

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное бюджетное государственное учреждение
высшего образования

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи

Мартина Васкез Джимми Хуан

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

Специальность: 1.6.17 – Океанология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук, профессор
Малинин Валерий Николаевич

Санкт-Петербург – 2025

Оглавление

Введение	3
Благодарности.....	10
1. Перуанский апвеллинг как высокопродуктивный район Мирового океана	12
1.1. Значение Перуанского апвеллинга для экономики Перу	12
1.2 Общая характеристика и краткий обзор исследований Перуанского апвеллинга.....	15
1.3. Анчоус как основная рыба системы апвеллинга	23
2. Исходные данные и статистические методы, используемые в работе	30
2.1 Характеристика исходных данных.....	30
2.2. Методы многомерного статистического анализа, используемые в работе ..	33
2.2.1. Множественная линейная регрессия (МЛР).....	33
2.2.2. Факторный анализ	39
2.2.3. Кластерный анализ	46
2.2.4. Деревья решений (ДР).....	51
3.1. Временная изменчивость температуры поверхности океана	60
3.2. Пространственно-временная изменчивость поля ТПО методами многомерной статистики.....	72
3.3. О влиянии Эль-Ниньо на Перуанский апвеллинг	81
4. Изменчивость интегрального индекса апвеллинга.....	91
4.1. Обоснование интегрального индекса апвеллинга	91
4.3. Пространственно-временная изменчивость индекса апвеллинга	104
5. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса	111
5.1. Классификация морских прогнозов	111
5.2. Статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам и возможности их использования в прогностических целях	114
Заключение.....	123
Список литературы.....	126

Введение

Актуальность 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 [1—3]. 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 подъём 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 [4, 5].

В водах Перуанского апвеллинга, занимающего площадь около 0,02 % площади Мирового океана, добывается около 20 % мирового улова рыбы [6—9]. 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* [10], который, помимо своей пищевой ценности, играет важную роль в экономике Перу и в мировом производстве рыбной муки [11]. В некоторые годы вылов анчоуса достигает 10 % мирового улова [12]. Естественно, это самый важный промысел в Перу, а также самая интенсивно эксплуатируемая рыба в мировой истории [13]. Однако причины «перуанской загадки» огромного производства рыбы в ПА в настоящее время еще не до конца выявлены [12]. У берегов Перу за период 2014—2023 гг. было выловлено более 42 миллионов тонн

различных видов рыб, из которых почти 90 % составили перуанские анчоусы [14].

К важнейшим абиотическим факторам формирования рыбопродуктивности относятся температура поверхностного слоя океана (ТПО) и интенсивность апвеллинга. Влияние температуры воды на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно [15, 16], 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 [7, 17—19 и др.] до настоящего времени пространственно-временная изменчивость этого важнейшего абиотического фактора изучена крайне слабо и нуждается в более тщательном анализе 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 [20—22]. Из них наиболее обоснованным является индекс апвеллинга, предложенный Бакуном в 1973 г. [23], 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 [15] метод оценки интегрального индекса апвеллинга (ИА), позволяющий учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения, который ранее для ПА не применялся.

Цель 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 re-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.

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 re-анализа R-2 и GODAS, которые имеют постоянную поддержку во времени.

Научная новизна выполненного исследования.

1. В отличие от вод Мирового океана, которым свойствен почти перманентный рост теплосодержания, 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 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 работы. Теоретическая значимость состоит в том, что 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 ТПО и ИА позволяют 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 диссертационной работы.

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.

Материалы диссертации изложены в 7 статьях, опубликованных в научных изданиях РФ, в том числе 3 из них в журналах из Перечня ВАК, а также 4 в сборниках материалов международных и всероссийских конференций:

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 Skopus, 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. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292. (Перечень ВАК).

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. (Перечень ВАК).

4. Смирнов М.А., Малинин В.Н., Митина Ю.В., Мартина-Васкес Д. ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ОКЕАНА В ОБЛАСТИ ЭЛЬ-НИНЬО- ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УРОВЕНЬ В ЗОНЕ ПЕРУАНСКОГО АПВЕЛЛИНГА. В сборнике: 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 ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В ОБЛАСТИ ПЕРУАНСКОГО АПВЕЛЛИНГА. В сборнике: 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 ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ БИОМАССЫ АНЧОУСА. В сборнике: 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 ПЕРУАНСКОГО АПВЕЛЛИНГА ПО ДАННЫМ О ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ. В сборнике: Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы II Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 284-288.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка рисунков, таблиц и списка использованной литературы. Полный объем диссертации составляет 150 страниц с 53 рисунками и 14 таблицами. Список литературы содержит 212 источников, причем подавляющее большинство из них принадлежит зарубежным авторам.

