

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Мартина Васкез Джимми Хуан

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРУАНСКОГО
АПВЕЛЛИНГА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОПУЛЯЦИЮ АНЧОУСОВ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание
учёной степени кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук, профессор,
академик РАН,
Малинин Валерий Николаевич

Санкт-Петербург

2025 г.

Работа выполнялась в Российском государственном гидрометеорологическом университете.

Научный руководитель: Малинин Валерий Николаевич, доктор географических наук, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами ФГБНУ ВО «РГГМУ»

Официальные оппоненты: Кровнин Андрей Сергеевич, доктор географических наук, начальник Отдела динамики климата и водных экосистем ГНЦ РФ ФГБУН «ВНИРО»

Костяной Андрей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории экспериментальной физики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова ФГБУН РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток

Защита диссертации состоится **29 января 2026** года в **17:00** на заседании диссертационного совета РГГМУ 24.2.365.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Российского государственного гидрометеорологического университета <https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО составителя, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д.79, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.365.03 Ершовой А. А., а также в формате pdf на e-mail: ds@rshu.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
24.2.365.03, к.г.н

А.А. Ершова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Перуанский апвеллинг (ПА), обусловленный взаимодействием океанических и атмосферных факторов, является одним из четырех наиболее высокопродуктивных районов апвеллинга в Мировом океане (МО) и крупнейшим по уловам рыбы [Tarazona & Arntz, 2001; Bakun & Weeks, 2008; Gutiérrez et al., 2016;]. Он образован холодным Перуанским течением, которое берет начало из северной ветви Антарктического циркумполярного течения и течет вдоль побережья Южной Америки на север к экватору. В результате ветра, дующего в сторону экватора, сила Кориолиса отклоняет течение на запад. Это приводит к возникновению апвеллинга, благодаря которому происходит подъем в эвфотический слой промежуточных вод богатых минеральными веществами. В результате в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой базой массовым видам пелагических рыб [Духова и Сапожников, 2014; Сапожников и др. 2007; и др.].

В водах Перуанского апвеллинга, занимающего площадь около 0,02 % площади Мирового океана, добывается около 20 % мирового улова рыбы [Bakun et al. 2015; Espinoza-Morriberon et al. 2017; Castillo et al. 2019; FAO, 2022]. Для населения Перу рыболовство имеет большое экономическое значение. Поэтому изучение факторов, влияющих на формирование биопродуктивности вод, имеет не только научное, но и огромное практическое значение. Так, рыбный промысел относится к числу важнейших экспортных отраслей Перу, на долю которого приходится до 25 % экспортных доходов страны.

Самым важным видом, поддерживающим пищевую цепь в ПА, является анчоус *Engraulis ringens* [Espinoza & Bertrand, 2008], который, помимо своей пищевой ценности, играет важную роль в экономике Перу и в мировом производстве рыбной муки [Bakun & Broad, 2002]. В некоторые годы вылов анчоуса достигает 10 % мирового улова [Massing et al., 2022]. Это не только самый важный промысел в Перу, но также самая интенсивно эксплуатируемая рыба в мировой истории [Di Dario et al., 2024]. Однако причины «перуанской загадки» огромного производства рыбы в ПА в настоящее время еще не до конца выявлены [Massing et al., 2022]. У берегов Перу за период 2014—2023 гг. было выловлено более 42 миллионов тонн различных видов рыб, из которых почти 90 % составили перуанские анчоусы [Produce, 2024].

К важнейшим абиотическим факторам формирования рыбопродуктивности относятся температура поверхностного слоя океана (ТПО) и интенсивность апвеллинга. Влияние температуры воды на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно [Малинин и Гордеева, 2002, 2009], оно может проявляться в явной и опосредованной формах, может ускорять (замедлять) рост численности отдельных видов морских организмов и даже приводить к их массовой гибели при резких изменениях температуры. Несмотря на цикл работ по влиянию температуры воды на характеристики биологической продуктивности ПА [Bakun et al., 2010; Gutierrez et al., 2011; Espinoza- Morriberón et al., 2017; Ganguly & Raman, 2021 и др.] до настоящего времени пространственно-временная изменчивость этого важнейшего абиотического фактора изучена слабо и нуждается в более тщательном анализе, в частности с использованием методов многомерного статистического анализа (МСА), которые ранее не применялись.

Другой важнейший абиотический фактор – интенсивность апвеллинга, способствующий поддержанию на высоком уровне развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой

базой массовым видам пелагических рыб. Однако оценить интенсивность апвеллинга очень непросто. Это связано с тем, что вертикальные скорости в океане малы и определяются с большими погрешностями, сравнимыми с их средними оценками. Поэтому интенсивность апвеллинга часто определяется косвенными методами. С этой целью достаточно широкое распространение получили разнообразные индексы апвеллинга [Wooster et al., 1976; Nykjær & Van Camp, 1994; Demarcq & Faure, 2000 и др.]. Из них наиболее обоснованным является индекс апвеллинга, предложенный Бакумом в 1973 г., основанный на расчете полного потока водной массы в виде экмановского переноса. Однако вычисленный таким образом полный поток характеризует лишь дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикальное поступление воды из глубин океана. В данной работе используется предложенный в работе [Малинин, Чернышков и Гордеева, 2002] метод оценки интегрального индекса апвеллинга (ИА), позволяющий учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения, который ранее для ПА не применялся.

Цель диссертационной работы. Рассмотреть основные крупномасштабные закономерности абиотических параметров (температуры поверхности океана и интегрального индекса апвеллинга), оказывающих принципиальное влияние на формирование биологической продуктивности в области Перуанского апвеллинга, построить статистические модели с выловом преобладающего промыслового вида – анчоуса и оценить их прогностические возможности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Создать базу данных по температуре поверхности океана и скорости ветра на основе широко известных архивов ре-анализа GODAS и Reanalysis-2, имеющих постоянную поддержку.
2. Выявить линейные тренды температуры поверхности океана на акватории ПА.
3. Выполнить районирование акватории ПА по межгодовой изменчивости ТПО методами МСА.
4. Оценить влияние явления Эль-Ниньо на биопродуктивность вод и популяцию анчоусов.
5. Рассчитать с использованием теории Экмана интегральный индекс апвеллинга и оценить его пространственно-временную изменчивость.
6. Построить статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам и оценить возможность их использования для прогноза.

Методология и методы научного исследования. Диссертационное исследование основано на комплексном использовании широкого круга статистических методов: одномерных в виде расчета первичных статистик, корреляционного, регрессионного и многомерных – методов главных компонент, факторного, кластерного, множественной регрессии и деревьев решений (decision trees). Использование этих методов выполняется применительно к широко известным и надежным архивам ре-анализа R-2 и GODAS, которые имеют постоянную поддержку во времени.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. В отличие от вод Мирового океана, которым свойствен почти перманентный рост теплосодержания и ТПО, на всей акватории ПА отмечаются отрицательные линейные тренды ТПО, достигающие максимальных значений в основном в узкой прибрежной полосе северной части ПА. Причиной их формирования служит комплекс причин, среди которых наиболее значимыми являются усиление холодного Перуанского течения и рост интенсивности апвеллинга, особенно ярко выраженный в прибрежной полосе у побережья Перу.
2. **Впервые** выполнено районирование Перуанского апвеллинга по межгодовой изменчивости ТПО методами многомерного статистики с помощью факторного и кластерного анализа. Выделено 4 квазиоднородных района. По максимальным факторным нагрузкам в каждом

районе определены центры кластеров, для которых рассчитаны статистические параметры и оценена межгодовая изменчивость. Наибольшая изменчивость ТПО отмечается в северном кластере 1, наименьшая – в кластере 3 на юге ПА.

