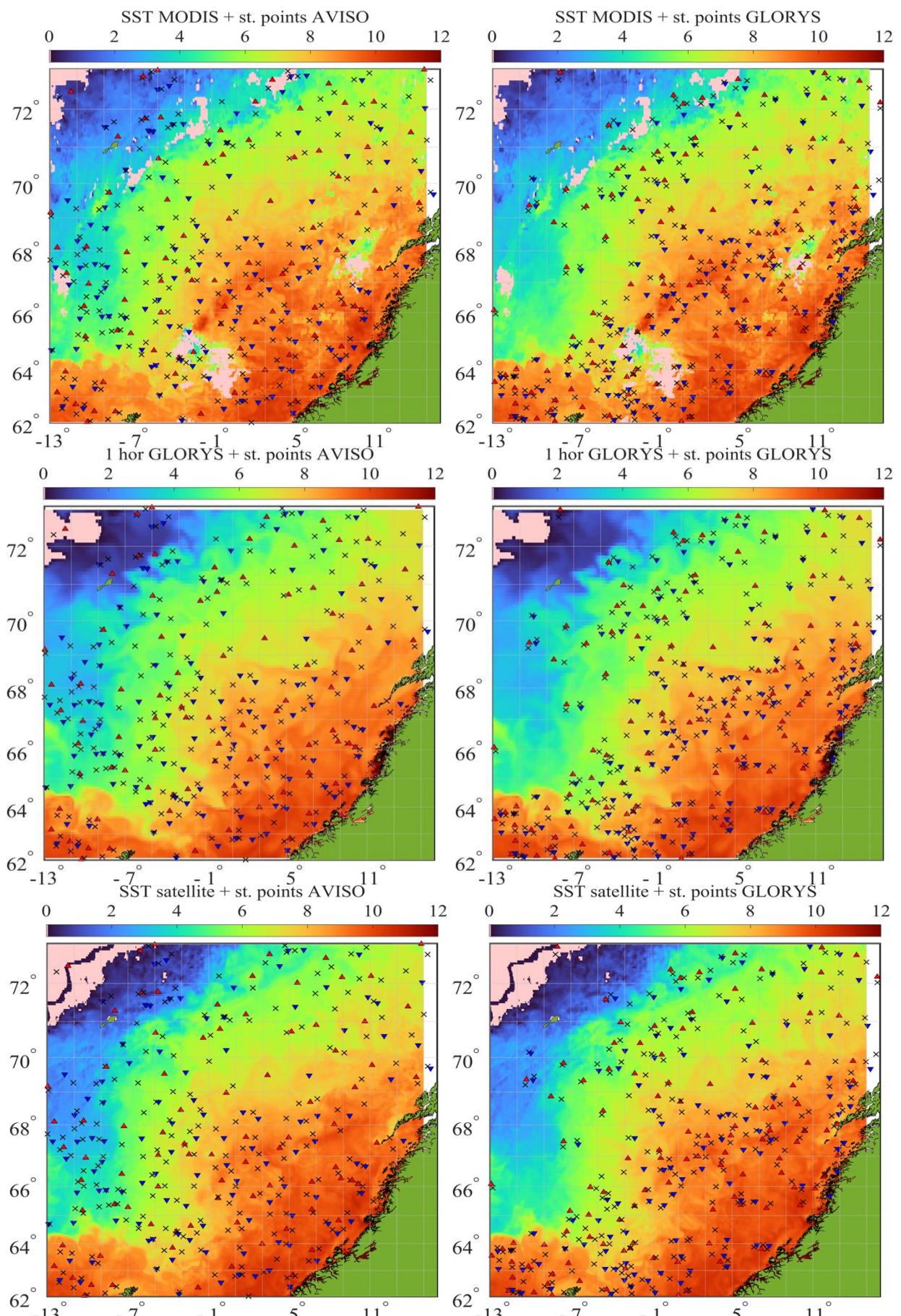


Рис. 4.18. Температура поверхности океана за 11 июня 2020 года по данным разных продуктов.

4.7. Карты эйлеровых и лагранжевых характеристик по GLORYS12V1 и AVISO

Для сравнения данных по реанализу GLORYS12V1 и альтиметрии AVISO были построены рисунки за дату 4 августа 2020 года.

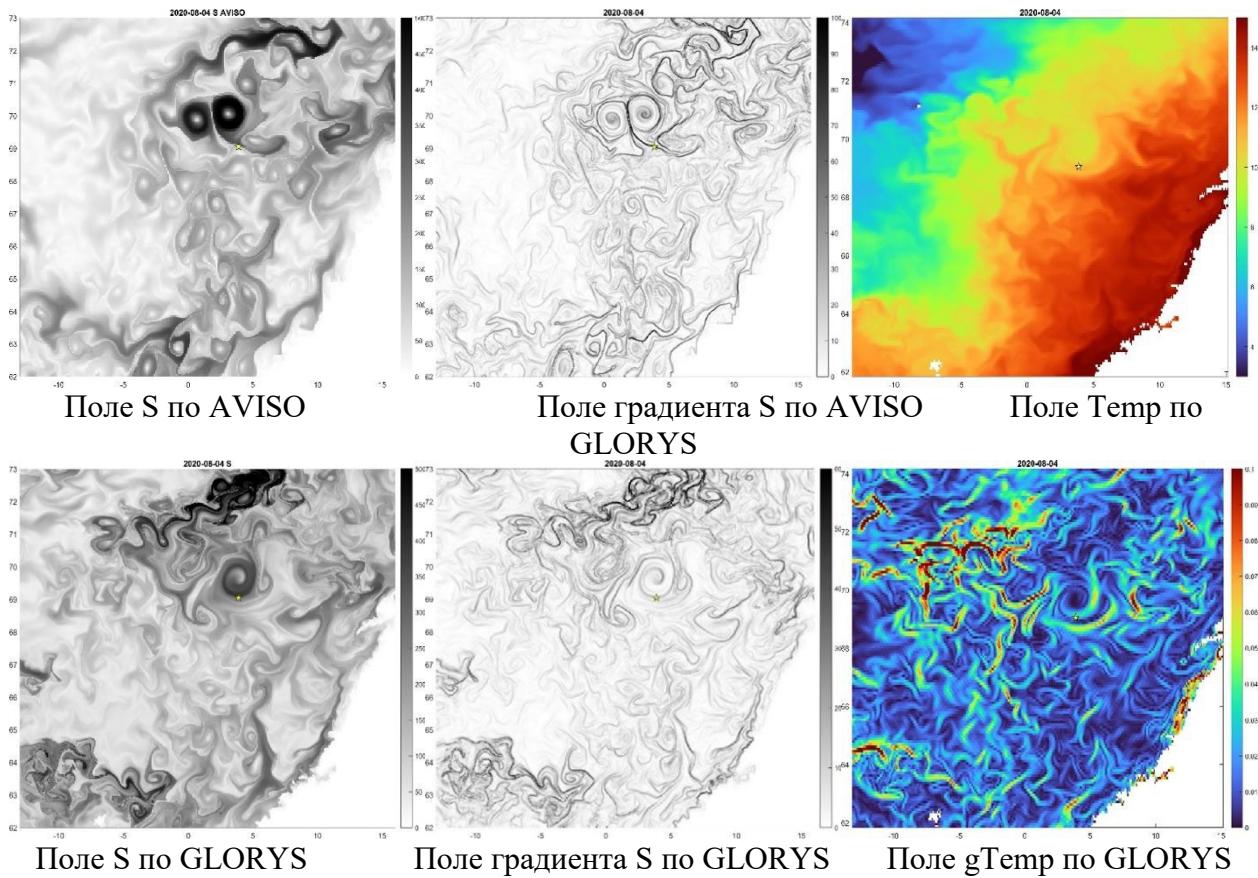


Рис. 4.19. Сравнение океанологических характеристик по AVISO и GLORYS12V1. Дата – 4 августа 2020 года.

Хотя AVISO и GLORYS12V1 одинаково показывают области с высокой динамической активностью, конкретные структуры вихрей и фронтов сильно различаются.

Мы также рассматривали возможность использовать для построения лагранжевых фронтов иные лагранжевые индикаторы, например смещение за заданное время (D) и накопленный показатель Ляпунова (L), но предварительный анализ показал значительное сходство фронтов этих величин с фронтами S.

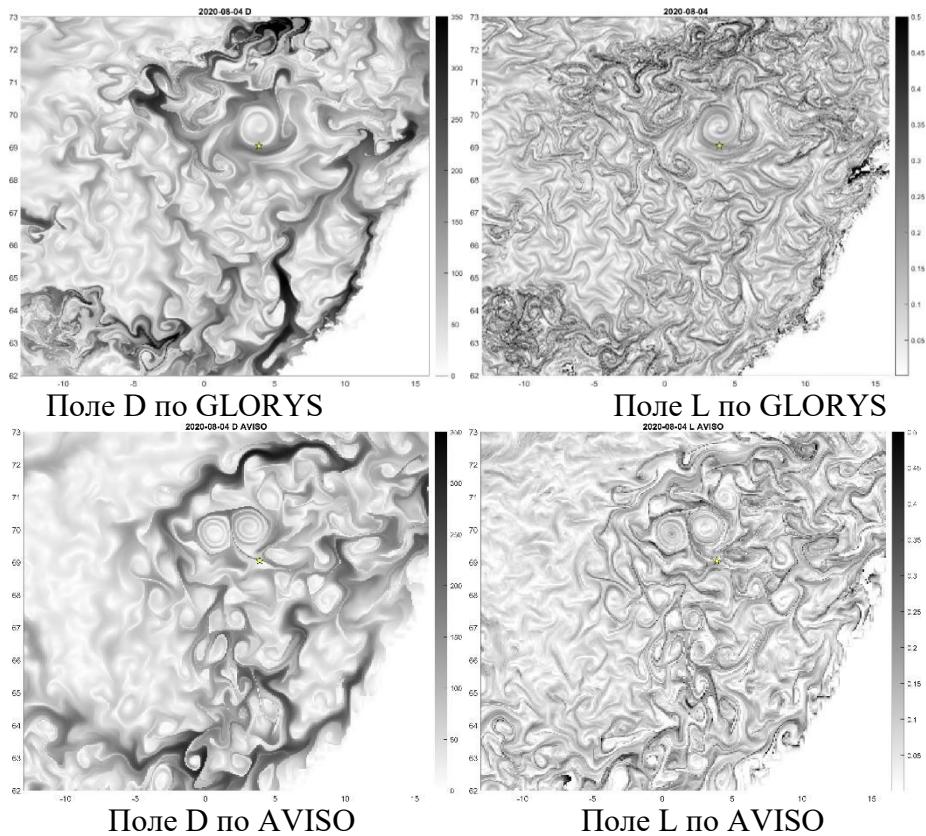


Рис. 4.20. Поля лагранжевых характеристик D и L по GLORYS12V1 и AVISO. Дата – 4 августа 2020 года.

Отдельный анализ был проведён для фронтальных зон в изучаемом районе.

Рассматривались графики изменения площадей фронтальных зон (обезразмеренные). При анализе распределений значений SST возникает вопрос о расчете площадей – какую отсечку использовать за конкретный год или за каждый день.

Построение графиков и анализ показали следующую динамику:

- зависимости 80-го перцентиля ежедневного значения отсечки от времени (для определения пороговых значений);
- расчет площади фронтальных зон (Φ_3) на каждые сутки и график зависимости этой площади от времени (для оценки пространственно-временной изменчивости);
- диаграммы распределения расстояний от мест уловов и случайной выборки до фронтальных зон, определенных по индикатору S и температуре, с учетом ежедневных статистических характеристик (для анализа пространственной приуроченности промысла).

Для анализа динамики фронтальных зон (Φ_3) в исследуемом регионе были рассчитаны временные ряды изменений их общей площади. Выделение Φ_3 проводилось по фиксированному порогу, соответствующему квантилю 0.8 функции распределения

вероятностей для каждого используемого параметра. На рисунке 50 представлены результирующие графики, где серой линией отображена площадь Φ_3 , выделенных по градиенту лагранжевой характеристики S на основе данных GLORYS12V1; зелёной линией – площадь Φ_3 по градиенту S , рассчитанной по альтиметрическим данным AVISO; красной линией – площадь Φ_3 , идентифицированных по величине градиента температуры поверхности океана по данным GLORYS12V1.