Благодарности

Я хочу искренне поблагодарить профессора Валерия Малинина, доктора географических наук, академика РАН, профессора РГГМУ за его руководство, поддержку, рецензирование рукописей и тезисов конференций, а также ценные замечания в качестве моего научного руководителя. Его опыт, поддержка и наставничество были бесценны на протяжении всего моего академического пути и сыграли значительную роль в моем успехе. Спасибо за то, что он поделился со мной своими знаниями и опытом, за его огромное терпение и понимание, и за его неустанные усилия, чтобы помочь мне расти как в академическом, так и в личном плане. Его вклад в мой академический успех никогда не будет забыт.

Для меня было большой честью иметь его в качестве моего научного руководителя. Хочу также поблагодарить к.г.н., доцента РГГМУ Светлану Гордееву за её ценную помощь и огромное терпение при обработке данных и пояснениях, когда это было необходимо. Это исследование было бы невозможно без поддержки и гранта от правительства России посредством Федерального агентства по делам Содружества Независимых Государств, соотечественников,

проживающих за рубежом, и по международному гуманитарному сотрудничеству (Россотрудничество).

Хочу также выразить свою благодарность Российскому государственному гидрометеорологическому университету за его любезное гостеприимство во время моего пребывания на кафедре прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами. Я благодарен всем сотрудникам за их постоянную помощь и за обучение меня на нескольких курсах для расширения моих знаний.

Искренне благодарю моих родителей, Хуана де Диоса и Амелию, которым я очень обязан за их огромную поддержку и искреннюю любовь. Они оба верили в меня и поддерживали в трудные времена, оказывая мне всю необходимую помощь для завершения учёбы так далеко от дома.

1. Перуанский апвеллинг как высокопродуктивный район Мирового океана

1.1. Значение Перуанского апвеллинга для экономики Перу

Богатство перуанских прибрежных вод легендарно и хорошо известно еще древним перуанским цивилизациям, в эпоху Майя и Инков, которые знали, что, в отличие от работы на окраинных пустынных землях побережья, у них есть море, служащее источником продовольствия, необходимого для существования населения [24].

Система прибрежного апвеллинга Перу-Чили на сегодняшний день является системой самой высокой биологической продуктивности прибрежного апвеллинга большой четверки океанских апвеллингов. Ее продуктивность подтверждается различными исследованиями, указывающими на то, что эта область имеет одну из самых важных областей апвеллинга в мире, способствующую развитию значительного изобилия рыбных ресурсов [2, 25—28]. Однако причины столь высокой продуктивности еще не конца выявлены, поэтому эту систему называют иногда «перуанской загадкой» или «головоломкой» [12]. По мнению ряда авторов, продуктивность зоны апвеллинга, несмотря на то, что она составляет всего 0,02 % поверхности Мирового океана, составляет около 20 % мировых уловов в сфере промышленного рыболовства [1, 29, 30].

Вылов основных видов рыбы в водах ПА представлен на рисунке 1.1. Нетрудно видеть, что главным видом вылова служит анчоус, вклад которого в суммарный вылов достигает почти 90 %. В Перу многие рыболовные хозяйства традиционно развиваются либо для производства рыбной муки, либо для непосредственного потребления населением. Большинство из них являются пелагическими ресурсами. К ним относятся анчоус (*Engraulis ringens*), тунец, пелагида (*Sarda sarda chiliensis*), скумбрия японская (*Scomber japonicus*) и перуанская ставрида (*Trachurus murphyi*). Есть еще один важный ресурс, это

донная рыба, наиболее важным представителем ее является хек (*Merluccius gayi peruanus*). С 2014 по 2023 годы у берегов Перу было выловлено более 42 миллионов тонн различных видов рыб, из которых почти 90 % составили перуанские анчоусы. Вылов других видов рыбы (тунец, скумбрия и ставрида) не превышал 1—2 % от суммарного улова. Необходимо также отметить важную роль анчоуса в мировом рыбном промысле, поскольку в некоторые годы его вылов достигал 10 % мирового улова [14].