3. **Впервые** выполнен расчет интегрального индекса апвеллинга (ИА), позволяющего учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения, определяемого по теории Экмана и показаны особенности пространственно-временной изменчивости ИА для 11 выделенных на акватории ПА районов. Максимальная межгодовая изменчивость отмечается в северной части ПА, наименьшая – на крайнем юге. Для большинства районов ПА отмечаются положительные тренды в глубине трения и ИА, что означает увеличение глубины трения и усиление апвеллинга.
4. Показано сильное влияние явления Эль-Ниньо на систему ПА, особенно в его северной части. Во время экстремальных Эль-Ниньо очаг аномалий ТПО более 5 °С тянется узкой полосой вдоль побережья от 16° ю.ш. до 4° ю.ш., где он расширяется и устремляется в открытый океан. Здесь же отмечаются значительные отрицательные аномалии хлорофилла в поверхностном слое воды. Эль-Ниньо оказывает существенное негативное влияние не только на биомассу анчоуса, но и влияет на нарушение всей экосистемы, которая вынуждена адаптироваться к новым океанографическим условиям.
5. **Впервые** построены статистические модели индекса вылова анчоуса (CPUE) по абиотическим характеристикам на основе моделей множественной линейной регрессии (МЛР) и деревьев решений (ДР) и показана их высокая точность. На 5 шаге модели МЛР переменные описывают 88 % дисперсии CPUE, модель ДР достигает такой точности уже 3 шаге. Прогноз на 2021–2024 гг. применительно к независимым данным CPUE показал, что по модели МЛР только 2022 год отвечает критерию точности по СКО, а по модели ДР, наоборот, только 2021 год не отвечает критерию СКО, для остальных 3 лет прогноз был успешным.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности распределения линейных трендов ТПО на акватории ПА.
2. Районирование акватории ПА по межгодовой изменчивости ТПО методами МСА.
3. Закономерности пространственно-временной изменчивости интегрального индекса апвеллинга, рассчитанного на основе теории Экмана, позволяющего учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения.
4. Статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам и оценка возможности их использования в целях прогноза.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость состоит в том, что **впервые** представлен комплексный анализ основных абиотических факторов (температуры поверхности океана и интегрального индекса апвеллинга), их взаимосвязь, построение статистических моделей и их выход на прогноз биомассы анчоуса. При этом полученные результаты существенно дополняют представления об особенностях взаимосвязи абиотических факторов и их влияния на параметры биологической продуктивности. Практическая значимость заключается в том, что использование данных ТПО и ИА позволяет с высокой точностью прогнозировать величину CPUE, являющуюся косвенным индексом биомассы анчоуса.

Обоснованность и достоверность результатов работы обусловлена использованием большого объема качественной исходной гидрометеорологической информации, грамотным применением современных методов одномерного и многомерного статистического анализа. При этом полученные результаты не противоречат, но существенно дополняют и расширяют

современные представления о характере функционирования и изменчивости абиотических факторов и их влияния на популяцию анчоуса Перуанского апвеллинга.

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.6.17 — Океанология.

Диссертация соответствует следующим пунктам специальности:

4. Процессы формирования водных масс, их пространственно-временной структуры, гидрофизические поля Мирового океана.
6. Биологические процессы в океане, их связь с абиотическими факторами среды и хозяйственной деятельностью человека, биопродуктивность районов Мирового океана.
15. Методы исследований, моделирования и прогноза процессов и явлений в океанах и морях.

Личный вклад автора.

Создание массива гидрометеорологических и биолого-промысловых характеристик, выполнение статистических расчетов с помощью методов одномерного и многомерного анализа, необходимых графических построений, обобщение и анализ результатов, подготовка публикаций.

Апробация результатов.

Основные результаты исследования были доложены в 4 докладах на 3-х конференциях: Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023; Восток-Запад: пути культурного диалога. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024; Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы II Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 3 в журналах, входящих в Перечень ВАК, а также 4 в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору Валерию Николаевичу Малинину, за ценную помощь в работе и активную всестороннюю поддержку. Автор также искренне благодарит доцента, к.г.н. Светлану Михайловну Гордееву за её большую помощь, важные советы и огромное терпение в объяснениях статистических методов. Автор также искренне благодарит весь преподавательский состав кафедры прикладной океанографии и КУПЗ РГГМУ за помощь, ценные советы и внимание к работе.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора основных физико-географических и гидрометеорологических характеристик Тихого океана у берегов Перу, описания материала и методов исследования, результатов собственных исследований (пяти глав) и заключения. Полный объём диссертации составляет 149 страниц с 53 рисунками и 13 таблицами. Список литературы содержит 213 источников, причем подавляющее большинство из них принадлежит зарубежным авторам.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Перуанский апвеллинг как высокопродуктивный район Мирового океана

Глава 1 посвящена обзору современного состояния изученности системы прибрежного апвеллинга Перу-Чили, самой биологически продуктивной из «Большой четверки» океанических апвеллингов. В разделе 1.1 представлена общая информация о значении перуанского апвеллинга для экономики Перу. В разделе 1.2 представлена общая характеристика и краткий обзор исследований перуанского апвеллинга. В разделе 1.3 дается описание анчоуса как основного вида рыб в системе прибрежного апвеллинга Перу-Чили.

Глава 2. Исходные данные и статистические методы, используемые в работе

2.1 Характеристика исходных данных

Информационной основой для выполнения работы послужили:

* В качестве индикатора биомассы анчоуса (*Engraulis ringens*) использовались временные ряды оценок улова на единицу усилия (CPUE). Эти данные были предоставлены Перуанским морским институтом (IMARPE, Instituto del Mar del Perú на испанском языке). В нашей работе для анализа был использован период с 1996 по 2020 год ввиду его доступности. Район исследования находился в широтно-долготной зоне: 4–40° ю.ш., на расстоянии 360 миль (6°) от берега.

* среднемесячные данные о температуре поверхности океана (ТПО) базы данных GODAS (Global Ocean Data Assimilation System), которая основана на квазиглобальной конфигурации модели GFDL MOM.v3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model) (<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.godas.html>). Сетка имеет разрешение 1°×1°, увеличенное до 1/3° в направлении север-юг в пределах 10° от экватора. Перуанская зона апвеллинга принята в границах от 4° ю. ш. до 40° ю. ш. Всего в области ПА выбрано 216 точек сетки за период 1980—2020 гг.

* зональные и меридиональные компоненты скорости ветра в приводном слое над океаном, необходимые для определения глубины трения и интегрального индекса апвеллинга по теории Экмана, были выбраны из архива реанализа NCEP/DOE AMIP-II (Reanalysis-2). Сетка имеет разрешение 1,8° × 1,8°. Для области ПА выделено 73 точки. Для этих точек были отобраны среднемесячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период 1980—2020 гг.

2.2 Статистические методы анализа данных, используемых в работе

Для решения поставленных задач использовался многомерный статистический анализ, доступный в современных пакетах прикладных статистических программ (ППСП), включая модели множественной линейной регрессии, метод главных компонент, факторный анализ, кластерный анализ, метод деревьев решений (decision trees), интерполяционные методы построения карт и др. Дается краткое описание методов МСА, используемых в расчетах.

Глава 3. Закономерности межгодовых колебаний температуры поверхности океана

3.1. Временная изменчивость температуры поверхности океана

Влияние температуры проявляется уже с первого звена пищевой цепи морских сообществ, в которой поток энергии направлен от первичного органического вещества через фитопланктон и фитобентос к растительноядному зоопланктону, к хищному планктону и нектону. Итак, влияние температуры весьма велико на всех стадиях развития морских организмов. Однако следует различать некоторый температурный оптимум, т.е. такой диапазон её изменений, который в наибольшей степени способствует развитию и размножению организмов, а изменения

температуры вне этого диапазона неблагоприятным образом воздействуют на жизнедеятельность морских организмов [Малинин и др., 2002].