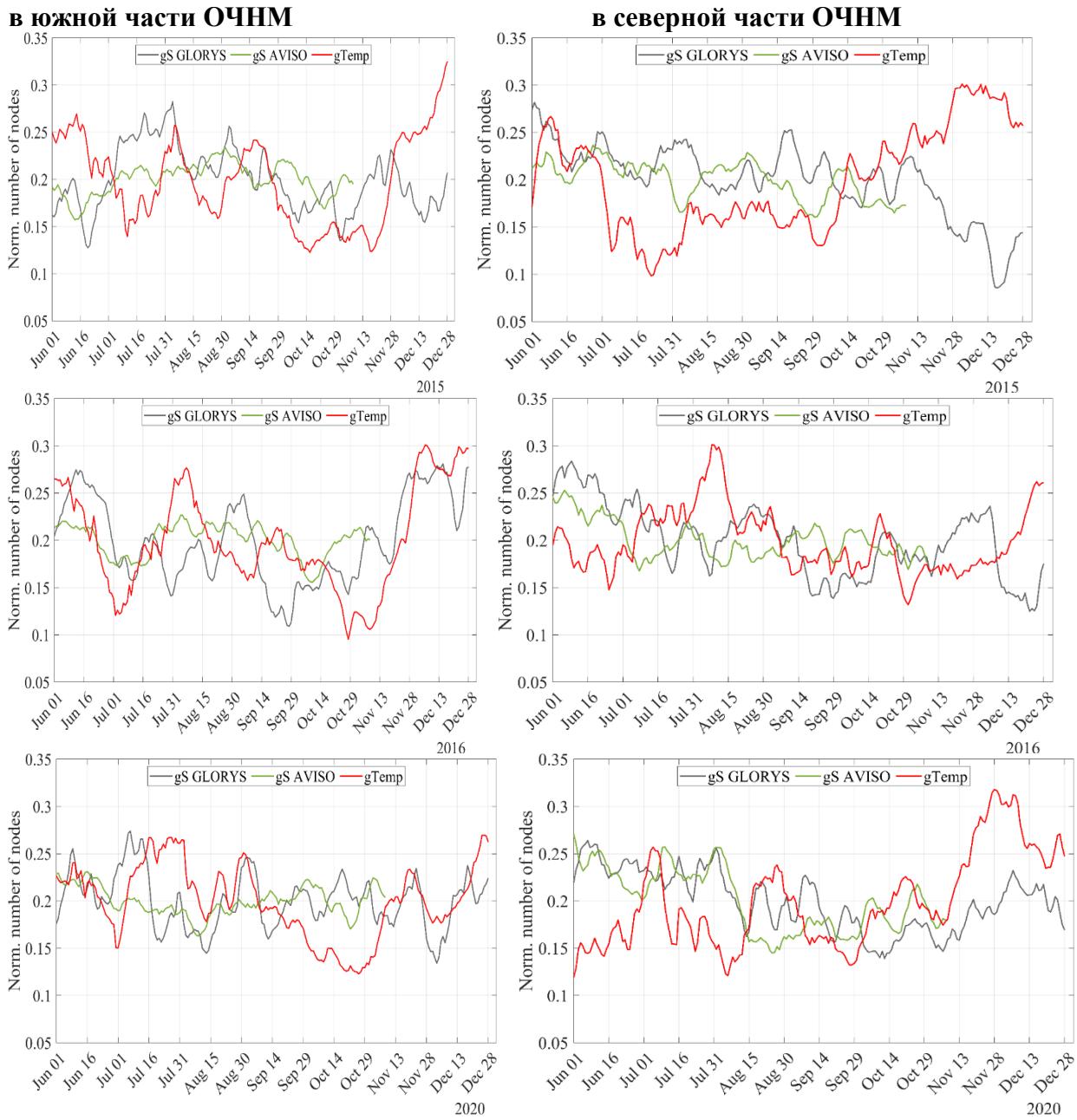


Рис. 4.21. Графики изменения площади фронтальных зон по градиенту S , посчитанному в поле скорости GLORYS12V1 и AVISO, и градиенту температуры по GLORYS12V1.

Вывод: визуальный анализ полученных временных рядов позволяет выявить отсутствие синхронности в колебаниях площадей фронтальных зон, рассчитанных по различным параметрам. Наблюдаемые расхождения в динамике свидетельствуют о том, что

изменения пространственной структуры фронтов, определяемых по динамическим и термическим характеристикам, носят независимый характер. Данное наблюдение подчеркивает сложность и многокомпонентную природу океанских фронтов, что указывает на необходимость их комплексного описания с привлечением разнородных данных.

На предыдущих этапах работы была использована фиксированная отсечка, посчитанная по функции распределения вероятностей за промысловый период, то есть за несколько месяцев. Применение такого подхода приводит к изменению площадей выделенных в итоге фронтальных зон (рис. 4.21). Альтернативным подходом является расчёт функции распределения ежедневно, таким образом можно гарантированно выделять 20% акватории как фронтальные зоны.

На рисунке 4.22 представлено изменение значения отсечки по градиенту лагранжевой характеристики S , рассчитанной в полях скорости AVISO и GLORYS12V1.

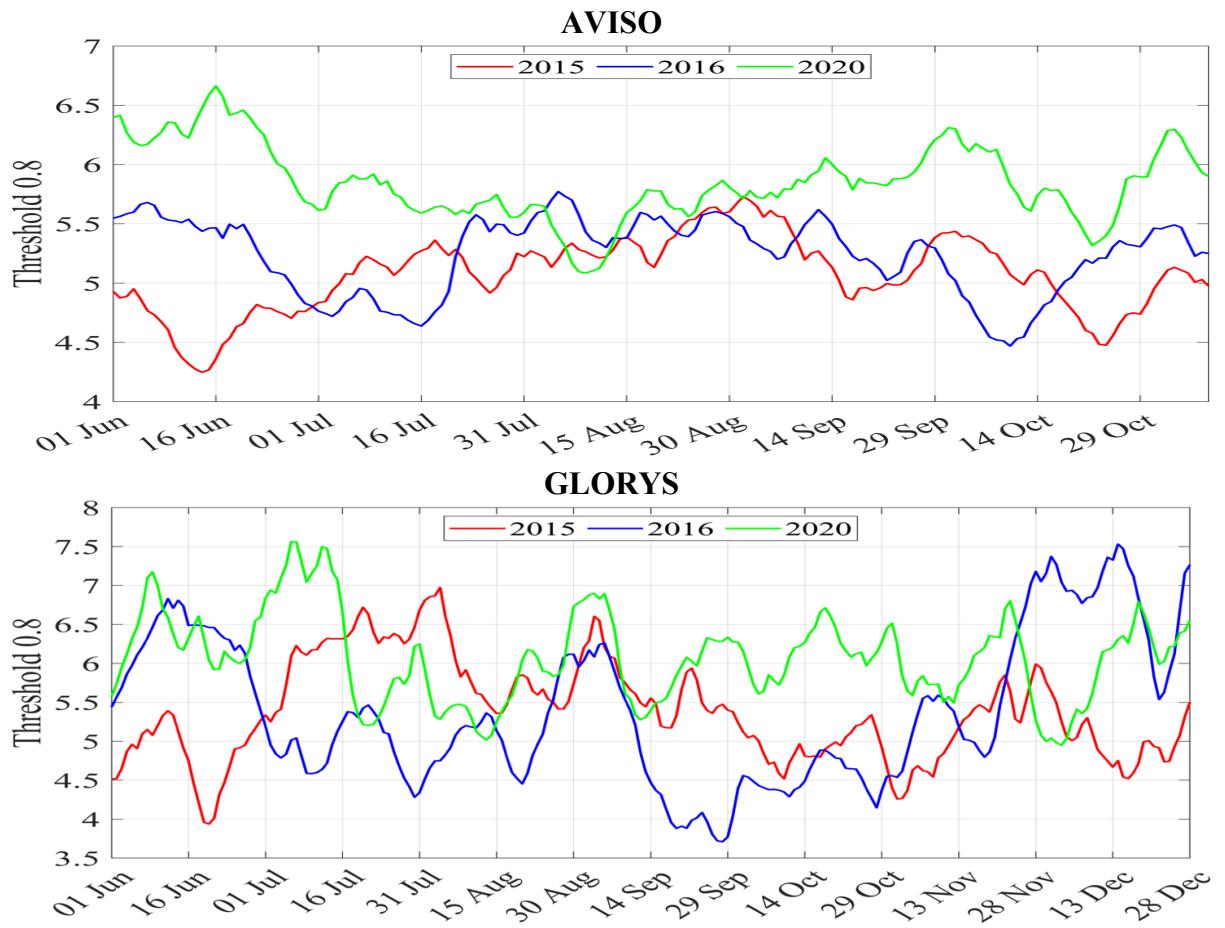


Рис. 4.22. Изменение отсечки по градиенту лагранжевой характеристики S за разные годы.

Вывод по рисунку 4.22: сезонной зависимости, которая проявлялась бы каждый год, выявлено не было. При этом в течение промыслового периода значение, соответствующее отсечке 0,8 по функции распределения вероятностей, может значительно изменяться. Это

означает, что динамика в районе активно меняется. При сравнении графиков между собой видно, что по GLORYS12V1 значения отсечки несколько выше, чем по AVISO.

4.8. Анализ фронтальных зон в районах российского промысла рыб в Норвежском море

В настоящем разделе представлена методология и результаты анализа вероятности проявления фронтальных зон в районах российского промысла рыб в Норвежском море.

На рисунке 4.23 представлены карты пространственного распределения вероятности проявлений фронтальных зон, построенные на основе анализа лагранжевой характеристики S , рассчитанного по полю скорости из реанализа GLORYS12V1. Для детального изучения региональных особенностей анализ проводился раздельно для северной и южной частей обследуемой акватории (ОЧНМ): первый и второй столбцы рисунка соответствуют северной части, третий и четвертый – южной. В рамках каждого региона визуализируются как нормированные значения вероятности (1-й и 3-й столбцы), так и абсолютное количество случаев превышения порога (2-й и 4-й столбцы).

Вероятность в каждом узле расчетной сетки определялась следующим образом: за весь промысловый период фиксировалось количество дней, в которые значение S было равно или превышало заданный порог (отсечку). Затем это число делилось на общее количество дней в рассматриваемом периоде, что давало оценку вероятности проявления фронта в данной точке.

Ключевой вывод, следующий из анализа карт, заключается в невозможности установления единого порогового значения S для всей исследуемой акватории. Обусловлено это значительными различиями в динамической активности регионов. Так, северная часть характеризуется значительно более высокой динамикой. Если в качестве критерия выбрать порог, характерный для севера, то на юге практически не фиксируется значений, его превышающих, в результате чего южная часть на карте вероятностей оказывается не выражена. И наоборот, порог, репрезентативный для южной части, оказывается слишком низким для севера, где он превышается практически постоянно, что лишает карту информативности для выделения наиболее значимых фронтальных образований в высокоактивной зоне. Таким образом, для адекватной оценки фронтальной структуры в гетерогенных по динамике условиях необходимо применение регионально-адаптированных пороговых значений.

Анализ пространственного распределения фронтальных зон в Норвежском море выявил четкие региональные особенности. В северной части акватории наиболее устойчивые и интенсивные фронты формируются вдоль её северной границы, где также наблюдается выраженная квазистационарная структура – Лофотенский вихрь, играющий ключевую роль в динамике региона.

В противоположность этому, в южной части зоны фронтальная активность концентрируется преимущественно в восточном секторе. Именно эта область характеризуется максимальной интенсивностью промысла атлантической скумбрии, что позволяет предположить прямую связь между океанографическими условиями, формируемыми фронтами, и распределением промысловых скоплений.