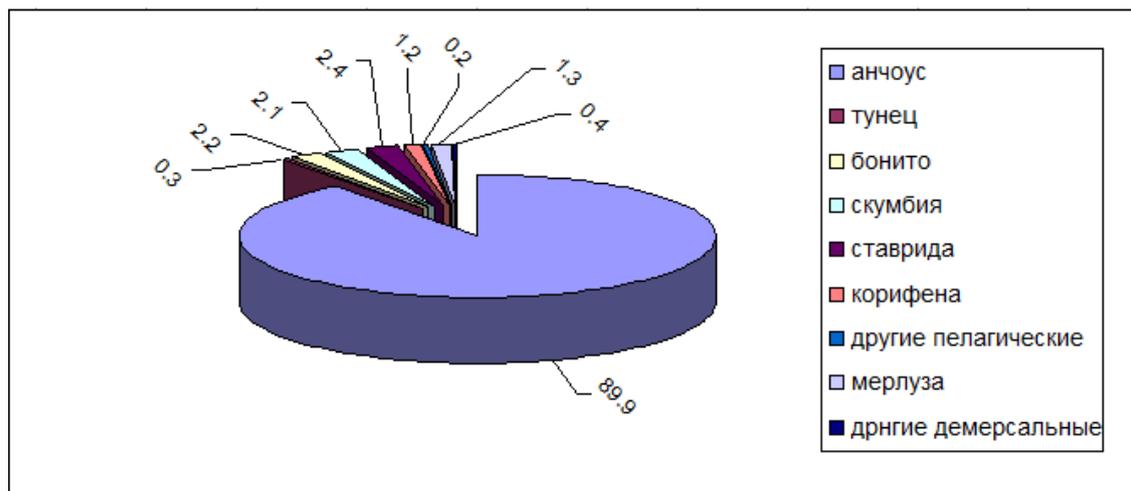


Рисунок 1.1 – Вылов основных видов рыбы в водах Перуанского апвеллинга в течение 2014 – 2023 гг. в процентах от суммарного улова [14].

На рисунке 1.2 показано распределение в миллионах тонн улова рыбы 10 крупнейших стран-производителей рыбы за 2022 год по данным FAO [31]. Нетрудно видеть, что их общий улов достигает 60 % мирового вылова. Крупнейшей рыболовной страной является Китай, почти вдвое опережающий Индонезию, которая находится на втором месте. Перу занимает почетное третье место в мире, добывая более 5,2 млн. тонн рыбы, что составляет 7 % от общего мирового улова, при этом являясь крупнейшим производителем и экспортером рыбной муки. Кроме того, ожидается, что производство и экспорт рыбной муки и рыбьего жира в Перу (косвенное потребление человеком) будут расти и дальше [31].