Лучше всего задаче выявления закономерностей пространственно-временной изменчивости ТПО соответствуют измерения температуры воды со спутников. На рис.1 представлена карта среднегодовых значений ТПО за период 1980–2020 гг., рассчитанных по базе данных GODAS для области Перуанского апвеллинга. Как и следовало ожидать, распределение значений ТПО имеет четко выраженную меридиональную направленность. Максимальные значения ТПО выше 22 °С отмечаются на севере области ПА, а минимальные ниже 15°С на крайнем юге. Исключение составляет локальный очаг ТПО между 18 и 20° ю.ш., где температура воды примерно на 1 градус выше, чем в более северных широтах. Наибольшая скорость уменьшения ТПО наблюдается в южной части ПА.

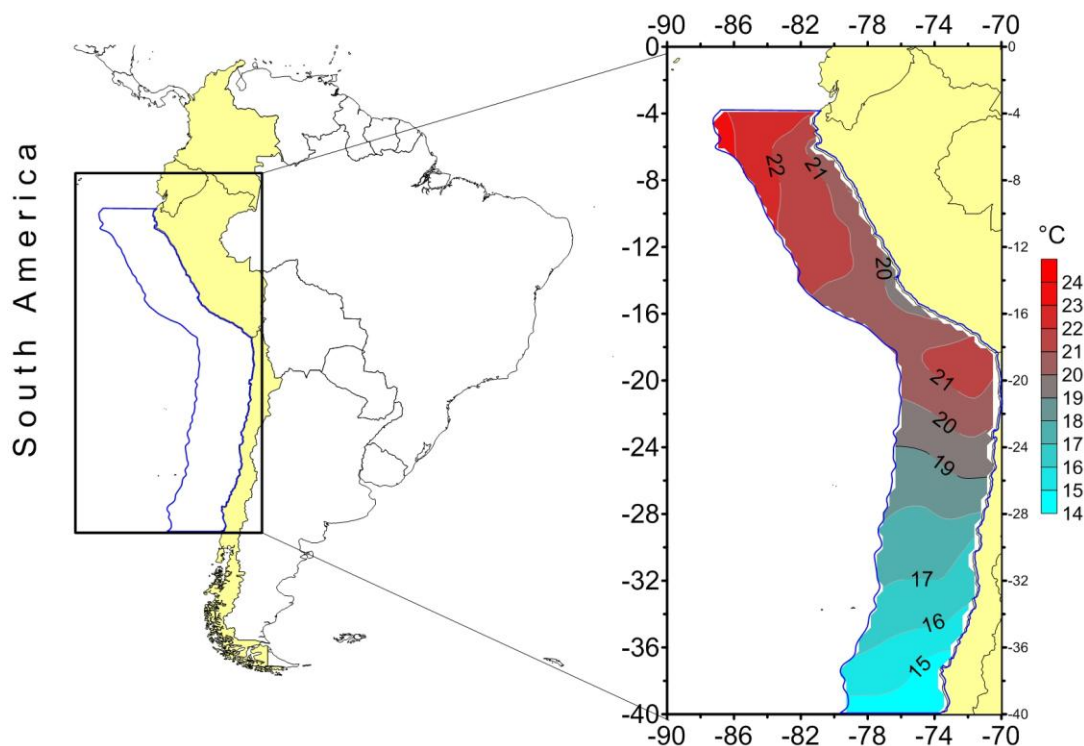


Рис.1 – Распределение среднегодовых значений ТПО в области Перуанского апвеллинга за период 1980–2020 гг. по данным GODAS [Martina-Vasquez et al., 2024].

Рассматривая пространственное распределение угловых коэффициентов линейного тренда среднегодовых значений ТПО (рис. 2), видно, что отрицательные тренды ТПО наблюдаются на всей акватории ПА. Максимальные их значения (по абсолютной величине) сосредоточены в узкой прибрежной полосе океана в северной части ПА между 6° и 16° ю.ш. Также можно отметить, что тренды ТПО значимы практически для всего региона ПА, за исключением локальных очагов на севере и юге ПА.

Причиной отрицательных трендов ТПО является усиление холодного Перуанского течения, которое формируется из северной ветви Антарктического циркумполярного течения. Оно вызвано интенсификацией зональной циркуляции атмосферы (Southern Annular Mode —

SAM), в результате которой происходит усиление Антарктического циркумполярного течения. Другой причиной является интенсификация апвеллинга наиболее ярко выраженная в прибрежной зоне (гл. 4).

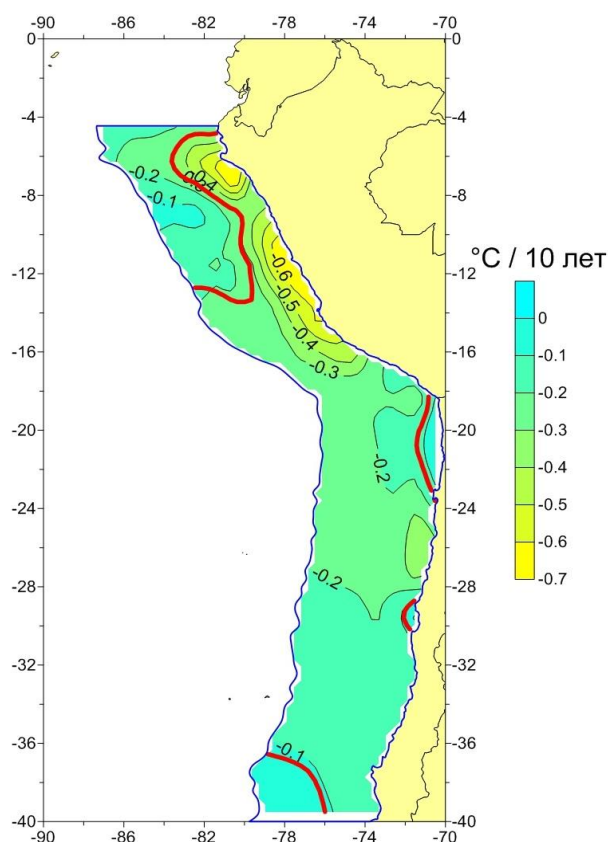


Рис.2 – Пространственное распределение коэффициентов тренда для среднегодовых значений ТПО в области Перуанского апвеллинга. Жирной кривой красного цвета отделены локальные очаги незначимых трендов.

Карты линейных трендов были построены для каждого месяца года. Из этих карт выбирались максимальные положительные (max) и отрицательные (min) тренды значений ТПО, а также определялось число положительных (n^+) и отрицательных (n^-) трендов значений ТПО в области Перуанского апвеллинга. Результаты приведены в таблице 1, из которой видно, что на акватории ПА отрицательные тренды преобладают в течение всего года. Их максимальные значения наблюдаются в феврале-мае. В августе-сентябре они охватывают всю акваторию ПА, и хотя в январе-феврале их численность минимальна, она тем не менее достигает 87,5 % от всей акватории. Положительные тренды, характеризующие рост ТПО, по своей величине значительно меньше отрицательных трендов и соответственно занимают меньшие площади ПА. Их максимальные значения отмечаются в летний период (декабрь-февраль).

Таблица 1 – Оценки максимальных положительных (max) и отрицательных (min) трендов среднемесячных значений ТПО и численность положительных (n^+) и отрицательных (n^-) трендов значений ТПО в области Перуанского апвеллинга

Тренды и их число	М е с я ц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Max, °C/10лет	0,45	0,40	0,17	0,08	0,17	0,13	0,06	0,00	0,00	0,09	0,29	0,42
Min, °C/10лет	-0,68	-0,84	-0,94	-1,06	-0,82	-0,63	-0,56	-0,55	-0,58	-0,67	-0,74	-0,78
n^+	27	27	6	9	24	16	12	0	0	5	20	16
n^-	189	189	210	207	192	200	204	216	216	211	196	200

3.2. Пространственно-временная изменчивость поля ТПО методами многомерной статистики

Наиболее целесообразным способом изучения пространственно-временной изменчивости полей ТПО, заданных в матричном виде, является использование методов многомерной статистики, прежде всего, методов главных компонент, факторного анализа, кластерного анализа [Малинин и др., 2020; Малинин, Гордеева, 2003]. Метод главных компонент (МГК) представляет формальное разложение исходных переменных на линейно независимые составляющие с различной дисперсией без искажения геометрической структуры данных. В методе главных факторов первоначально выполняется разложение МГК, а затем осуществляется вторичное вращение с целью получения более содержательной интерпретации полученным главным факторам. Если такую интерпретацию получить не удастся, то считается использование факторного анализа неудачным.