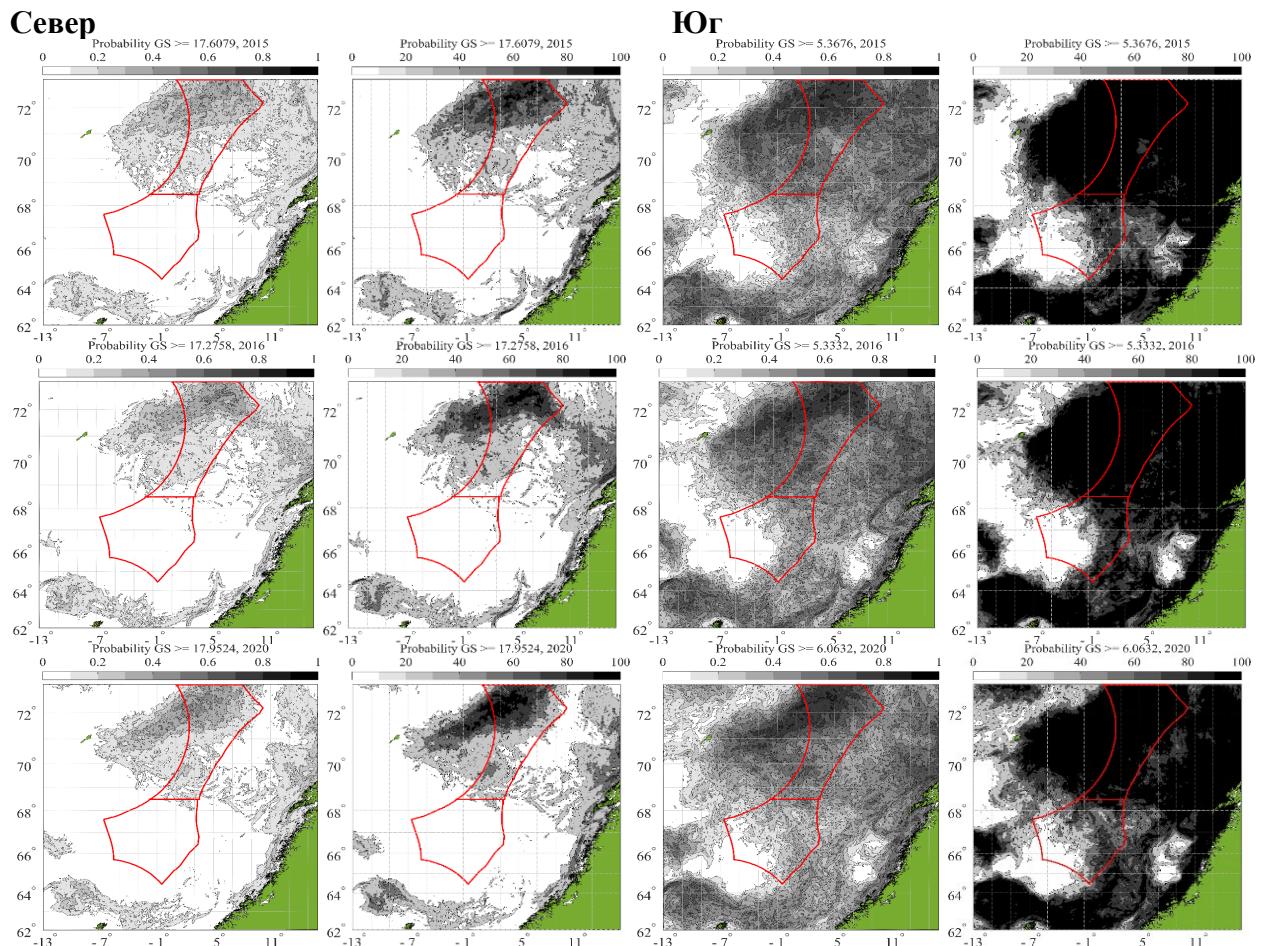


Рис. 4.23. Карты вероятности обнаружения фронтальной зоны по градиенту S в рассматриваемом районе.

Аналогичная процедура картографирования вероятности проявления фронтальных зон (ФЗ) была применена к полям градиента температуры и градиента плотности (рис. 4.24). Представленные результаты организованы следующим образом: первый столбец отображает вероятность формирования ФЗ по градиенту температуры, рассчитанную с использованием порогового значения для северной части Норвежского моря (ОЧНМ);

второй столбец – с использованием порога для южной его части. Третий и четвертый столбцы демонстрируют аналогичные распределения вероятностей, но рассчитанные по градиенту плотности для северного и южного регионов соответственно.

Проведенный анализ выявил, что различия между пороговыми значениями (квантиль 0.8), установленными для северной и южной частей по эйлеровым характеристикам (градиенты температуры и плотности), являются менее контрастными по сравнению с ранее рассмотренной лагранжевой характеристикой S . Как следствие, визуальное различие между картами, построенными для разных порогов, выражено слабее. При этом установлено, что во всех случаях пороговое значение для южной части акватории несколько ниже, чем для северной. Это закономерно приводит к увеличению расчетной площади фронтальных зон в северном регионе при применении «южного» порога, поскольку менее строгий критерий выделяет большую площадь.

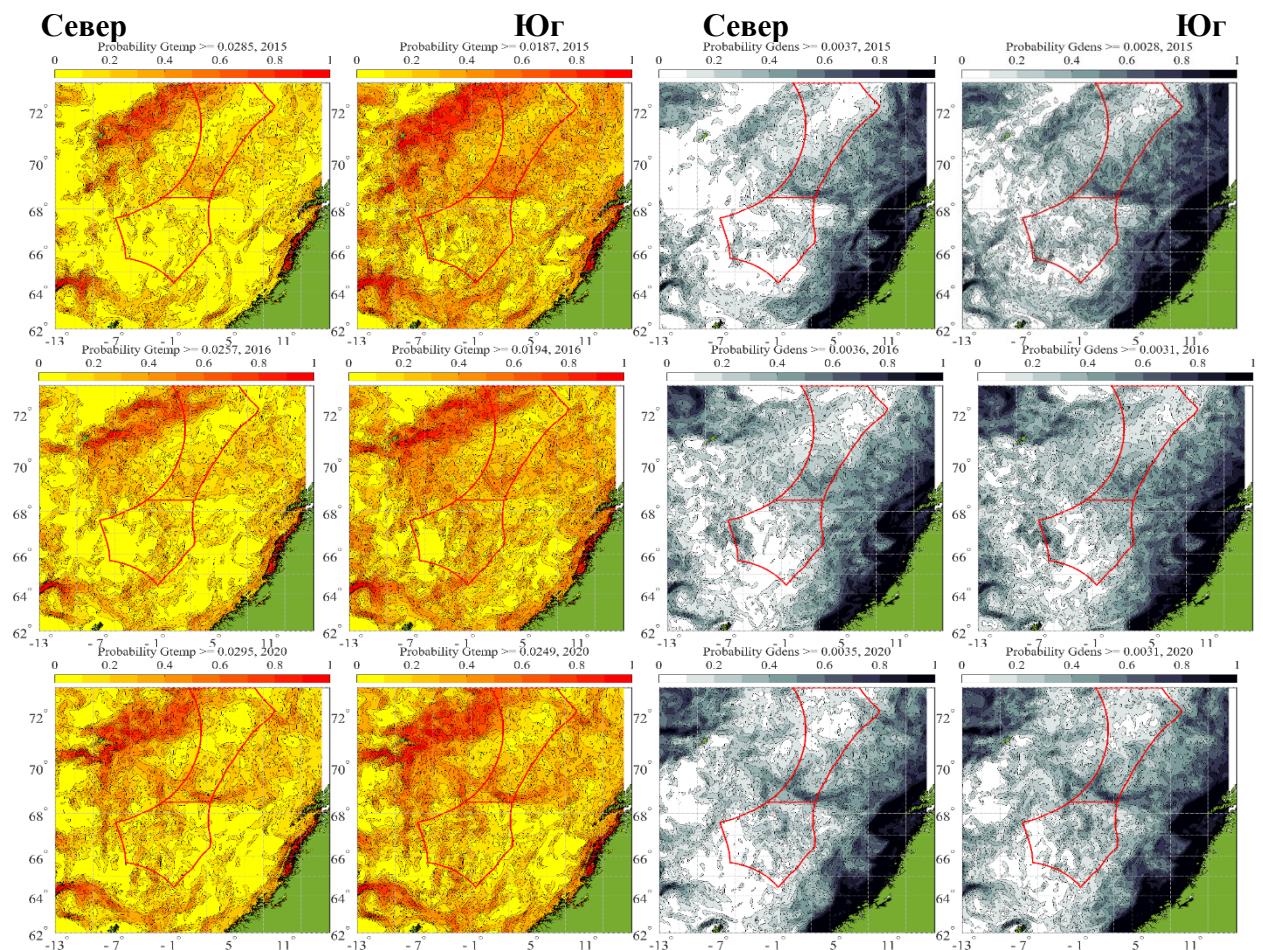


Рис. 4.24. Карты вероятности обнаружения фронтальной зоны по градиенту S в рассматриваемом районе.

Вывод: для разных частей ОЧНМ действительно имеет смысл установление собственного характерного порогового значения. Особенно это важно при рассмотрении

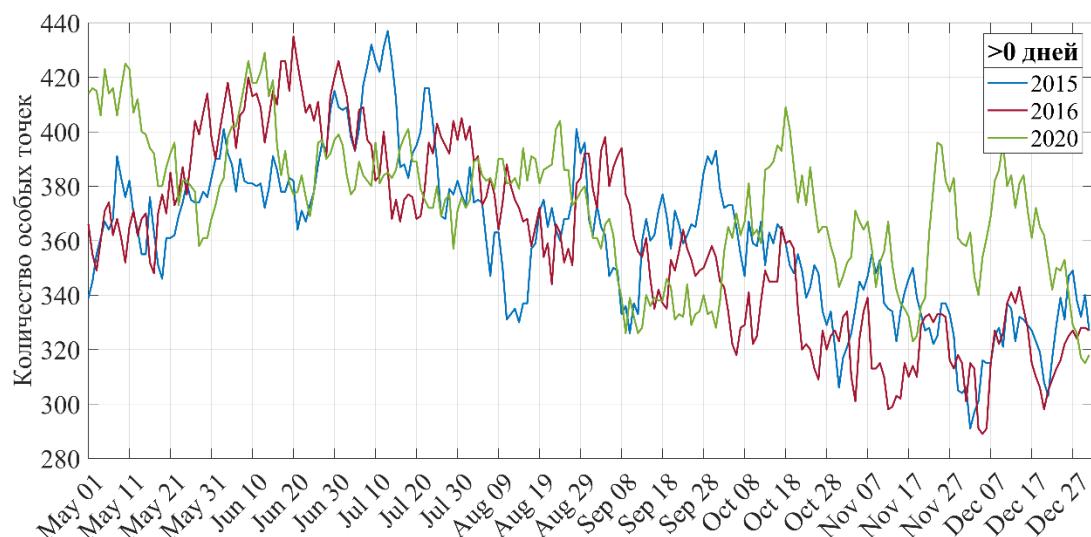
лагранжевой характеристики S , так как динамика крупного района существенно различается.

4.9. Связь гидрологического режима с изменениями количества динамических особых точек в промысловых районах Норвежского моря

В данном разделе предпринята попытка установить связь между изменением суммарной площади фронтальной зоны для выбранной характеристики в заданные сутки и общим количеством особых точек в районе промысла.

Для всего исследуемого района ($[-13^{\circ}$ до 16° в.д.; 62° до 73° с.ш.]) было проанализировано общее количество особых точек, идентифицированных за весь промысловый период. На рисунке 4.25 представлена динамика изменения их количества. Под особыми точками понимаются центры циклонов и антициклонов, а также гиперболические точки, выявленные с помощью алгоритма НЕРТА в поле скорости альtimетрических данных AVISO.

С целью выделения наиболее устойчивых образований был применен фильтр по минимальной продолжительности их существования. При установлении порога в >30 суток количество учитываемых особых точек сокращается приблизительно вдвое. Ужесточение критерия до >60 суток приводит к дальнейшему значительному уменьшению их количества – примерно в четыре раза по сравнению с исходным набором данных без фильтрации. Это демонстрирует, что лишь небольшая часть структур отличается долговременной стабильностью в данном регионе. На графиках с ограничением продолжительности жизни особых точек не отображаются линии за период п количества дней от начала счёта и до конца.