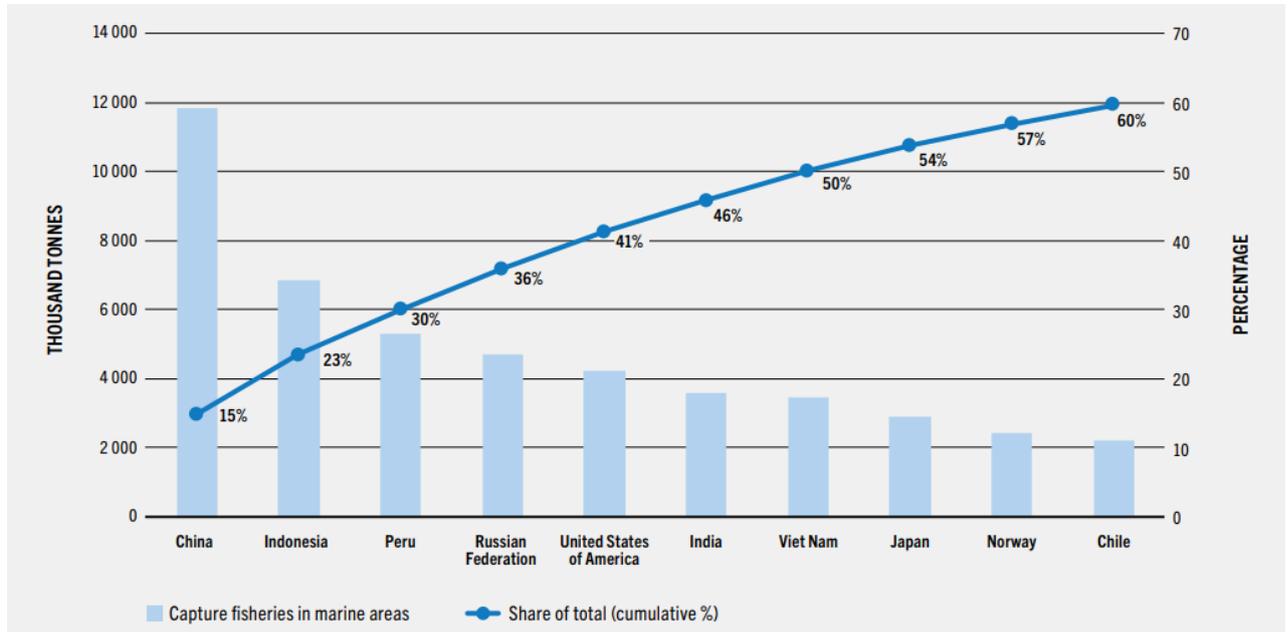


Рисунок 1.2 – Распределение рыбного промысла 10 крупнейших стран-производителей рыбы в 2022 году в тыс. тонн [31].

На рисунке 1.3 представлен экспорт перуанской рыбной продукции с 2014 по 2023 год, на котором можно видеть непрерывный рост с 1530 миллионов тонн в 2014 году до 2088 миллионов тонн в 2021 году. В некоторые годы наблюдалось снижение экспорта, например, в 2016 и 2020 годах на 1084 и 1559 миллионов тонн соответственно. Нечто подобное произошло также в 2023 году, когда было экспортировано 1316 миллионов тонн. В обоих случаях, в 2015 и 2016 годах, экстремальный Эль-Ниньо 21-го века был основной причиной падения экспорта [32], тогда как в 2020 году это происходило из-за Covid-19 [33].



Рисунок 1.3 – Динамика экспорта рыбной продукции в 2014—2023 гг. (в тыс. тонн и стоимость в млн. долларов) [14].

Кроме того, сообщалось, что в мае 2024 года валовая стоимость продукции сектора добывающего рыболовства зарегистрировала значительный рост на 329,2 % по сравнению с маем 2023 года, что составляет приблизительно 0,8 % от национального валового внутреннего продукта (ВВП). Следует отметить, что в совокупном периоде с января по май 2024 года валовая стоимость продукции сектора добывающего рыболовства зарегистрировала рост на 43,7 % по сравнению с тем же периодом предыдущего года [34]. При этом рыбный промысел относится к числу важнейших экспортных отраслей, на долю которого приходится до 25 % экспортных доходов страны.

1.2 Общая характеристика и краткий обзор исследований Перуанского апвеллинга

Система апвеллинга Перу или система течений Перу является северной частью восточной пограничной системы течений южной части Тихого океана. Она расположена вдоль западного побережья Южной Америки, примерно между

5° S и 20° S и между 70° W и 90° W, где экваториальный ветер генерирует сильный прибрежный апвеллинг. Вместе с течениями (Бенгельское, Канарское и Калифорнийское), система апвеллинга Перу является одной из четырех основных областей прибрежного апвеллинга в мире. Все четыре системы апвеллинга являются высокопродуктивными [35].

Перуанский прибрежный апвеллинг уникален, поскольку ветры поддерживают этот процесс круглый год [36], а цикл Эль-Ниньо-Южное колебание (ENSO на английском языке или ЭНЮК на русском языке) вызывает определенную межгодовую изменчивость в экосистеме. Эта прибрежная система апвеллинга, на которую приходится всего 0,02 % от общей поверхности океана, имеет большое значение, поскольку она определяет высокую продуктивность перуанских прибрежных вод, на которые приходится почти 20 % мирового промышленного улова рыбы.