Исходная матрица среднегодовых значений ТПО была задана размером 216×41, где 216 – число точек в области ПА, 41 – длина временных рядов в каждой точке. При разложении данной матрицы на главные компонент выявлена очень высокая скорость сходимости (СС) собственных чисел λ_j . Так, уже 1 собственное число λ_1 описывает более 70 % суммарной дисперсии поля ТПО. В сумме первые четыре λ_j описывают 93 % дисперсии поля ТПО (табл. 2). Анализ значений поля первого собственного вектора разложения показал, что значимые коэффициенты корреляции охватывают преобладающую часть акваторию ПА, т.е. поле ТПО выглядит излишне однородным [Martina-Vasquez и др., 2024].

Таблица 2

Оценки собственных чисел и скорости их сходимости среднегодовых значений ТПО за 1980-2020 гг., полученные методом главных факторов.

λ_j	Первое вращение			Второе вращение		
	λ_j	$\lambda_j/\sum \lambda_j$ %	k_{cc} , %	λ_j	$\lambda_j/\sum \lambda_j$ %	k_{cc} , %
1	152,8	70,7	70,7	80,4	37,2	37,2
2	31,2	14,4	85,2	76,23	35,3	72,5
3	9,5	4,4	89,6	18,4	8,6	81,1
4	7,0	3,2	92,9	25,6	11,8	92,9

Учитывая большую меридиональную протяженность области ПА, такой результат показался неочевидным. Поэтому собственные векторы разложения и главные компоненты четырех λ_j были подвергнуты второму вращению методом варимакс Кайзера. В результате такого вращения произошла перекачка дисперсии из 1 общего фактора в остальные, причем 2 фактор увеличился более чем в 2 раза (табл. 2). Анализ факторных нагрузок (ФН), представляющих редуцированные корреляционные связи исходных переменных с общими факторами (ОФ), показал, что более 80 % акватории ПА описывается первыми тремя ФН, имеющими оценки более 0,70. На остальной акватории оценки ФН «размазаны» относительно равномерно, т.е. они меньше 0,65. Оценки четвертой ФН во всех точках акватории ПА оказались меньше 0,65, т.е. она практически не участвует в формировании изменчивости поля ТПО.

Было выявлено, что наилучшая территориальная связность точек получается при использовании метода к-средних, который позволил уточнить границы между классами. Тем не менее, для устранения некоторой неопределенности в проведении границ между районами, осуществлялся пересмотр принадлежности ряда пограничных точек в заданных районах. На рис.3 приводятся результаты районирования области ПА по характеру межгодовой изменчивости ТПО.

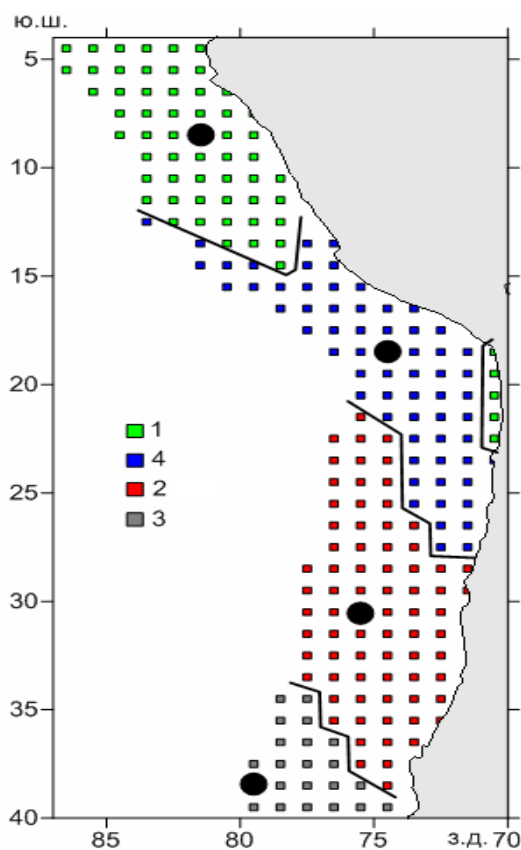


Рис. 3 – Результаты районирования области ПА по характеру межгодовой изменчивости ТПО. Номера районов соответствуют номерам факторов. Черными точками указаны центры квазиоднородных районов, оптимальным образом описывающих изменчивость ТПО внутри района [Martina-Vasquez и др., 2024].

Наиболее высокие ФН отмечаются для 1 района (кластера), выделенного на Рисунке 3.9 зеленым цветом. В него входит 59 точек и он занимает в области ПА крайне северное положение. Очевидно, за центр кластера целесообразно принять максимальную факторную нагрузку в данном районе, которая равна 0,97 и имеет координаты 8,5° ю.ш. и 81,5° з.д., причем эта оценка является максимальной для всей матрицы ФН. Центр кластера имеет максимальную корреляцию с точками, входящими в кластер.

В табл. 3 представлены статистические характеристики годовых значений ТПО в центрах кластеров и коэффициенты корреляции между ними. Нетрудно видеть, что ТПО последовательно убывает по направлению к югу. Максимальная амплитуда характерна для 1 района. Во время Эль-Ниньо здесь идет резкое повышение ТПО. В межгодовом ходе ТПО каждого из этих кластеров проявляется отрицательный тренд наиболее ярко выраженный в ТПО для 4 кластера. Для 1 и 3 кластеров тренд незначим. Что касается корреляции годовых значений ТПО в центрах кластеров, то он меняется от 0,67 между 1 и 4 кластерами до 0,30 между крайними 1 и 3 кластерами.

Таблица 3

Статистические характеристики годовых значений ТПО в центрах кластеров и коэффициенты корреляции между ними ($X_{\text{ср}}$ – среднее, A – амплитуда, C – коэффициент вариации, Tr – коэффициент тренда, R^2 – коэффициент детерминации тренда).

Номер кластера	$X_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$A, ^\circ\text{C}$	C	$Tr, ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$	R^2	Корреляция		
						2	3	4
1	21,6	4,9	0,05	–0,17	0,04	0,41	0,30	0,67
2	17,3	1,6	0,02	–0,13	0,18	1	0,43	0,65
3	15,2	1,5	0,02	–0,04	0,02		1	0,46
4	20,8	2,7	0,03	–0,26	0,32			1

3.3. О влиянии Эль-Ниньо на Перуанский апвеллинг

Регион ПА вплотную примыкает к области ЭНЮК (Эль-Ниньо-Южное Колебание), которая представляет уникальное гидрометеорологическое явление. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону Мирового океана, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата не только в Тихом океане, но и далеко за его пределами.

На рис. 4 приводится межгодовая изменчивость CPUE (биомассы) анчоусов (1), значений ТПО в районе Niño 1+2 (2) и в центре 1 кластера ПА (3). Вертикальными прямоугольниками показано явление Эль-Ниньо в районе N 1+2. Цвет означает интенсивность явления: черный цвет – слабое или умеренное явление, красный цвет – экстремальное явление. Видно, что CPUE имеет обратную корреляцию с ТПО в районе Niño 1+2 и в центре 1 кластера. При этом наиболее сильный отклик отмечался во время и после экстремальных явлений Эль-Ниньо. При Ла-Нинья прослеживается тенденция к росту CPUE.