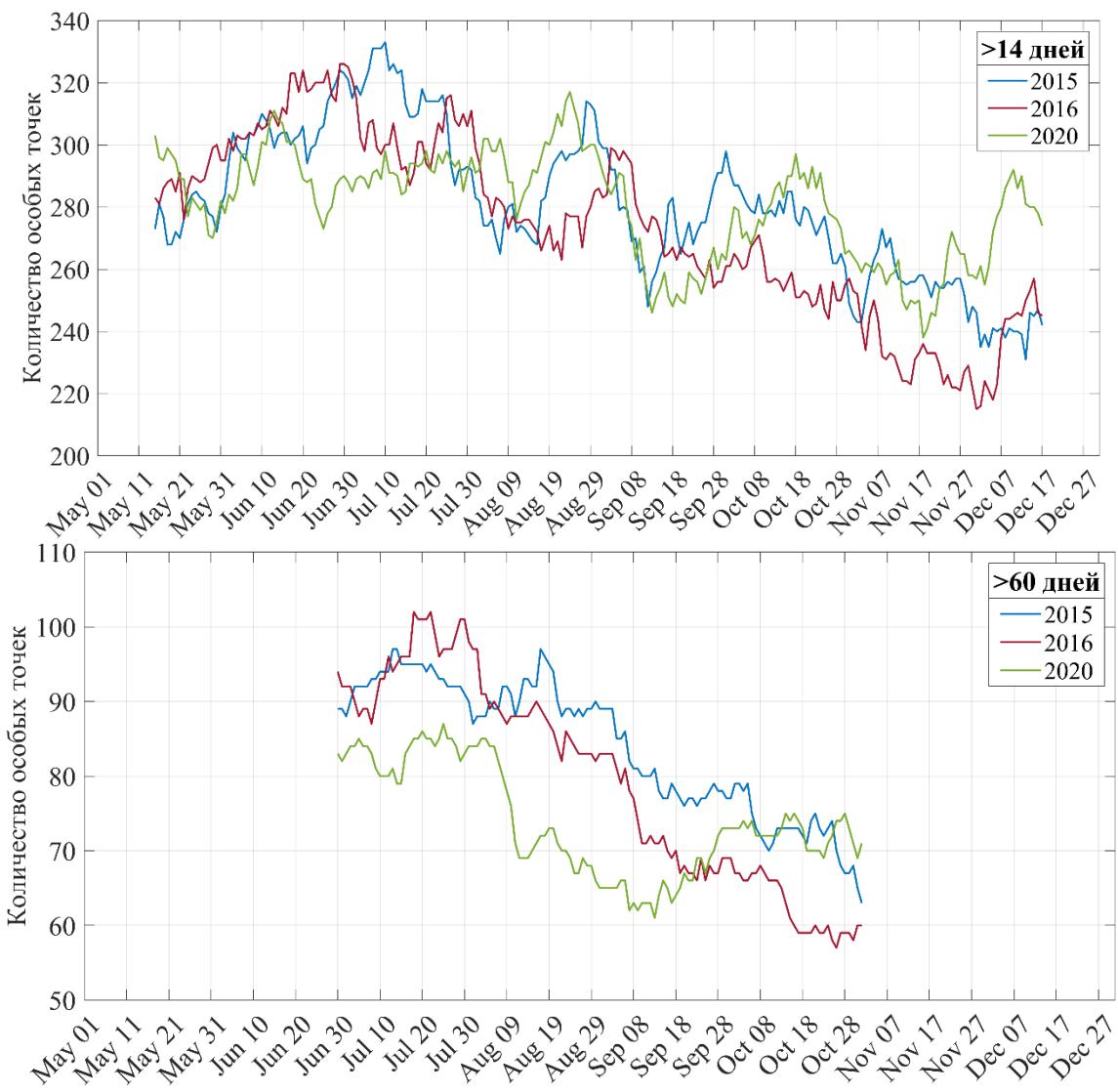


Рис. 4.25. Изменение количества особых точек в Норвежском море [-13 16; 62 73].

Аналогичный анализ был проведён для особых точек только внутри южной части ОЧНМ (рис. 4.26).

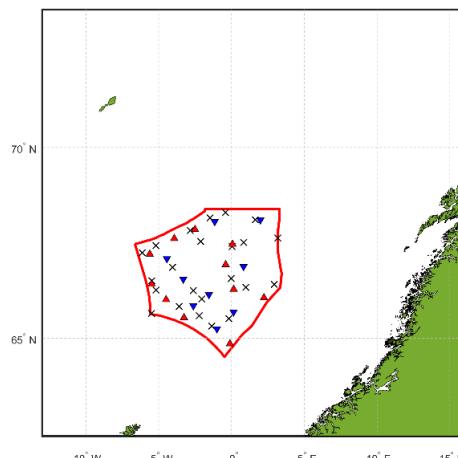


Рис. 4.26. Пример того, как выглядят особые точки в пределах южной части ОЧНМ.

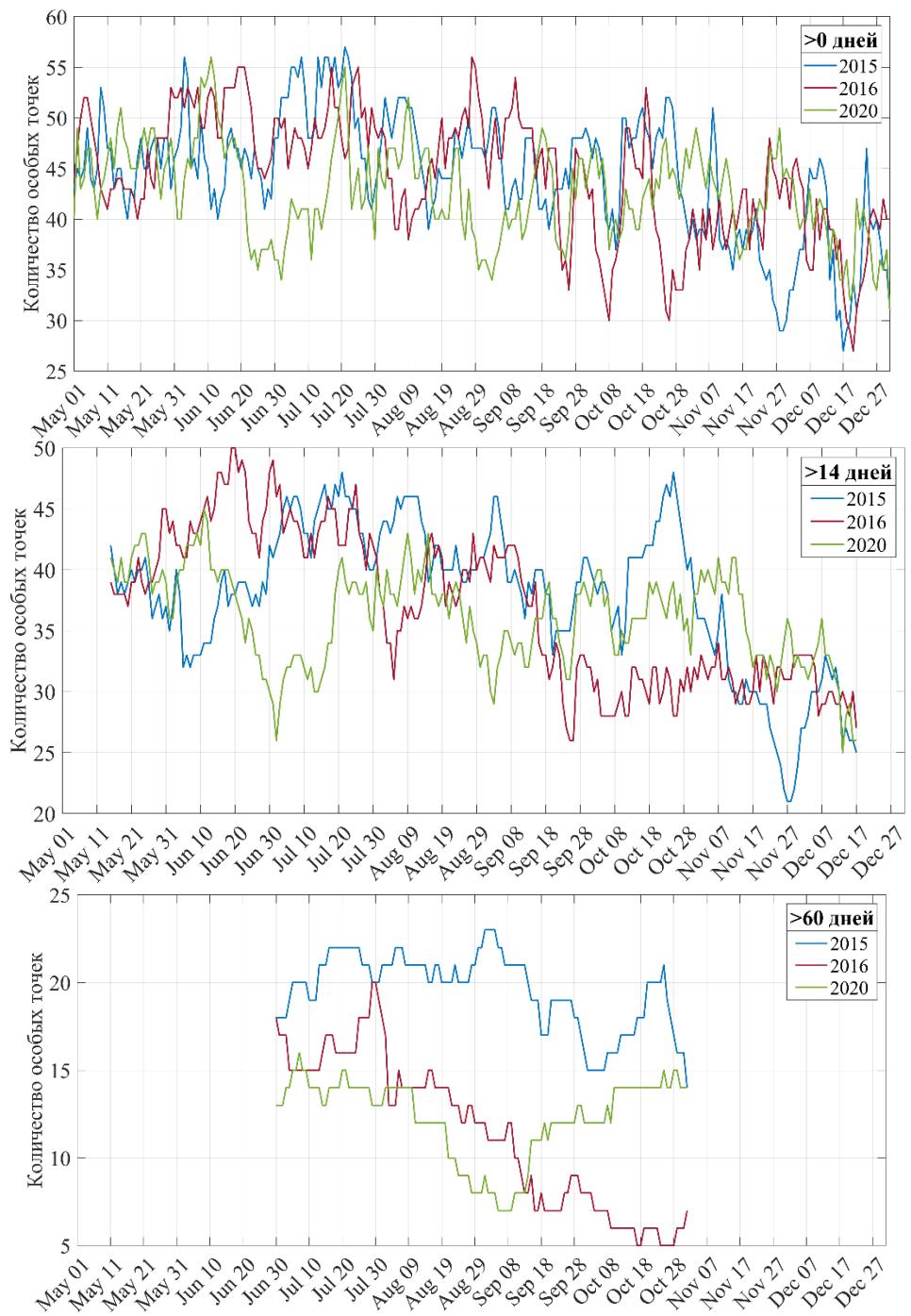


Рис. 4.27. Изменение количества особых точек в южной части ОЧНМ.

Вывод: и во всей рассматриваемой области Норвежского моря, и в южной части ОЧНМ наблюдается уменьшение количества особых точек к осенне-зимнему сезону.

Проанализируем распределение особых точек по времени жизни

Применяемый для выделения особых точек алгоритм НЕРТА позволяет отслеживать эволюцию точек во времени, поэтому для оценки возможностей алгоритма были рассчитаны различные статистики. Для 2015 года были построены графики, отражающие время жизни особых точек. Основное их количество существует до 50 суток.

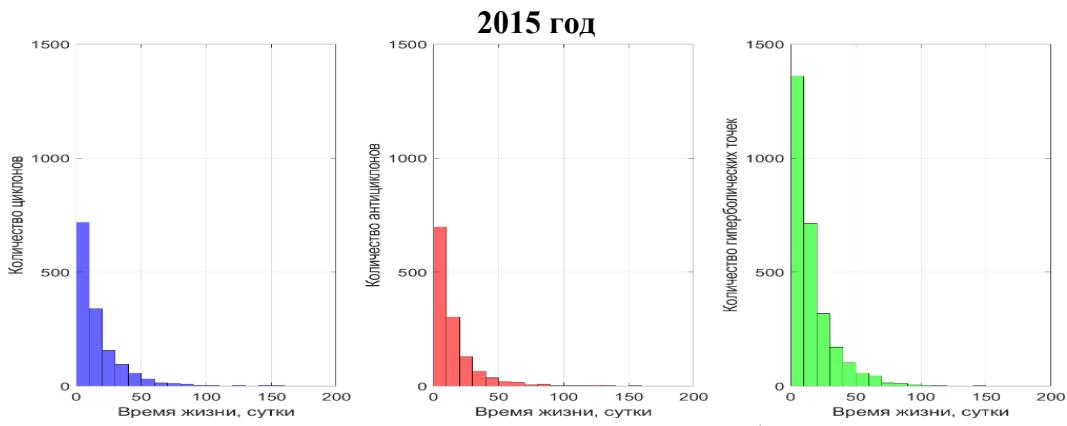


Рис. 4.28. Продолжительность жизни особых точек.

Кроме того, были построены распределения по пройденному особыми точками пути (рис. 4.28) и средней скорости перемещения (рис. 4.29).

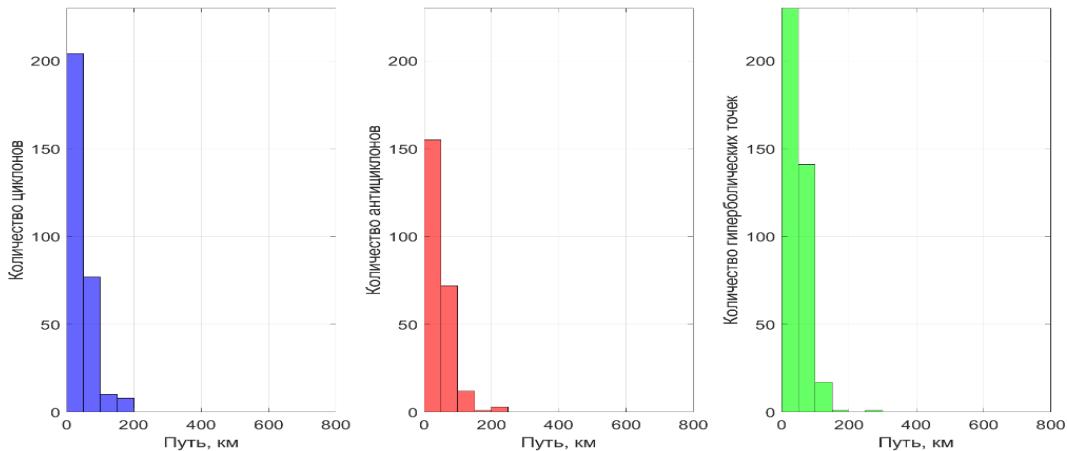


Рис. 4.28. Длина пройденного особыми точками пути.