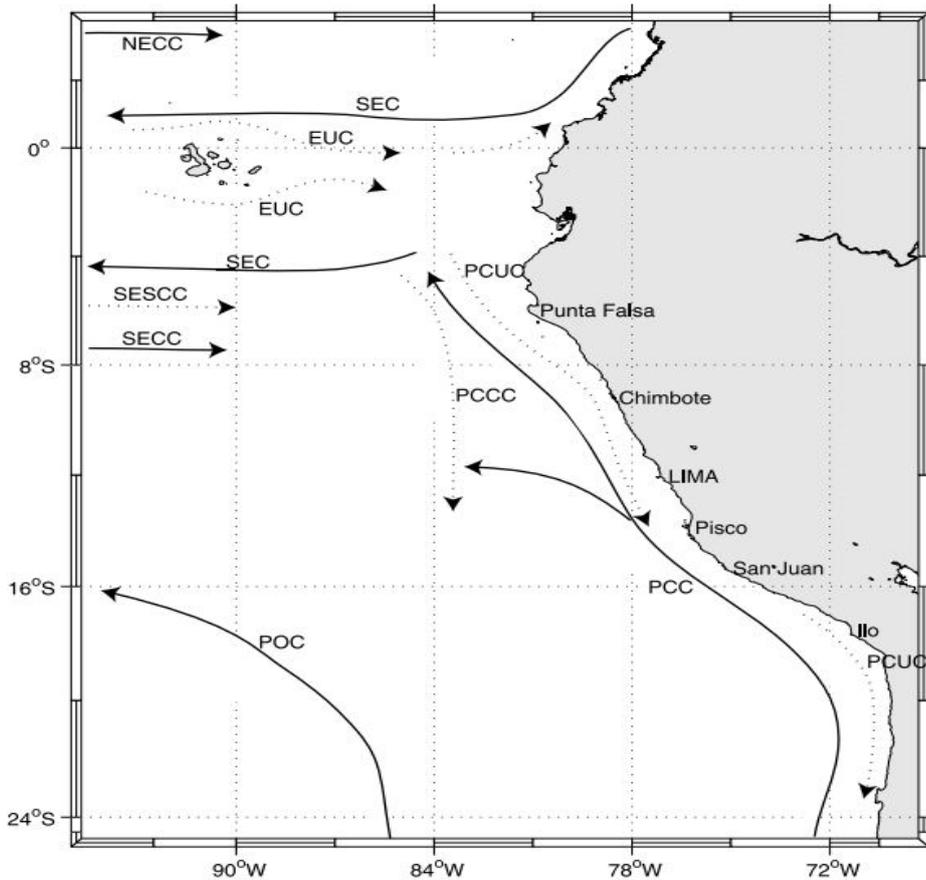


Рисунок 1.4 – Перуанский регион системы северного течения Гумбольдта [37, 38]

На рисунке 1.4 показан перуанский регион системы Северного течения Гумбольдта, видны подповерхностные (пунктирная линия) и поверхностные (сплошная линия) течения, представленные не в масштабе. Перуанское прибрежное течение (РСС), или течение Гумбольдта, восточное пограничное течение, текущее в направлении экватора и близко к побережью, простирающееся на 500–1000 км, переносит воду из прибрежного апвеллинга, поэтому оно холодное и соленое. Оно питает Южное экваториальное течение (SEC), образуя экваториальный холодный язык, видимый на северо-западе (4° ю.ш.). Сезонный цикл РСС не очень хорошо известен, хотя некоторые измерения указывают на максимальную скорость зимой [39]. Затем в поверхностном слое доминирует экваториальный поток Перуано-Чилийское течение.

Перуанское океаническое течение (РОС), которое течет к экватору на расстоянии > 150 км от берега, простирается от поверхности до глубины 700 м. Оно следует вдоль побережья на расстоянии 1000–1500 км и поворачивает на запад около 15° ю.ш. – 20° ю.ш. Известно, что это течение достигает больших скоростей, чем Перуанское прибрежное течение [40].

Существует также слабый и нерегулярный южный поток Перу (или Гумбольдта), Перуано-Чилийское противотечение (РССС), которое обычно остается субповерхностным, но иногда достигает поверхности и поворачивает на запад около 15° ю.ш. Перуано-Чилийское подводное течение (РСУС) течет к полюсу вдоль внешнего континентального шельфа и внутреннего склона. Такие подповерхностные течения являются продолжением Экваториального подводного течения. Возможно, главное из них, подповерхностное РСУС, переносит бедные кислородом воды (4–10 см/с) на юг, что оказывает большое влияние на распределение бентосных и придонных видов. Это противотечение более интенсивно вдоль перуанского побережья, чем вдоль чилийского.

Вдоль перуанского побережья горный хребет Анды заставляет юго-восточные пассаты дуть на север (рисунок 1.5). Такой механизм поддерживается относительно сильными ветрами в нижней части атмосферы, определяемыми как струйные течения низкого уровня [41–43]. При этом ветер почти постоянно

способствует процессу апвеллинга, представляя прибрежный максимум в австралийскую зиму с июня по сентябрь [44, 45].