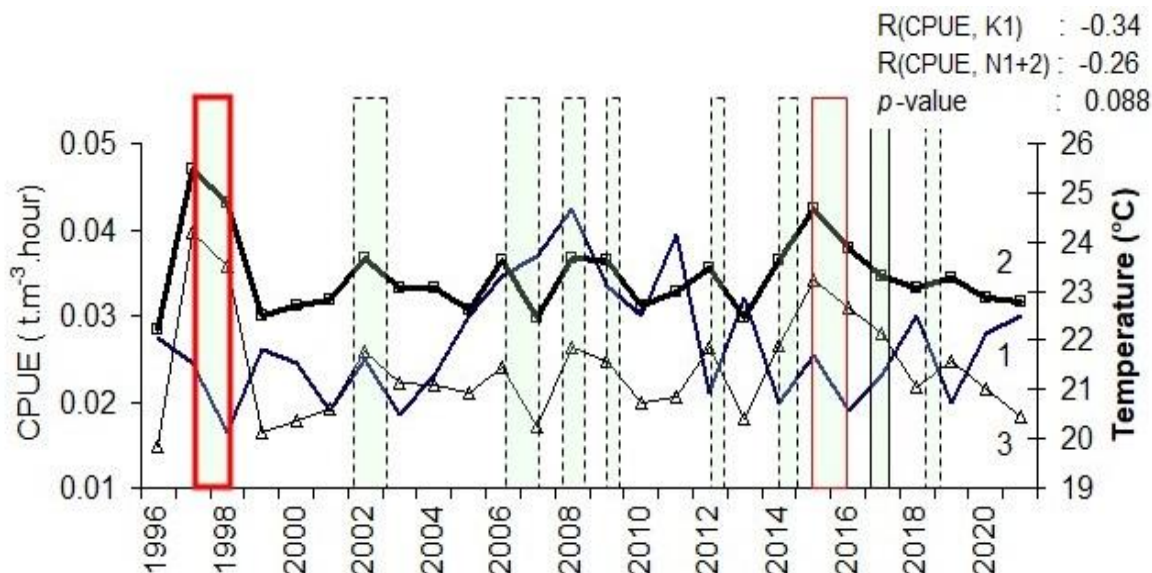


Рис. 4 – Межгодовая изменчивость CPUE (биомассы) анчоусов (1), значений ТПО в районе Niño 1+2 (2) и в центре 1 кластера ПА (3). Вертикальными прямоугольниками показано явление Эль-Ниньо в районе N 1+2. Цвет означает интенсивность явления: черный цвет – слабое или умеренное явление, красный цвет – экстремальное явление.

В 2023 году из-за сильного Эль-Ниньо и сокращения ареала обитания и кормовой базы перуанского анчоуса, его вылов снизился на 56 % по сравнению с 2022 годом. Это привело к дефициту рыбной муки и жира, рекордному росту цен на них и, как следствие, значительному снижению рентабельности аквакультурных ферм по всему миру. Ситуация не стабилизировалась и в следующем году. По данным FAO производство рыбной муки в мире за первые три месяца 2024 года сократилось на 27 % по сравнению с аналогичным периодом 2023 года, а рыбьего жира — на 30 %.

Глава 4. Изменчивость интегрального индекса апвеллинга

4.1. Обоснование интегрального индекса апвеллинга.

Процесс апвеллинга (подъём на поверхность богатых питательными веществами вод) в зоне действия Перуанского течения способствует формированию здесь высокой биологической продуктивности [Herbland и Voituriez, 1974; Minas, 1982], которая поддерживает крупный промысел мелких пелагических видов рыбы. Апвеллинг в зоне Перуанского течения в соответствии с теорией Экмана возникает под действием пассатного ветра, дующего вдоль западных берегов Южной Америки и вызывающего перенос поверхностных вод с отклонением влево от направления ветра. Это приводит к подъёму в эвфотический слой промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов. В результате в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой базой массовым видам пелагических рыб.

Понятно, что высокая биологическая продуктивность в значительной степени зависит от интенсивности апвеллинга, т.е. от скорости подъема в верхний эвфотический слой промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов. Однако оценить интенсивность апвеллинга очень непросто. Это связано с тем, что вертикальные скорости в океане малы и определяются с большими погрешностями, сравнимыми с их средними оценками.

Поэтому интенсивность апвеллинга часто определяется косвенными методами. С этой целью достаточно широкое распространение получили разнообразные индексы апвеллинга. Наиболее простые из них представляют собой простую разность температуры воды (ΔT_w) между прибрежной и морской акваторией, измеренной на одной и той же широте с целью количественной оценки прибрежного охлаждающего эффекта апвеллинга. Проблема состоит в том, что нет четкого понимания как оценить исходную температуру апвеллинга воды до того, как она достигнет поверхности моря. Кроме того, недостатком этих методов является неоднозначность пространственного выбора широтных границ. Более обоснованным является индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г., который получил в зарубежных исследованиях довольно широкое распространение. Расчет данного индекса сводится к вычислению составляющих геострофического ветра в каждой точке выбранной области расчета по среднемесячным градиентам приводного атмосферного давления и, в конечном итоге, нахождению величины полного потока в виде экмановского переноса. Однако вычисленный полный поток водной массы характеризует лишь дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикальное поступление воды из глубин океана. Этого недостатка лишен предложенный в работе [Малинин, Чернышков и Гордеева, 2002] метод оценки интегрального ИА, позволяющий косвенно учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения.

Суть этого метода состоит в том, что на основе теории Экмана рассчитывается осредненная для некоторой акватории величина дивергенции горизонтального потока массы в верхнем слое океана. Исходя из уравнения водного баланса верхнего слоя океана, эта величина соответствует вертикальному потоку водной массы ξ_z на уровне глубины трения. При конвергенции потока массы происходит опускание воды на уровне глубины трения, при дивергенции – подъем вверх. Глубина трения находится в подповерхностном слое океана, откуда к поверхности происходит подъем вод с повышенным содержанием биогенных элементов. Средняя глубина трения в Мировом океане несколько менее 100 м, причем имеет ярко выраженный меридиональный ход. По направлению к экватору она растёт.

4.2 Методические аспекты расчёта индекса апвеллинга

Для расчета интегрального индекса апвеллинга воспользуемся уравнением водного баланса верхнего слоя океана, которое запишем в виде:

$$\partial V / \partial t + \text{div} F_w = P - E + \xi_z, \quad (1)$$

где первый член слева означает изменение объема этого слоя, второй член – результирующий отток (приток) горизонтального потока массы. Справа разность $P - E$ (осадки минус испарение) означает приток влаги через поверхность океана, а величина ξ_z – поток водной массы через нижнюю границу z выделенного верхнего слоя океана. При этом поток вверх (внутри слоя) принимается со знаком «плюс», а поток вниз – со знаком «минус». В качестве z в соответствии с теорией Экмана примем глубину трения D . Схематично составляющие уравнения баланса для района апвеллинга представлены на рисунке 5.

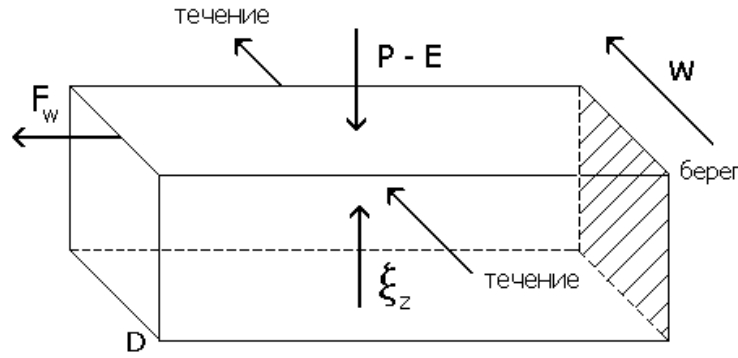


Рис.5 – Схема водных потоков в верхнем слое океана до глубины трения D в области апвеллинга.