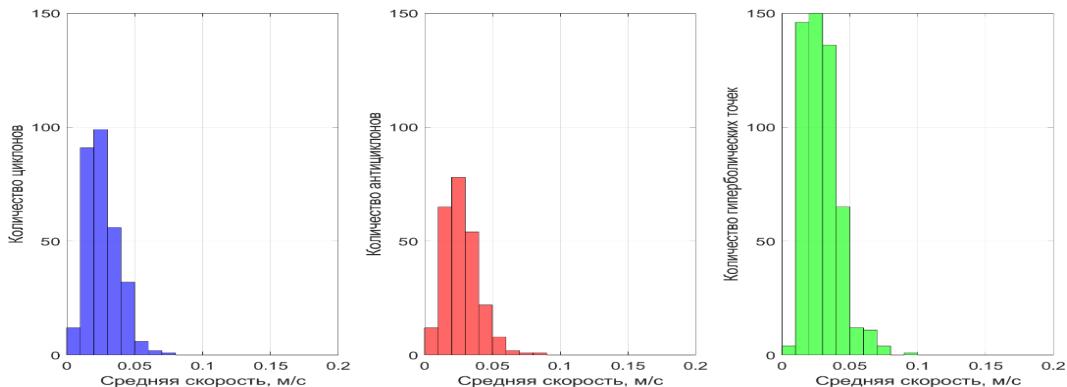


Рис. 4.29. Средняя скорость перемещения особых точек.

Далее мы пытались установить связь между временем жизни и длиной траектории перемещения особой точки. На рисунке 4.30 отражена зависимость между временем жизни особых точек и длиной траектории их перемещения. Как и ожидалось, между этими двумя параметрами наблюдается линейная зависимость. При этом существуют интересные эпизоды, например, точка на графике для циклонов (синие точки), которая лежит выше

значения 500 км по оси у. Это означает, что существовал циклон, который долго существовал и прошёл достаточно большое расстояние.

На всех трёх графиках (синие, красные и зелёные точки — вероятно, разные годы, сезоны или типы полей) прослеживается положительная корреляция: чем дольше живёт особая точка, тем больше длина её траектории. Это логично, поскольку длительное существование вихря или другой особой точки предполагает больше времени для перемещения в потоке. Зависимость между временем жизни и длиной траектории нелинейна, но отчётливо положительная.

Основной вклад в динамику поля дают короткоживущие вихри (до 100 сут), однако вклад в дальний транспорт вещества — долгоживущие структуры. Анализ этой зависимости позволяет разделить динамические режимы: режим локальной турбулентности (короткие жизни, короткие траектории), и режим организованного переноса (долгие жизни, длинные траектории).

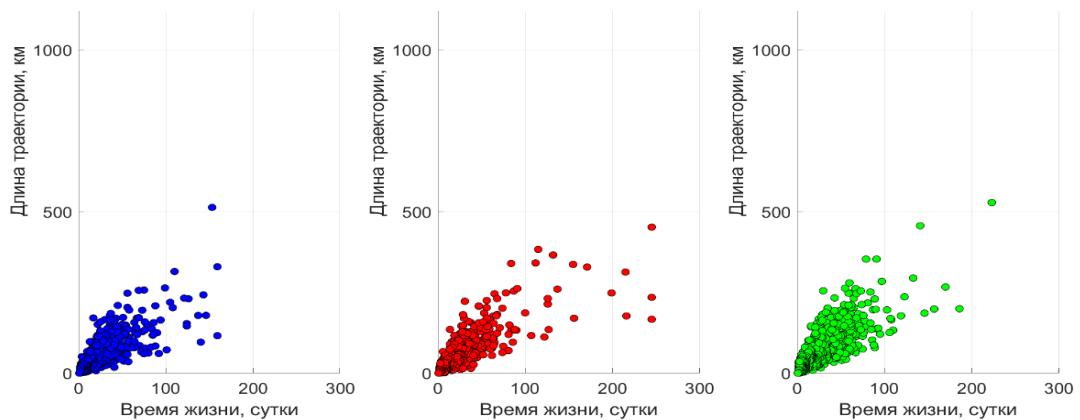


Рис. 4.30. Зависимость между временем жизни особых точек и длиной траектории их перемещения: синий цвет — центры циклонов, красный — центры антициклонов, зеленый — гиперболические точки (точки неустойчивости).

Проанализируем основные особенности распределения особых точек.

1. Большинство точек сосредоточено в области коротких времён жизни (0–100 суток) и малых длин траекторий (до 200–300 км). Это говорит о том, что преобладают временные, локальные структуры с ограниченным перемещением.
2. Есть несколько особых точек с длительностью >150 суток и длиной траектории >500 км. Это устойчивые, долгоживущие структуры — вероятно, долгоживущие вихри, формирующиеся в стабильных динамических условиях (например, в области устойчивых течений или фронтов).

3. Разброс значений увеличивается с ростом времени жизни. Это указывает на то, что длительное существование не всегда означает большое смещение — часть вихрей может быть квазистационарна, “привязана” к определённым регионам.

На левом графике (синий) видно более плотное скопление короткоживущих структур — вероятно, период активной турбулентности с быстрым формированием и разрушением циклонических вихрей. Средний (красный) график показывает больше точек с длительностью >100 суток — возможно, это период стабильной циркуляции, когда антициклоны живут дольше. Правый (зелёный) характеризуется большим числом гиперболических точек с длиной траектории >300 км — что может означать активный горизонтальный перенос

На следующем этапе делалась попытка установить связь между изменением суммарной площади фронтальной зоны выбранной характеристики в заданные сутки и суммарным количеством особых точек в районе промысла в Норвежском море.

На рисунке 4.31 сверху изображено изменение площади фронтальных зон, выделенных по градиентам температуры, плотности и лагранжевой характеристике S, снизу изменение количества особых точек в южной части ОЧНМ. Зависимости между количеством особых точек и площадью фронтальных зон выявлено не было.

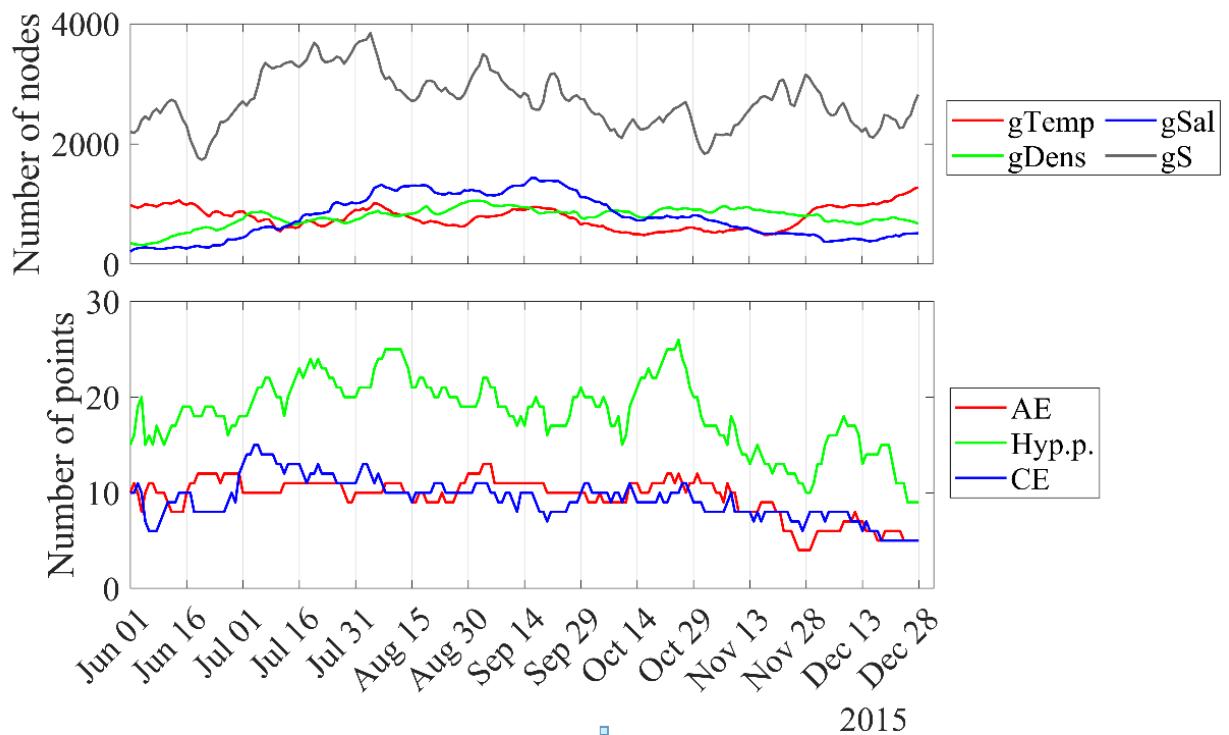


Рис. 4.31. Сверху: изменение площади фронтальных зон, выделенных по градиентам температуры, плотности и лагранжевой характеристике S; снизу изменение количества особых точек в южной части ОЧНМ.

Более детальному анализу было подвергнуто влияние изменения количества особых точек на динамику площади фронтальных зон, идентифицированных по характеристике S (рис. 4.32-4.34). Расчет значений площади выполнялся на основе независимых массивов данных: реанализа GLORYS12V1 и спутниковой альtimетрии AVISO. Для обоих массивов данных статистически значимая зависимость между изменением количества особых точек и изменением площади фронтальных зон отсутствует. При этом разница в площади ФЗ по градиенту S по разным наборам данных обусловлена тем, что график не нормирован, и количество узлов на сетки разное.

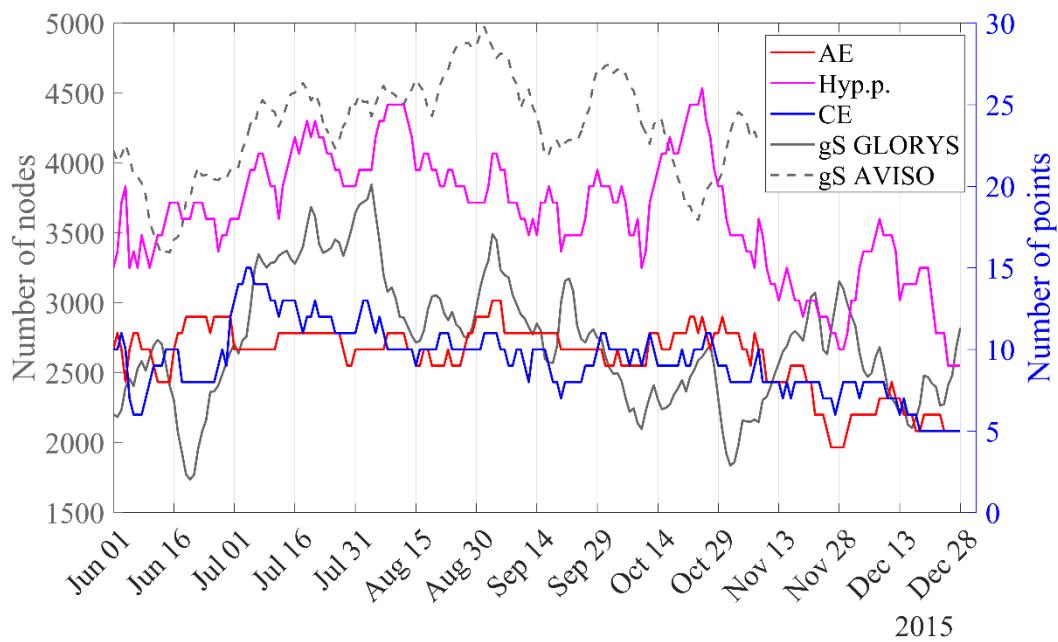


Рис. 4.32. Ось слева: изменение площади ФЗ по градиенту S по данным GLORYS12V1 и AVISO; ось справа: количество особых точек в рассматриваемом районе.