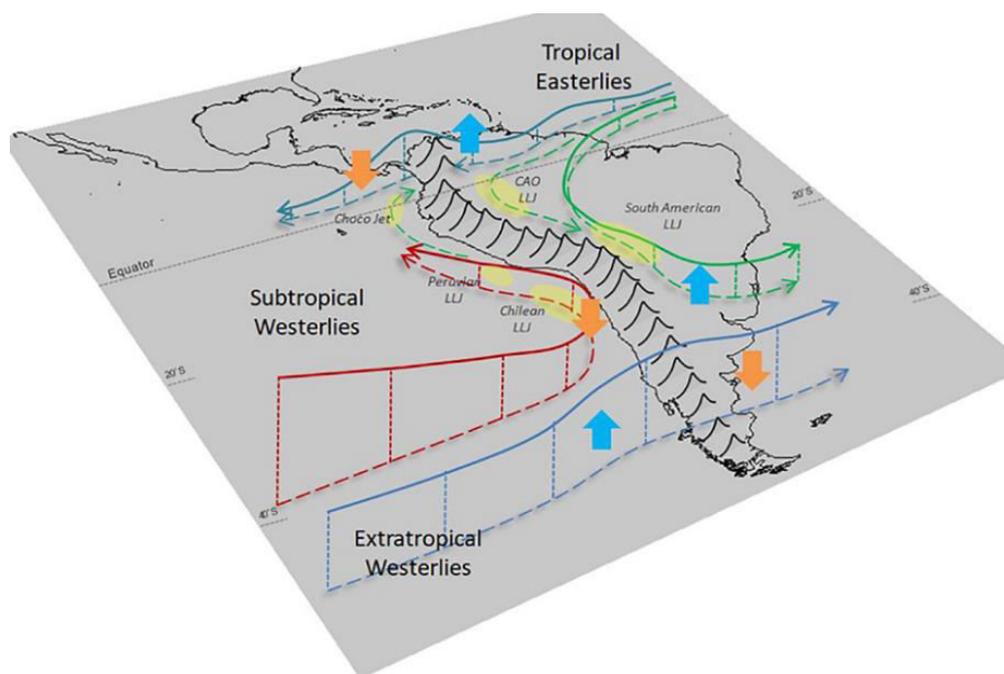


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение Южной Америки, изображающее основные струйные течения низкого уровня по обе стороны Андских Кордильер [42, 43].

Северная система течения Гумбольдта характеризуется высокими скоростями апвеллинга и потока питательных веществ [46], что позволяет поддерживать высокую численность морских ресурсов у берегов Перу. Высокая биологическая продуктивность Перуанской системы апвеллинга (ПСА) в первую очередь определяется прибрежным апвеллингом, который под действием ветра приносит более холодные и богатые питательными веществами подповерхностные воды в эвфотическую зону. Этот апвеллинг частично питается водой из зоны с минимальным содержанием кислорода, расположенной ниже ПСА. Вода в этой зоне имеет особенно высокий уровень питательных веществ из-за реминерализации органического вещества. Когда эта богатая питательными веществами вода поднимается в поверхностный слой, она используется фитопланктоном вместе с растворенным углекислым газом (CO_2) и световой энергией Солнца. Продуктивность можно оценивать по высоким концентрациям хлорофилла-а (Chl a) на поверхности (рисунок 1.6). Фитопланктон, в свою очередь, служит источником пищи для других компонентов морской пищевой

сети, включая зоопланктон и рыбу, что делает регион исключительно продуктивным [47].