Естественно, что величиной $\partial V / \partial t$ в уравнении (1) можно пренебречь, поскольку области апвеллингов являются открытыми, вдобавок, влагообмен через поверхность океанов является пренебрежимо малой величиной по сравнению с $\text{div}F_w$. Отсюда следует, что вертикальный поток водной массы ξ_z уравнивается ее результирующим горизонтальным потоком, то есть

$$\text{div}F_w = \xi_z, \quad (2)$$

По существу, величина ξ_z и представляет индекс апвеллинга. Поскольку непосредственное определение вертикальных потоков воды весьма сложно, то воспользуемся косвенным методом. Так как величина $\text{div}F_w$ обычно представляет малую разность больших величин, то ее оценка через производные в заданной каким-либо образом сеточной области представляется нецелесообразной. Поэтому воспользуемся формулой Остроградского-Гаусса, которая позволяет рассчитывать значения дивергенции через горизонтальные потоки массы, перпендикулярные к контуру некоторого выделенного участка области апвеллинга:

$$\text{div}F_w = \frac{1}{A} \int_L F_n dL, \quad (3)$$

где L – периметр контура, стягивающего площадь A , F_n – поток массы, нормальный к контуру. Отсюда следует, что осредненная по площади величина дивергенции горизонтального потока массы в верхнем слое океана, нормального к контуру некоторого выделенного участка области апвеллинга по сути, представляет индекс апвеллинга (ИА). При дивергенции, т.е. расхождении потоков водной массы, для сохранения уравнения водного баланса должен происходить вертикальный поток воды ξ_z вверх на глубине трения. ИА ($\text{м}^3/\text{с}$) пересчитывается в слой воды единичной площади ($\text{мм}/\text{мес}$).

Представим теперь формулу (3) в конечных разностях в виде:

$$ИА = \text{div}F_w = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n l_j \frac{(F_j + F_{j+1})}{2}, \quad (4)$$

где l_j – расстояние между двумя соседними (j и $j+1$) точками на внешней границе области апвеллинга, F_j и F_{j+1} – вертикально-интегрированные горизонтальные потоки водной массы в

точках j и $j+1$, нормальные к контуру. Тогда в зависимости от ориентации граней контура в пространстве (по параллели или по меридиану) поток массы может быть зональным (F_{wx}) или меридиональным (F_{wy}). Поскольку основной вклад в формирование циркуляции верхнего слоя океана вносят дрейфовые течения, то исходя из теории Экмана, зональную и меридиональную компоненты горизонтального потока водной массы можно вычислить по формулам:

$$F_{wx} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}, \quad F_{wy} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_u}{2\Omega \sin \varphi}, \quad (5)$$

где V_o – скорость течения на поверхности, направленная под углом 45° к направлению ветра, ρ – средняя плотность воды, D – глубина слоя трения, τ_u и τ_v – зональная и меридиональная компоненты касательного напряжения скорости ветра, Ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта. Глубина экмановского слоя трения D определялась по известной формуле:

$$D = \pi \sqrt{\frac{\mu}{\rho \sin \varphi}}, \quad (6)$$

где $\mu = 0,43W^2$ – динамический коэффициент турбулентной вязкости (W – модуль скорости приводного ветра). Итак, по данным о скорости ветра в приводном слое океана можно вычислить ИА и глубину трения.

4.3 Пространственно-временная изменчивость индекса апвеллинга

В области ПА было выделено 73 точки, которые использовались для разбиения акватории ПА на 11 прямоугольных районов (Рисунок 6). Для указанных районов по формуле (4) рассчитывались среднемесячные значения $\text{div}F_w$ за 1980-2020 гг. по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра, которые были отнесены к центрам этих районов. Центры районов выделены на рисунке 6 красными кружками. Одновременно рассчитывалась глубина трения D .

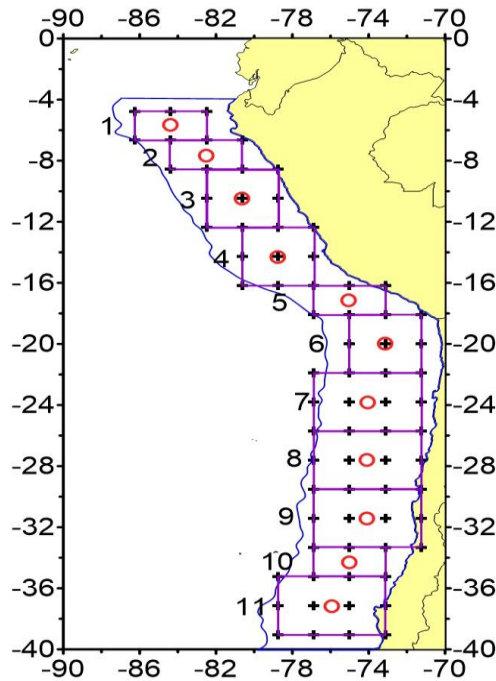


Рис.6 – Разбиение акватории ПА на 11 прямоугольных районов, для которых выполнялся расчет индекса апвеллинга по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра, указанных крестиками. Кружками показаны центры районов, в которых значения ТПО использовались в статистических моделях для выделенных районов.

На рис. 7 приводится внутригодовая изменчивость глубины трения и индекса апвеллинга, осредненных для всей области ПА. Средняя многолетняя величина глубины трения D составляет 67 м, а ИА — 470 мм/мес. Максимум глубины трения отмечается в ноябре (77 м), а минимум в мае (67 м). Отсюда видно, что амплитуда колебаний составляет примерно 15 % от среднего значения. Можно также отметить, что подобный внутригодовой ход ИА отмечается во всех выделенных районах, причем в южных районах амплитуда его выше, а в северных ниже. Индекс апвеллинга меняется в диапазоне от 265 мм/мес (февраль) до 580 мм/мес (июнь). Амплитуда его колебаний составляет около 63 % от $X_{\text{ср}}$, т.е. внутригодовая изменчивость ИА в 4 раза выше изменчивости D .

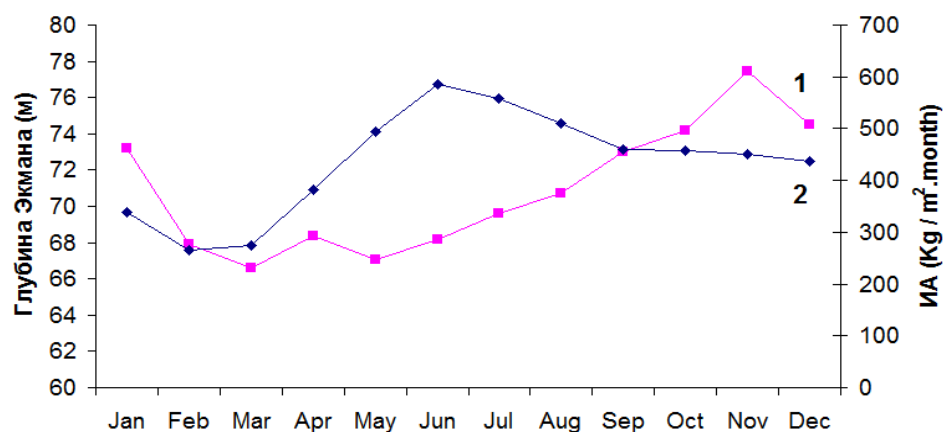


Рис.7 – Внутригодовая изменчивость глубины трения (1) в м и индекса апвеллинга (2) в (мм/мес) для всей области ПА [83].