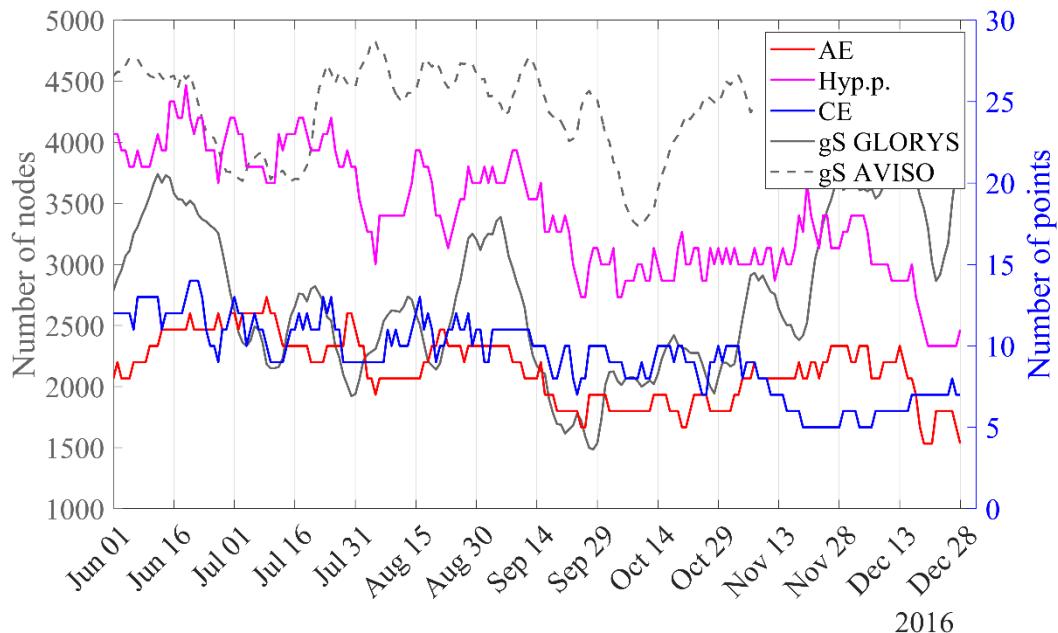


Рис. 4.33. То же, что на рисунке 62, для 2016 года.

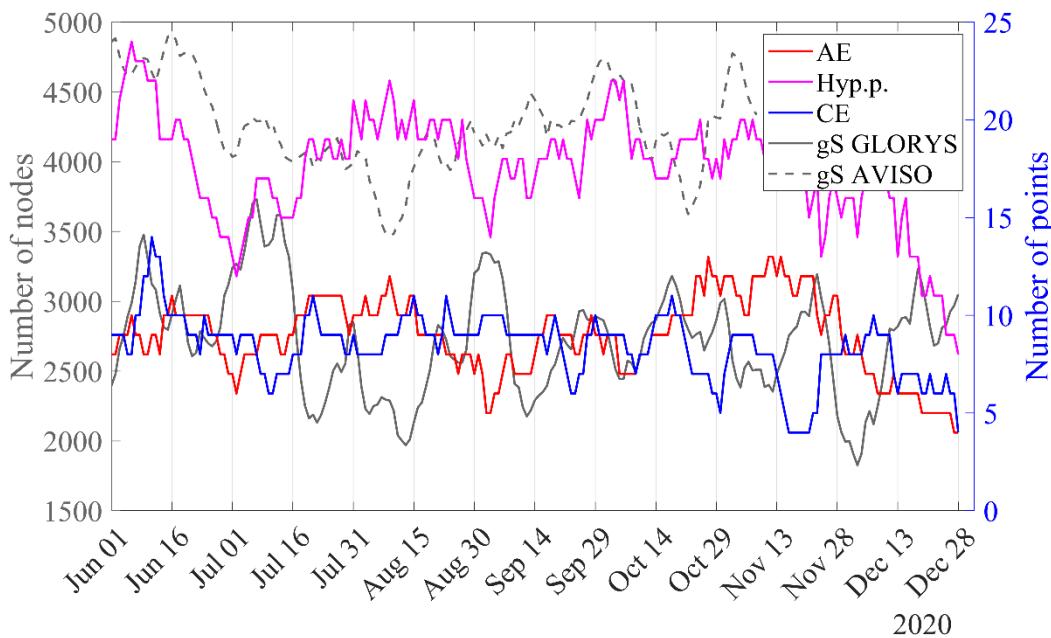


Рис. 4.34. То же, что на рисунке 62, для 2020 года.

Вывод: не наблюдается статистически значимой связи между изменением количества особых точек и изменением площади фронтальных зон.

Для проверки гипотезы о существовании корреляции между пространственным распределением гиперболических точек и положением фронтальных зон был проведен сравнительный статистический анализ. Гиперболические точки были идентифицированы в поле скорости AVISO с применением алгоритма НЕТРА. Для обеспечения репрезентативности выборки использовались фильтры по времени жизни особых точек: первоначально отбирались точки с временем жизни выше 14 суток, а затем применялся более строгий критерий в 30 суток. Анализ выполнялся для южной части ОЧНМ.

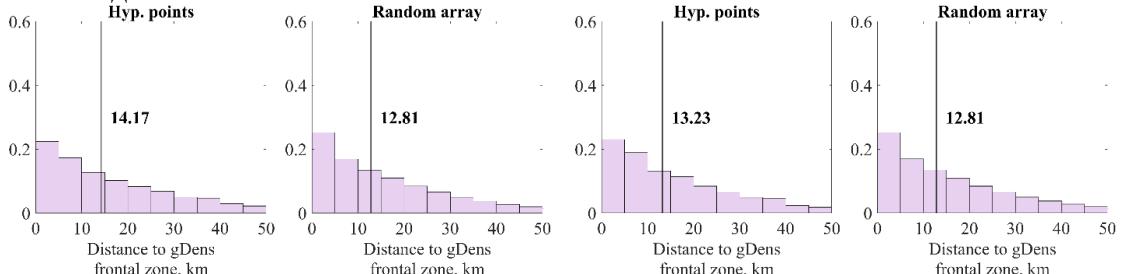
Методология исследования заключалась в построении гистограмм распределения расстояний от идентифицированных гиперболических точек до ближайшей фронтальной зоны (рис. 4.35-4.37) и их последующем сравнении с распределением, полученным для тысячи реализаций случайного размещения точек в пределах исследуемого региона.

Результаты анализа распределения расстояний до фронтальных зон, выделенных по плотности, показали отсутствие статистически значимых различий между реальной и случайной выборками ни для одного из рассматриваемых годов. Более того, медианные значения расстояний для реальных гиперболических точек в большинстве случаев незначительно превышали таковые для случайного распределения. Аналогичным образом, сравнение с фронтальными зонами, выделенными по полям температуры и солёности, не выявило ни выраженного тяготения, ни избегания гиперболических точек по отношению к

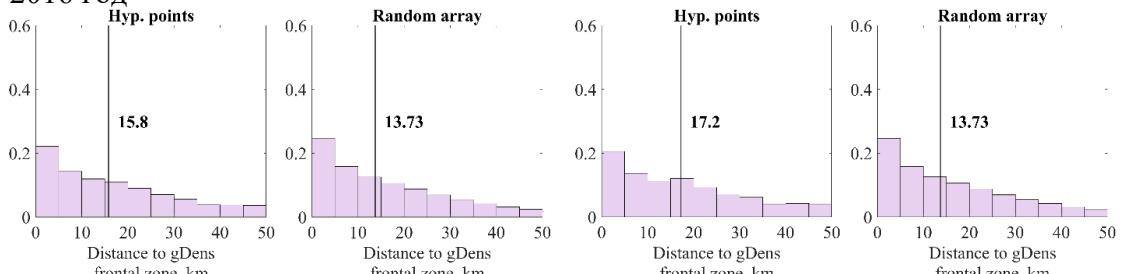
этим зонам, поскольку распределения реальной и синтетической выборок практически совпадали.

Далее: расстояния от гиперболических точек по НЕРТА (AVISO) до Точки > 14 дней

2015 год



2016 год



2020 год

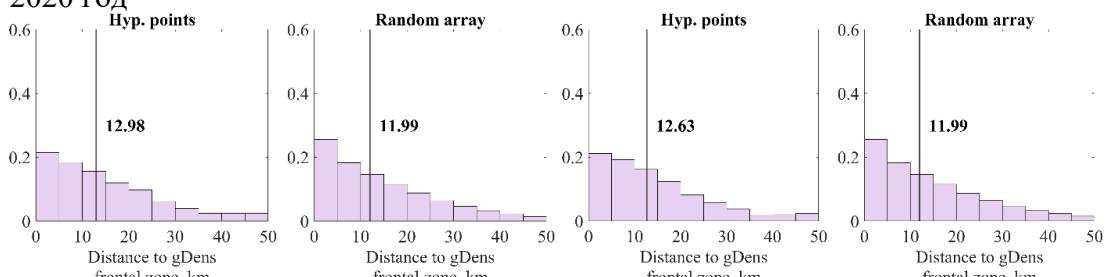
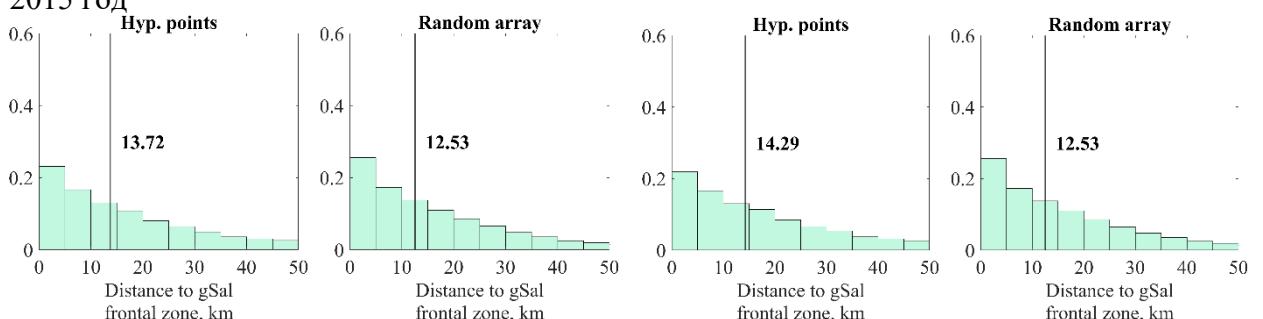


Рис. 4.35. Гистограммы расстояний от гиперболических точек и случайной выборки до ближайшей фронтальной зоны по градиенту плотности.

Точки > 14 дней

2015 год



2016 год

Точки > 30 дней

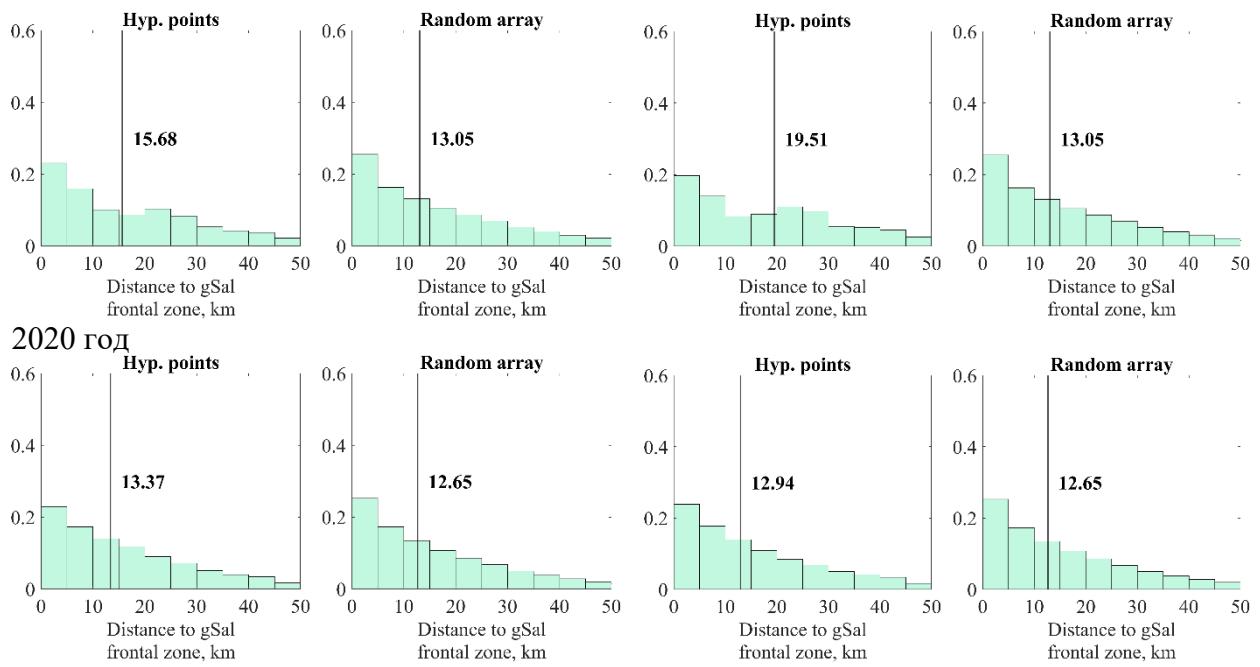


Рис. 4.36. Гистограммы расстояний от гиперболических точек и случайной выборки до ближайшей фронтальной зоны по градиенту солёности.