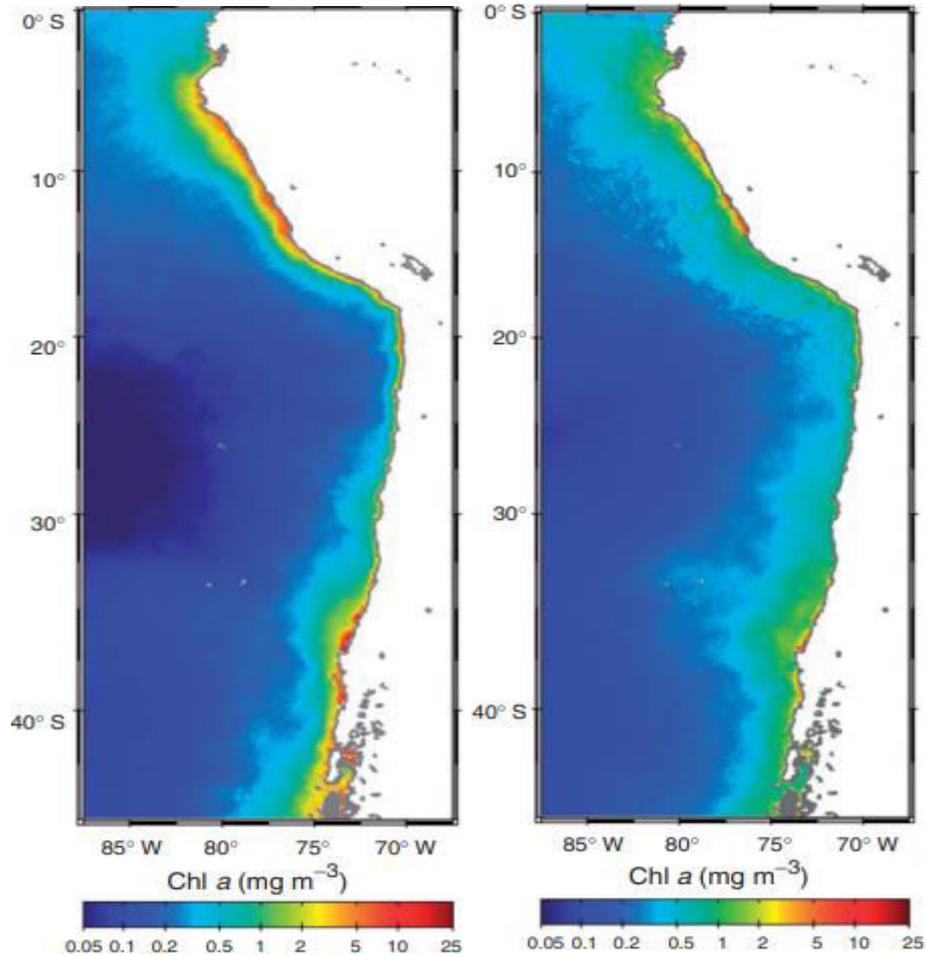


Рисунок 1.6 – Концентрация хлорофилла-а на поверхности (SeaWiFS/MODIS) для южного лета (слева) и южной зимы (справа) [47].

Повышенная биомасса фитопланктона, являющаяся результатом оплодотворяющего эффекта апвеллинга, очевидна в прибрежной зоне у Перу и южного Чили (к югу примерно от 30° ю.ш.). Для обоих регионов временные колебания температуры морской поверхности у берега и концентрации хлорофилла-а синхронизированы, что указывает на то, что ветры, благоприятствующие апвеллингу, являются основным фактором продуктивности в этих районах. Поддержание продуктивности объясняется не только локальной интенсивностью апвеллинга, но и поставкой богатых питательными веществами вод в регион через PCUC. Шельф в этих регионах особенно широк (рисунок 1.7,

справа), и PCUC расширяется, способствуя вовлечению богатых питательными веществами вод в эвфотическую зону на более обширной территории. Напротив, апвеллинг слабее в северном регионе Чили, а отсутствие шельфа делает поставку питательных веществ в эвфотическую зону менее эффективной, что приводит к снижению продуктивности [48].