Учитывая межгодовую изменчивость этих параметров (Табл. 3), нетрудно видеть, что глубина трения уменьшается по направлению к Антарктике почти в 4 раза. Отметим также, что в значениях D проявляется хорошо выраженная циркумконтинентальная зональность, поскольку изолинии D с увеличением в сторону открытого океана практически параллельны береговой черте. Амплитуда меридиональной изменчивости D в пределах ПА составляет 79 м, что превышает ее среднее значение. Однако межгодовая изменчивость значений D невелика (в пределах 10 %), причем мало меняется от района к району. Тренды для большинства районов положительные, что означает увеличение глубины трения. Тренды присутствуют почти во всех выделенных районах. Значимость трендов (вклад в дисперсию функции отклика) оценивается по коэффициенту детерминации. Критическое значение R^2 на уровне значимости по критерию Стьюдента 0,05 определяется по формуле $R^2_{\text{кр}} = 4/(n+2)$. При $n = 40$ $R^2_{\text{кр}} = 0,093$, $r_{\text{кр}} = 0,33$. Итак, значимые тренды отмечаются в центральных районах ПА (районы 4 – 8).

Таблица 3

Оценки первичных статистик ($X_{\text{ср}}$, коэффициент вариации C) и характеристик линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2) для 11 районов ПА за 1980—2020 гг.

Район	Глубина слоя Экмана (м)				Индекс апвеллинга (мм/мес)			
	X_{cp}	C (%)	Тренд, м/год	R^2	X_{cp}	C (%)	Тренд (мм/мес)/год	R^2
1	120,22	10,15	0,0064	0,001	-539,6	78,55	20,7260	0,343
2	110,23	8,50	-0,0095	0,001	275,0	118,30	5,5470	0,042
3	93,03	6,69	-0,0004	0,001	630,7	42,77	-0,1165	0,001
4	88,99	5,03	0,1857	0,247	272,9	67,55	0,9825	0,001
5	68,06	5,73	0,1312	0,162	464,6	55,00	8,7924	0,170
6	63,86	7,87	0,2143	0,261	554,6	24,42	0,2381	0,001
7	65,05	10,36	0,4060	0,521	344,5	24,88	-3,4660	0,235
8	51,04	7,71	0,2137	0,423	545,3	12,23	3,1281	0,315
9	41,03	7,64	0,0695	0,070	545,4	14,03	2,9893	0,219
10	41,67	9,54	0,0786	0,056	587,9	19,43	1,5346	0,026
11	36,59	6,07	0,0493	0,071	427,5	11,79	-1,2510	0,088

Глава 5. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса

5.1. Классификация морских прогнозов

Рассматривается классификация морских прогнозов по наиболее важным таксономическим признакам: заблаговременности прогноза и методам их составления. По заблаговременности морские прогнозы целесообразно разделить на 6 видов: от краткосрочных с заблаговременностью от нескольких часов до нескольких суток до климатических прогнозов, заблаговременность которых превышает несколько десятилетий. По методу составления все морские прогнозы в общем случае можно представить в виде шести основных групп: гидродинамические, генетические, вероятностные, физико-статистические, статистические и экспертные. Такое разделение в определенной степени условно, поскольку некоторые методы трудно отнести к конкретной группе. Особенно это касается разграничения физико-статистических и статистических методов. Отметим, что именно статистические, а также вероятностные методы получили наиболее широкое распространение при долгосрочном прогнозировании тепловых характеристик океана применительно к условиям рыбного промысла.

Выявление круга потенциальных предикторов – это первое методологическое условие разработки метода прогноза. Вторым условием является выявление реальных асинхронных зависимостей, характеризующих причинно-следственные связи в прогностической системе «предиктант-предикторы». Естественно, в зависимости от масштабов пространственно-временного осреднения эти связи могут существенно различаться. Наконец, важнейшим информационным условием разработки физико-статистического метода прогноза океанологических характеристик является оперативное получение натурных данных, расчет компонент баланса или определяющих их факторов за длительный ряд лет и для обширных акваторий океана. Соблюдение всех этих условий может служить главным залогом успеха разработки надежного метода прогноза.

5.2. Физико-статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам и их использование для прогноза анчоуса

Согласно физико-статистическому методу величина $CPUE$ зависит, прежде всего, от двух главных абиотических факторов: ТПО и ИА:

$$CPUE = F(T_i; U_i) \quad (7)$$

где $CPUE$ – оценки улова анчоуса на единицу рыболовного усилия, T_i и U_i – соответственно ТПО и ИА в центрах 11 выделенных районов ПА. Исходными данными по ТПО послужила база GODAS, а данными по ИА – результаты его оценки на основе теории Экмана по скорости ветра в приводном слое по архиву Reanalysis-2.

Физико-статистическая модель $CPUE$ методом МЛР

Использование классической модели МЛР методом включения переменных позволило получить оптимальное стандартизированное (в безразмерном виде) уравнение за период 1996—2020 гг., включающее пять переменных:

$$CPUE = 0,910 U_9 - 0,628 U_3 - 0,478 T_3 + 0,550 T_{11} - 0,376 T_8 \quad (8)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен $R^2 = 0,88$, относительная ошибка (δ) $CPUE$ в долях СКО равна 0,34. Все коэффициенты регрессии значимы по критерию Стьюдента (на уровне $\alpha=0,05$), а сама модель значима (адекватна) по критерию Фишера ($\alpha=0,05$). Последовательность вхождения предикторов в уравнение (1) представлена в табл. 4. В ней также даны параметры МЛР за период 1996—2016 гг. Важное свойство модели – полная устойчивость переменных, ибо изменение длины выборки никак не повлияло на их оценки.

Таблица 4

Статистические оценки моделей МЛР для $CPUE$ по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана

Шаг модели	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,53	0,67	0,53	0,67
2	U_3	0,68	0,55	0,68	0,55
3	T_3	0,77	0,47	0,77	0,47
4	T_{11}	0,84	0,40	0,84	0,40
5	T_8	0,88	0,34	0,88	0,34

Нетрудно видеть, что наиболее важным предиктором является ИА в районе 9 (U_9), т.е. в чилийской зоне ПА, который описывает больше половины (53 %) дисперсии $CPUE$. Это означает, что океанографические условия в Чилийской зоне оказывают важное влияние на формирование $CPUE$ анчоуса. Следующий по значимости ИА в районе 3 (U_3), который находится в прибрежной зоне Перу.

Физико-статистическая модель $CPUE$ методом деревьев решений (decision trees)

Далее по аналогии с моделью МЛР для зависимой выборки (1996—2020 гг.) была построена модель ДР (Рис. 8), статистические характеристики которой приведены в Табл. 5. Как и в случае с моделью МЛР, мы видим практически полное соответствие расчетным характеристикам. Учитывая скорость роста коэффициента детерминации, можно ограничиться ветвлением 3, при котором $R^2 = 0,88$, т.е. модель ДР соответствует модели МЛР на шаге 5. Несмотря на это, необходимо отметить принципиальное различие между моделями. Оно заключается в том, что совпадает только первый предиктор U_9 . На остальных шагах (ветвях) они различаются. Аналогично модели МЛР можно отметить полную устойчивость переменных, поскольку изменение длины выборки никак не повлияло на их оценки.

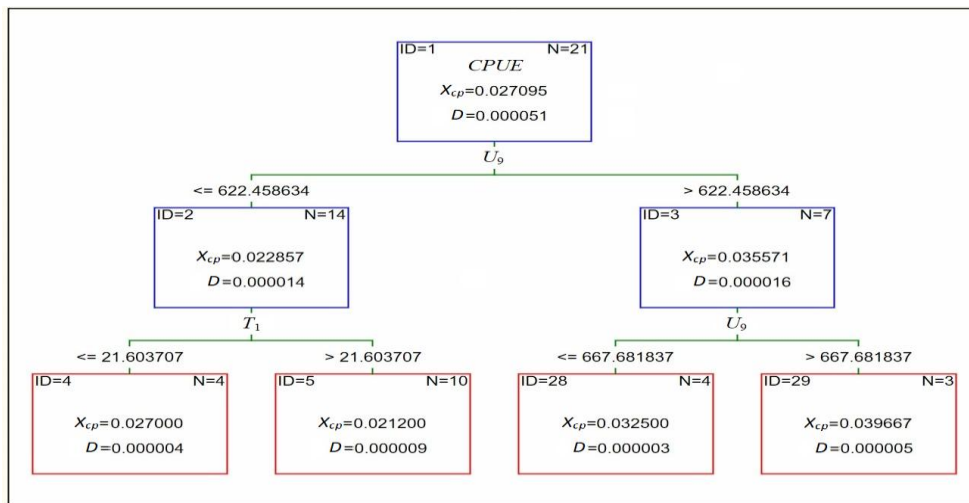


Рис. 8 – Модель дерева решений, состоящего трех ветвлений, описывающих 88 % дисперсии годовых значений *CPUE* (X_{cp} — среднее значение, D — дисперсия).