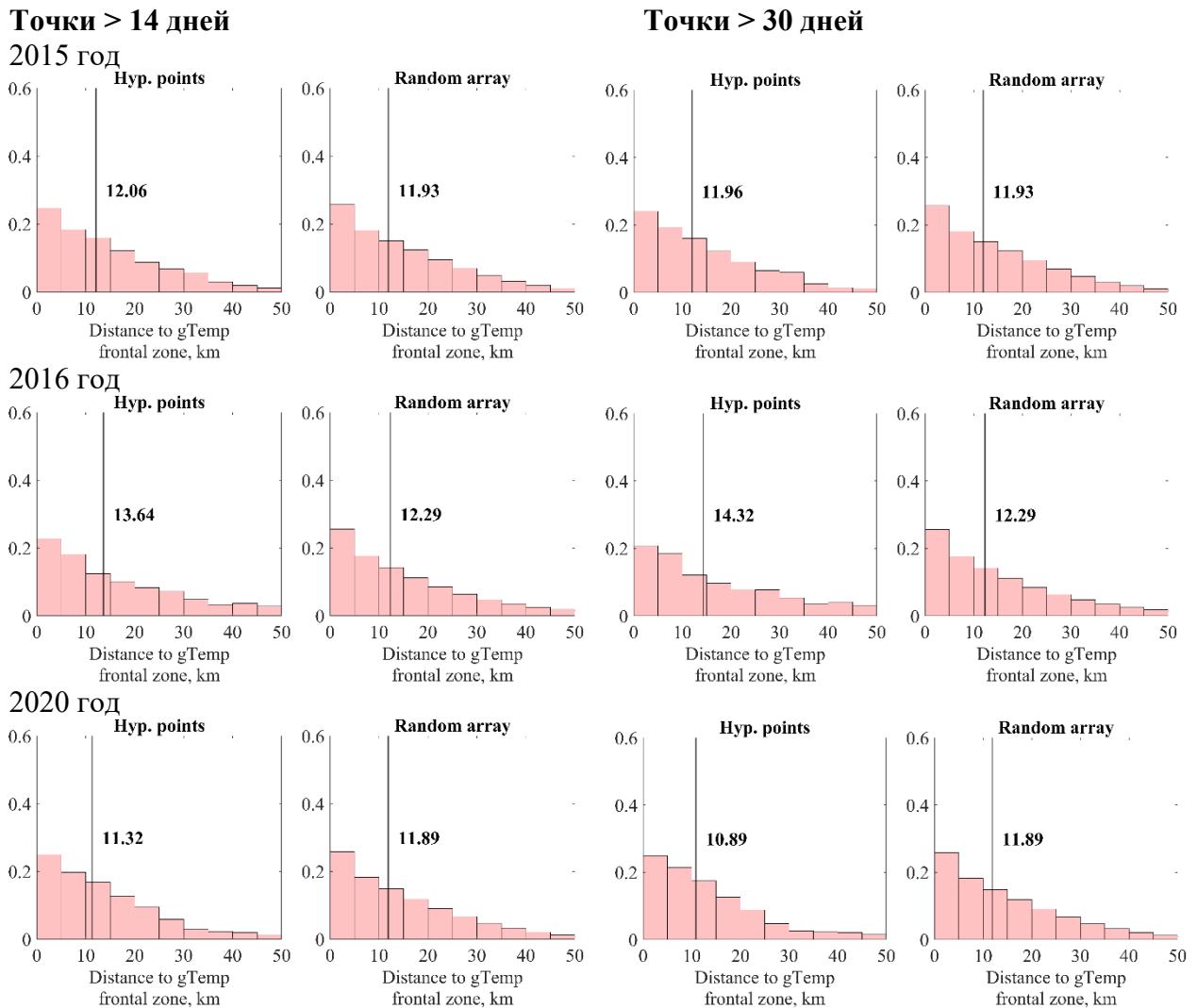


Рис. 4.37. Гистограммы расстояний от гиперболических точек и случайной выборки до ближайшей фронтальной зоны по градиенту температуры.

Вывод: Проведенный анализ не позволил выявить статистически значимой пространственной связи между положением долгоживущих гиперболических точек и локализацией фронтальных зон, выделенных по плотности, температуре или солёности.

5. ОТРАЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГРАНТУ СПБГУ В СРЕДСТВАХ МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Результаты проводимого в рамках гранта исследования (НИР «Анализ океанографических условий промысла рыб в Норвежском море на основе лагранжева моделирования» – ID Pure СПбГУ 129659573) обладают значительной практической ценностью и представляют интерес не только для узкого круга учёных-оceanологов, но и для специалистов, занимающихся конкретно прикладными задачами организации рыбного промысла в различных районах Мирового океана. Проведённая работа наглядно демонстрирует возможности современной науки в решении практических задач, значимых для экономики и экологии.

7 августа 2025 года на официальном сайте СПбГУ был опубликован пресс-релиз, посвящённый статье, опубликованной в авторитетном международном журнале *Fisheries Oceanography* (<https://spbu.ru/news-events/novosti/okeanologi-spbgu-razrabotali-metodiku-opredeleniya-mest-skopleniya>). Разработанная в контексте реализации проекта методика, основанная на анализе спутниковых данных, позволяет с высокой точностью определять районы, благоприятные для скопления промысловой рыбы, что сулит значительную экономию для рыбопромышленного комплекса и способствует устойчивому природопользованию.

Всего за несколько дней оригинальный материал процитировали более двадцати новостных и отраслевых ресурсов. Публикации появились как в крупных федеральных СМИ, так и в специализированных изданиях, посвящённых рыболовству, экологии и высоким технологиям, что подчёркивает междисциплинарную значимость открытия.

В частности, в журнале «Коммерсант» опубликовали статью об этих исследованиях с громким названием «Ловля по науке. Как океанологи СПбГУ предсказывают места скопления атлантической скумбрии» (<https://www.kommersant.ru/doc/7940788>). Издание подробно описывает суть революционного подхода ученых, который позволяет превратить промысел из «лотереи» в научно обоснованный процесс. Как отмечается в статье, российские исследователи впервые для Норвежского моря объединили два подхода к

изучению океана: эйлеров (измерение характеристик воды в фиксированных точках) и лагранжев (непрерывное отслеживание движения водных масс и их происхождения). Особое внимание уделяется фронтальным зонам — областям столкновения водных масс с различными термодинамическими характеристиками, которые создают идеальные условия для формирования рыбных скоплений. Эти зоны могут достигать 100 км в ширину и до 1 км в глубину, варьируясь от кратковременных явлений до устойчивых структур.

В рейтинговом агентстве AK&M появилась статья «Океанологи СПбГУ разработали методику определения мест скопления атлантической скумбрии» (https://akm.ru/press/okeanologi_spbgu_razrabotali_metodiku_opredeleniya_mest_skopleniya_atlanticheskoy_skumbrii/), которая акцентирует внимание на практической значимости разработки. Как подчеркивается в публикации, метод основан на лагранжевом моделировании гидрологических условий, впервые примененном для Норвежского моря — одного из ключевых районов добычи скумбрии. Статья детально объясняет преимущества нового подхода: вместо использования фиксированных значений градиентов ученые применяют статистически значимое выделение границ фронтов через расчет функции распределения вероятностей.

Об исследовании также написал крупный новостной ресурс Fishnews в статье под заголовком «Ученые предложили искать косяки рыб по параметрам воды» (<https://fishnews.ru/news/53267>). Издание особо подчеркивает универсальность созданного метода — он поможет найти индикаторы скоплений не только скумбрии, но и других промысловых видов рыб в различных водоемах.

К работе также проявили интерес отраслевые порталы. MoneyTimes опубликовал материал, где подчеркивается стратегическое значение атлантической скумбрии как богатого витаминами ресурса, который «кормит тысячи людей» (<https://www.moneytimes.ru/news/novyy-metod-poiska-skumbrii/84603/>). Издание отмечает, что новый метод позволяет определить местонахождение рыбы с достаточно высокой точностью, превращая ранее непредсказуемый процесс ловли в научно обоснованную деятельность. Особенно важно, что технология поможет не только повысить эффективность промысла, но и предотвратить перелов, способствуя сохранению популяции.

Агротайм в материале «В Петербурге научились находить скопления промысловых рыб под водой» делает акцент на научно-техническом аспекте разработки (<https://agrotime.info/v-peterburge-nauchilis-nahodit-skoplenija-promyslovyh-ryb-pod-vodoj/>).

В статье подробно объясняется гибридный подход исследователей, сочетающий эйлеровскую модель анализа с лагранжевой. Издание отмечает, что такой комбинированный анализ впервые применен для Норвежского региона.

InnovaNews.ru опубликовал статью с ярким заголовком «Рыба ищет, где глубже, а ученые — где градиент круче», в которой простым языком объясняется суть метода (<https://innovanews.ru/info/news/nutrition/tyba-ishhet-glubzhe-a-uchenye-gde-gradient-kruche/>). Как отмечается в публикации, исследователи выяснили, что скумбрия чаще всего скапливается в 10-15 км от фронтальных зон, причем предпочитает холодную сторону границ между водными массами. Статья подчеркивает практическую пользу метода: он поможет рыболовным компаниям снизить затраты на поиск рыбы, уменьшить нагрузку на экосистему и повысить общую эффективность промысла.

Научная Россия в статье «Океанологи предложили новый способ определения скоплений атлантической скумбрии» акцентирует внимание на междисциплинарном характере исследования. Проект объединил усилия специалистов СПбГУ, Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН и компании «МОРИНФО». Издание подробно освещает методологические особенности работы, отмечая, что исследование опирается на данные спутниковых миссий, промысловых планшетов и судовые измерения (<https://scientificrussia.ru/articles/okeanologи-predlozili-novyj-sposob-opredelenia-skoplenij-atlanticeskoj-skumbrii>).

Отраслевые ресурсы «Рыбоводство» и «Рыботорговая система» также отметили значимость разработки для всей рыбопромышленной отрасли. Агрегатор СМИ «Селдон новости» подчеркнул широкий общественный интерес к данному исследованию.

Все источники единодушно отмечают революционный характер методики, которая превращает традиционный промысел из интуитивного процесса в точную науку, основанную на анализе океанографических параметров и математическом моделировании. Особенно важно, что разработанный универсальный подход может быть адаптирован для поиска различных видов промысловых рыб в разных регионах Мирового океана, что делает его потенциально полезным инструментом для повышения эффективности мирового рыболовства и устойчивого управления морскими ресурсами.

Во всех источниках прослеживается единая позиция, что результаты проведённого исследования имеют не только высокую научную, но и значительную прикладную ценность, способствуя решению практических задач рыбопромыслового комплекса. Широкое освещение данной работы в ведущих СМИ и отраслевых ресурсах, включая

публикации на официальном сайте СПбГУ, в газете «Коммерсантъ», рейтинговом агентстве АК&М и других СМИ наглядно демонстрирует важность и востребованность популяризации научных достижений. Это подчёркивает способность современной науки предлагать эффективные решения для экономики и экологии, а также усиливает общественный интерес к междисциплинарным исследованиям, направленным на устойчивое природопользование и цифровую трансформацию отраслей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа направлена на развитие комплексного подхода к изучению океанологических условий формирования промысловых скоплений в Норвежском море на основе сочетания эйлеровых и лагранжевых методов анализа. Впервые в отечественной практике была реализована методология, объединяющая спутниковые данные, результаты океанографических реанализов и численное моделирование лагранжевых характеристик течений для интерпретации поведения гидробионтов в районах активного промысла. Такой подход позволил перейти от статического описания гидрологической обстановки к динамической оценке пространственно-временных закономерностей циркуляции и их влияния на распределение промысловых объектов.

В ходе исследования проведён комплексный анализ полей скорости течений, температуры, солёности и плотности воды по данным спутниковых наблюдений (AVISO, MODIS) и реанализа GLORYS12V1. На основе рассчитанных лагранжевых характеристик (инварианта S , дивергенции и долголетних гиперболических точек) построены карты динамических фронтов и областей повышенной гидродинамической активности. Полученные данные позволили выделить зоны, в которых мезо- и субмезомасштабные процессы создают устойчивые условия для концентрации биомассы и формирования промысловых скоплений.

Анализ взаиморасположения фронтальных зон и мест вылова атлантической скумбрии показал, что распределение промысловых участков имеет выраженное тяготение к динамическим и плотностным фронтам. Особенно тесная связь наблюдается с фронтальными зонами, выделенными по лагранжевому индикатору S , отражающему квазистационарные границы между различными водными массами. Эти зоны представляют собой своеобразные транспортные барьеры, в которых происходит накопление питательных веществ, планктона и, как следствие, концентрация промысловых рыб. В большинстве случаев выявлена тенденция приуроченности выловов к «быстрой» стороне фронта, что связано с подъемом глубинных вод и повышением продуктивности в этих областях.

Важным результатом проекта является сопоставление гидродинамических условий с фенологией весеннего «цветения» фитопланктона. Использование спутниковых данных за 1998–2022 годы позволило выявить устойчивые межгодовые тенденции: в Норвежском море интенсивность весеннего цветения постепенно увеличивается, что, вероятно, связано с ростом температуры поверхностных вод и усилением стратификации. В то же время сроки

начала и продолжительности цветения сохраняются относительно стабильными, что свидетельствует об устойчивости производственного цикла в данном регионе. В районах, где наблюдалась высокая частота весеннего цветения и выраженная фронтальная активность, отмечается также повышенная концентрация промысловых ресурсов, что подтверждает тесную связь биологической продуктивности с динамикой течений.

Особое внимание уделено изучению влияния мезомасштабных вихревых структур. На примере Лофотенского вихря показано, что его внутренняя циркуляция формирует специфическую термохалинную структуру, способствующую удержанию водных масс и биогенных элементов. Лагранжев анализ траекторий частиц подтвердил наличие зон длительного захвата воды в периферийной части вихря, что делает этот район потенциально важным элементом экосистемы Норвежского моря. Аналогичные закономерности выявлены и для других устойчивых вихревых образований, что свидетельствует о ключевой роли вихревой динамики в процессах переноса и аккумуляции биологического вещества.

В результате сопоставления данных наблюдений и численных экспериментов была разработана и апробирована методика объективного выделения фронтальных зон по градиентам различных океанологических характеристик. Предложенный алгоритм основан на статистическом анализе функции распределения значений градиента, что позволило исключить субъективность выбора порогов и обеспечило воспроизводимость результатов. Данная методика может применяться не только для анализа условий промысла, но и для оперативного мониторинга гидродинамической обстановки в морских акваториях.

Результаты работы также показали, что влияние вихревой активности и фронтальных процессов на формирование промысловых скоплений имеет выраженный межгодовой характер. Периоды усиления антициклонической циркуляции в южной части Норвежского моря сопровождаются концентрацией скумбрии на периферии вихревых систем, в то время как ослабление вихревой активности приводит к более рассеянному распределению промысловых объектов. Таким образом, наблюдаемая изменчивость промысловой обстановки во многом определяется динамикой крупномасштабных и мезомасштабных структур, которые могут рассматриваться как индикаторы потенциальной продуктивности района.

Методический аппарат, разработанный в рамках проекта, имеет универсальный характер и может быть адаптирован для других регионов Мирового океана, включая северо-западную часть Тихого океана и южные Курильские районы. Использование лагранжевых моделей в сочетании с данными спутниковой альtimетрии открывает новые возможности

для прогноза перемещения не только промысловых объектов, но и других пассивных примесей, включая радиоактивные вещества, биогенные элементы и микропластик. Это придаёт исследованию междисциплинарную направленность и обеспечивает его прикладное значение в контексте экологической и продовольственной безопасности страны.

В практическом плане результаты проекта могут быть использованы при планировании морских экспедиций, выборе участков для постановки гидрологических станций, а также при разработке систем поддержки принятия решений в области управления промыслом. Сочетание данных лагранжевого анализа и спутникового мониторинга позволяет оперативно оценивать вероятность концентрации биоресурсов, прогнозировать миграционные маршруты рыб и оптимизировать распределение промысловых усилий. Кроме того, полученные результаты представляют интерес для задач калибровки и верификации океанографических моделей, применяемых в оперативной океанологии.

Таким образом, проведённое исследование показало, что использование лагранжевых методов в сочетании с традиционными океанографическими подходами позволяет существенно повысить точность описания динамических процессов и выявить ключевые механизмы, определяющие пространственно-временную изменчивость промысловых объектов. Разработанные алгоритмы и полученные результаты создают основу для построения прогнозных моделей, которые могут быть использованы как в научных целях, так и для прикладных задач управления морскими ресурсами.

Проект СПбГУ «Анализ океанографических условий промысла рыб в Норвежском море на основе лагранжева моделирования» (ID PURE 129659573) выполнялся в период май-ноябрь 2025 г. коллективом исполнителей, состоящим из 9 человек, из которых 5 исполнителей проекта – это молодые ученые в возрасте до 39 лет. В ходе выполнения проекта были опубликованы 13 статей в рецензируемых изданиях, из которых четыре принадлежат первому и второму квентилям, все статьи имеют указание на данный грант СПбГУ; по теме проекта сделано более 10 докладов на российских и международных конференциях. Более 10 статей поданы в печать, из которых три уже приняты к печати и будут опубликованы в следующем году. Отдельные результаты освещены в данном отчете. Коллективом исполнителей создан обширный научный задел, что создает благоприятные условия для продолжения и завершения последнего этапа работы по проекту в 2026 г.

В ходе выполнения проекта исполнителями были защищены две диссертации:

- 1) докторская диссертация – Башмачников И.Л., тема: «Мезомасштабные подповерхностные вихри и их проявления на поверхности океана», дата защиты 05.02.2025, ссылка: <https://disser.spbu.ru/zashchita-uchenoj-steperi-spbgu/1310-bashmachnikov-igor-lvovich.html>
- 2) кандидатская диссертация – Травкин В.С., тема: «Особенности проявления мезомасштабной вихревой динамики в различных частях Мирового океана», дата защиты 15.10. 2025, ссылка: <https://disser.spbu.ru/zashchita-uchenoj-steperi-spbgu/1428-travkin-vladimir.html>

Отчёт состоит из пяти глав с разбивкой на параграфы и включает 37 ссылок на научные публикации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Antoine D., André J., Morel A. Oceanic primary production: Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll // *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. V. 10. No. 1. P. 57–69.
2. Brody S.R., Lozier M.S., Dunne J.P. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. V. 118. No. 5. P. 2345–2357.
3. Carmack E., Wassmann P. Food webs and physical–biological coupling on pan-Arctic shelves // *Progress in Oceanography*. 2006. V. 71. P. 446–477.
4. Cummings J.A., Smedstad O.M. Variational Data Assimilation for the Global Ocean // In: Park S., Xu L. (Eds.) *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13
5. Edwards M., Richardson A.J. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch // *Nature*. 2004. V. 430. P. 881–884.
6. Engelsen O., Hegseth E.N., Hop H. et al. Spatial variability of chlorophyll-a in the Marginal Ice Zone of the Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 35. No. 1. P. 79–97. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00077-5)
7. Ferreira A., Mendes C.R.B., Costa R.R. et al. Climate change is associated with higher phytoplankton biomass and longer blooms in the West Antarctic Peninsula // *Nature Communications*. 2024. V. 15. No. 1. P. 6536. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50381-2>
8. Friedland K.D., Mouw C.B., Asch R.G. et al. Phenology and time series trends of the dominant seasonal phytoplankton bloom across global scales // *Global Ecology and Biogeography*. 2018. V. 27. No. 5. P. 551–569. <https://doi.org/10.1111/geb.12717>
9. Good S., Fiedler E., Mao C. et al. The current configuration of the OSTIA system for operational production of foundation sea surface temperature and ice concentration analyses // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 4. P. 720. <https://doi.org/10.3390/rs12040720>
10. Groetsch P.M.M., Simis S.G.H., Eleveld M.A. et al. Spring blooms in the Baltic Sea have weakened but lengthened from 2000 to 2014 // *Biogeosciences*. 2016. V. 13. No. 17. P. 4959–4973. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4959-2016>
11. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present // *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. 2019. <https://doi.org/10.24381/CDS.F17050D7>
12. Hunt G.L. Jr., Stabeno P., Walters G. et al. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem // *Deep-Sea Research Part II*. 2002. V. 49. No. 26. P. 5821–5853.
13. Jean-Michel L. et al. The Copernicus Global 1/12° Oceanic and Sea Ice GLORYS12 Reanalysis // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. 698876. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.698876>

14. Kahru M., Brotas V., Manzano-Sarabia M. et al. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. No. 4. P. 1733–1739.
15. Koeller P., Fuentes-Yaco C., Platt T. et al. Basin-scale coherence in phenology of shrimps and phytoplankton in the North Atlantic Ocean // *Science*. 2009. V. 324. P. 791–793.
16. Kogeler J., Rey F. Ocean colour and spatial and seasonal distribution of phytoplankton in the Barents Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 1999. V. 20. No. 7. P. 1303–1318.
17. Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S. et al. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 49–78.
18. Lebedeva M.A., Budyansky M.V., Uleytsky M.Yu., Fayman P.A., Didov A.A., Belonenko T.V., Klochkov D.N. Evaluating the impact of oceanographic field variability on Atlantic mackerel distribution within Russian fishing grounds in the northern Norwegian Sea // *Fisheries Oceanography*. 2025. <https://doi.org/10.1111/fog.12744>
19. Malysheva A.S., Lobanova P.V. Interannual variability of marine phytoplankton spring bloom phenology in the North European Basin // *Oceanology*. 2024. V. 64. No. 1. P. S107–S117. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700929>
20. Maritorena S., Siegel D.A., Peterson A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications // *Applied Optics*. 2002. V. 41. No. 15. P. 2705–2714.
21. Merchant C.J., Embury O., Bulgin C.E. et al. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications // *Scientific Data*. 2019. V. 6. No. 1. P. 223.
22. Miyazawa Y., Yaremchuk M., Varlamov S.M., Miyama T., Aoki K. Applying the adjoint-free 4DVar assimilation to modeling the Kuroshio south of Japan // *Ocean Dynamics*. 2020. V. 70. P. 1129–1149. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01372-6>
23. Napp J.M., Kendall A.W., Schumacher J.D. A synthesis of biological and physical processes affecting feeding environment of larval walleye pollock // *Fisheries Oceanography*. 2000. V. 9. P. 147–162.
24. Oziel L., Baudena A., Ardyna M. et al. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean // *Nature Communications*. 2020. V. 11. 1705.
25. Qu B., Gabric A.J., Lu Z. et al. Unusual phytoplankton bloom phenology in the northern Greenland Sea during 2010 // *Journal of Marine Systems*. 2016. V. 164. P. 144–150.
26. Racault M.-F., Le Quéré C., Buitenhuis E. et al. Phytoplankton phenology in the global ocean // *Ecological Indicators*. 2012. V. 14. P. 152–163.
27. Sasaoka K., Chiba S., Saino T. Climatic forcing and phytoplankton phenology over the subarctic North Pacific (1998–2006) // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. No. 15.
28. Siegel D.A., Doney S.C., Yoder J.A. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis // *Science*. 2002. V. 296. P. 730–733.

29. Silva E., Counillon F., Brajard J. et al. Twenty-one years of phytoplankton bloom phenology in the Barents, Norwegian, and North Seas // *Frontiers in Marine Science*. 2021. V. 8. 746327.
30. Smetacek V., Passow U. Spring bloom initiation and Sverdrup critical-depth model // *Limnology and Oceanography*. 1990. V. 35. P. 228–234.
31. Sverdrup H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *ICES Journal of Marine Science*. 1953. V. 18. No. 3. P. 287–295.
32. Udalov A.A., Uleysky M.Yu. Hyperbolic and elliptic points tracking algorithm (HEPTA) in two-dimensional non-stationary velocity fields defined on a discrete grid // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2026. V. 152. 109208. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2025.109208>
33. Ueyama R., Monger B.C. Wind-induced modulation of seasonal phytoplankton blooms in the North Atlantic // *Limnology and Oceanography*. 2005. V. 50. No. 6. P. 1820–1829.
34. Vikebø F.B., Strand K.O., Sundby S. Wind intensity is key to phytoplankton spring bloom under climate change // *Frontiers in Marine Science*. 2019. V. 6.
35. Wang H., Ren K., Lina M., Yu C., Chen W., Zhang W. Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. 1050028. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1050028>
36. Wassmann P., Ratkova T., Andreassen I. et al. Spring bloom development in the Marginal Ice Zone and the central Barents Sea // *Marine Ecology*. 1999. V. 20. P. 321–346.
37. Звалинский В.И., Лобанова П.В., Тищенко П.Я. и др. Оценки первичной продукции в северной части Японского моря в различные сезоны по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 5. С. 726–742.