Таблица 5

Статистические оценки моделей деревьев решений для *CPUE* по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана

Число ветвлений	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,67	0,56	0,71	0,53
2	T_1	0,80	0,44	0,80	0,44
3	U_9	0,88	0,34	0,88	0,34
4	U_{10}	0,93	0,25	0,94	0,24
5	U_7	0,94	0,23	0,95	0,21

Прогностические возможности данного метода оценивались при сопоставлении расчетов с независимыми данными *CPUE* за 2021—2024 гг. Было выявлено, что по модели МЛР только 2022 год отвечает критерию точности по СКО, а по модели ДР, наоборот, только 2021 год не отвечает критерию СКО, а для остальных 3 лет прогноз был успешным. Очевидно, что метод ДР имеет преимущества перед МЛР в точности описания *CPUE*, в визуализации получаемых результатов, более понятной их интерпретации и лучших результатов в прогнозировании *CPUE*.

Заключение

В результате выполненных в работе исследований были сделаны следующие выводы.

1. **Впервые** представлен комплексный анализ основных абиотических факторов (температуры поверхности океана и интегрального индекса апвеллинга), их взаимосвязи друг с другом, включая построение многомерных статистических моделей с оценкой возможности оценки биомассы анчоуса на несколько лет в системе Перуанского апвеллинга.

2. В отличие от Мирового океана, которые в результате глобального потепления испытывают заметный постоянный рост теплосодержания его вод, на всей акватории Перуанского апвеллинга отмечаются отрицательные линейные тренды ТПО. Максимальных значений они достигают в

основном в узкой прибрежной полосе северной части ПА между 6° и 16° ю.ш. В августе-сентябре отрицательные тренды охватывают всю акваторию ПА, в январе-феврале их численность минимальна, но, тем не менее, она достигает 87,5 % от всей акватории ПА. Причиной формирования отрицательных трендов служит комплекс причин, среди которых наиболее значимыми являются усиление холодного Перуанского течения за счет усиления северной ветви Антарктического циркумполярного течения, формирующей холодное Перуанское течение, а также рост интенсивности апвеллинга, особенно ярко выраженного в прибрежной полосе у побережья Перу за счет усиления вдольберегового ветра.

3. **Впервые** выполнено районирование Перуанского апвеллинга по межгодовой изменчивости ТПО методами многомерного статистики с помощью факторного и кластерного анализа. Вначале матрица среднегодовых значений ТПО размером 216×41 (216 – число точек в области ПА, 41 – длина временных рядов в каждой точке) была подвергнута разложению МГК. Было выявлено, что в сумме первые четыре собственных числа λ_j описывают 93 % дисперсии поля ТПО, причем на долю λ_1 приходится уже 70 %. После второго вращения методом варимакс Кайзера произошла перекачка дисперсии из 1 общего фактора в остальные, причем 2 фактор увеличился более чем в 2 раза. Для оценки степени связности 4 общих факторов друг с другом выполнена иерархическая классификация 216 факторных нагрузок значений ТПО и построена дендрограмма методом Уорда, которая показала, что область ПА может быть разбита на 4 квазиоднородных района. Уточнение границ между ними выполнено методом к-средних. По максимальным факторным нагрузкам в каждом районе определены центры кластеров, для которых рассчитаны статистические параметры и оценена межгодовая изменчивость. Наибольшая изменчивость ТПО в северном кластере 1, наименьшая – в кластере 3 на юге ПА.

4. Выполнено обоснование интегрального индекса апвеллинга, позволяющего учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения, определяемого на основе теории Экмана. **Впервые** показаны особенности пространственно-временной изменчивости для 11 выделенных на акватории ПА районов. Во внутригодовом ходе минимальные значения индекса апвеллинга отмечаются в феврале-марте, а максимальные – в июне-июле. Максимальная межгодовая изменчивость отмечается в северной части ПА, наименьшая – на крайнем юге. Для большинства районов ПА отмечаются положительные тренды в глубине трения и ИА, что означает увеличение глубины трения и усиление апвеллинга.

5. **Впервые** выявлены довольно сильные статистические связи между ИА, глубиной трения и ТПО в 11 выделенных районах. Корреляция между ИА и глубиной трения оказывается отрицательной для всех районов: при уменьшении глубины трения происходит увеличение вертикальной скорости воды, что приводит к возрастанию вверх потока водной массы и соответственно ИА. Ее максимум отмечается в районе 7, где корреляция достигает $r = -0,85$. Корреляция между ИА и ТПО в большинстве районов отрицательная, т. е. при возрастании потока более холодных водных масс вверх к поверхности температура океана понижается.

6. Показано сильное влияние явления Эль-Ниньо на систему ПА, особенно в его северной части. Во время экстремальных Эль-Ниньо очаг аномалий ТПО более 5°C тянется узкой полосой вдоль побережья от 16° ю.ш. до 4° ю.ш., где он расширяется и устремляется в открытый океан. Здесь же отмечаются значительные отрицательные аномалии хлорофилла в поверхностном слое воды. Эль-Ниньо оказывает негативное влияние не только на биомассу анчоуса, но и нарушение всей экосистемы, которая вынуждена адаптироваться к новым океанографическим условиям.

7. **Впервые** построены статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам на основе моделей множественной линейной регрессии и деревьев решений.

Показана их высокая точность. На 5 шаге модели МЛР переменные описывают 88 % дисперсии CPUE, модель ДР достигает такой точности уже 3 шаге. Опытный (поверочный) прогноз CPUE по этим моделям на 2017—2020 гг. показал минимальные расхождения между фактическими и прогностическими значениями CPUE. Прогноз на 2021—2024 гг. применительно к независимым данным CPUE показал, что по модели МЛР только 2022 год отвечает критерию точности по СКО, а по модели ДР, наоборот, только 2021 год не отвечает критерию СКО, для остальных 3 лет прогноз был успешным. Полученные результаты подтверждают, что метод ДР имеет преимущества перед МЛР в точности описания CPUE, в визуализации получаемых результатов, более понятной их интерпретации и лучших результатов в прогнозировании CPUE. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, находящегося в южной части акватории ПА, который описывает более половины дисперсии CPUE методом МЛР и три четверти методом ДР.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и периодических изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Martina-Vasquez J., Gordeeva S., Malinin V. On the estimation of the interannual variability of the ocean surface temperature in the area of the Peruvian upwelling // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24, № 2. DOI: 10.2205/2024ES000876. (база Scopus, Перечень ВАК).
2. Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 280—292.
3. Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 674—688. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688.

Публикации в других научных изданиях

4. Смирнов М.А., Малинин В.Н., Митина Ю.В., Мартина-Васкес Д. Изменчивость уровня океана в области ЭНЮК и его влияние на уровень в зоне ПА. В сб.: Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 276—279.
5. Мартина-Васкес Д.Х., Гордеева С.М., Малинин В.Н. К оценке межгодовой изменчивости ТПО в области ПА. В сб.: Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 134—137.
6. Мартина Д.Х., Гордеева С.М., Малинин В.Н. Российско-Перуанские исследования в изучении биомассы анчоуса. Восток-Запад: пути культурного диалога. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 172—175.
7. Мартина Д.Х., Гордеева С.М., Малинин В.Н. Статистическая модель биомассы анчоуса в области ПА по данным о температуре воды. В сб.: Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы II Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 284—288.