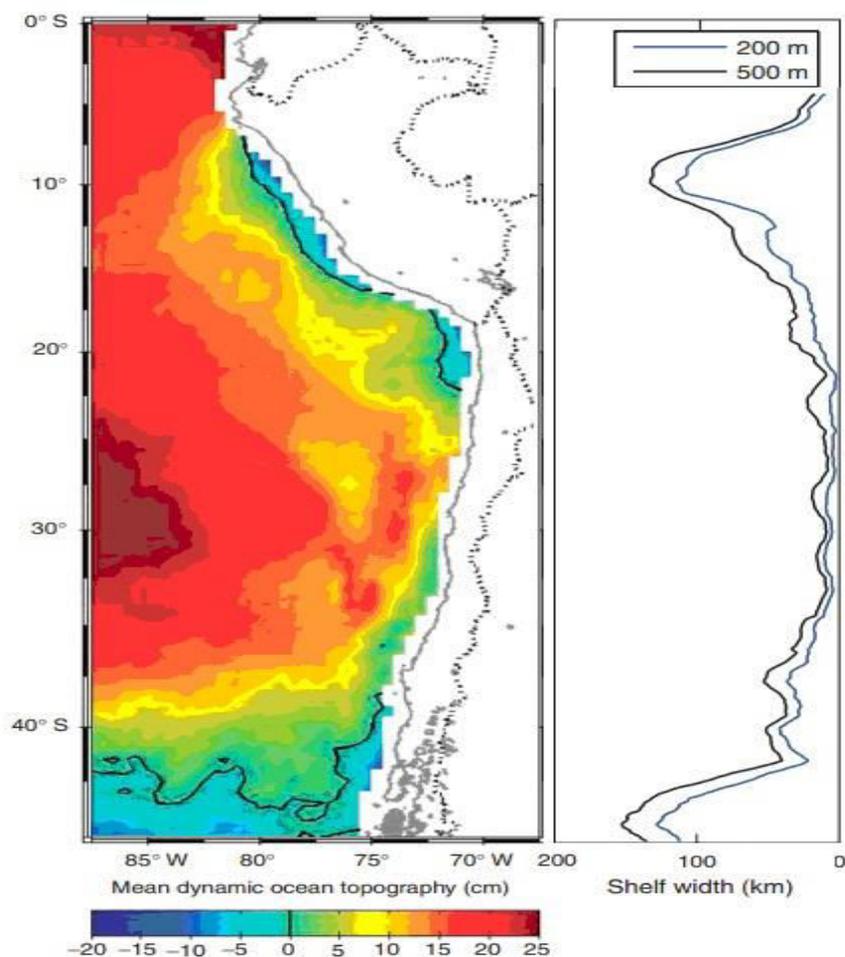


Рисунок 1.7 – Слева: абсолютная высота поверхности моря (на основе совместного анализа данных дрейфера, данных спутникового альтиметра, данных о ветре и модельного геоида). Справа: ширина шельфа с глубиной менее 200 м (синий) и менее 500 м (черный). Черная пунктирная линия обозначает политические границы [35].

Изменчивость концентрации хлорофилла а (Chl-a) в прибрежных районах не коррелирует с изменчивостью в океанической зоне. Причина этого явления до конца не выяснена, но потенциальные механизмы включают различия во времени пиков поступления питательных веществ и влияние фотоадаптации к сезонным изменениям условий освещенности. В период апвеллинга воды над обширными континентальными шельфами в северном и центральном Перу, а также к югу от

30° ю.ш. у побережья Чили демонстрируют исключительно высокие концентрации Chl-a, превышающие 20 миллиграммов на кубический метр. В этих условиях в сообществе фитопланктона преобладают диатомовые водоросли. Напротив, над узкими шельфами в южном Перу и северном Чили концентрации хлорофилла ниже, менее 2 мг/м³, и наиболее многочисленными являются более мелкие виды фитопланктона, включая примнезиофиты и цианобактерии. Измерения растворенного железа и эксперименты с добавлением железа у берегов Перу показали, что первичная продуктивность в районах с низким содержанием хлорофилла в Перу ограничена железом [48, 49].

Эта ситуация похожа на ту, которая наблюдается в так называемых регионах с высоким содержанием питательных веществ и низким содержанием хлорофилла (HNLC) (экваториальная восточная часть Тихого океана, северная часть Тихого океана и Южный океан). Таким образом, изменчивость продуктивности ПСА не может быть вызвана только изменениями интенсивности апвеллинга ветров, но также изменениями в доступности железа [48, 50, 51].

Перуанское побережье характеризуется районами высокой продуктивности, которые позволяют развиваться большим популяциям рыб, таких как анчоусы. Холодное течение Гумбольдта содержит фитопланктон и зоопланктон, который инициирует пищевую цепочку рыб и гуано птиц. Феномен Эль-Ниньо оказывает большое влияние на изобилие и доступность рыбных ресурсов на перуанском побережье, особенно пелагических ресурсов. Пищевая ценность анчоусов широко признана; это отличный источник белка и пищи, который помогает бороться с недоеданием у детей и взрослых. Рыболовство, как добывающая деятельность, имеет большое экономическое значение и востребована во всем мире.

Различные исследования показали, что именно температура океанских вод оказывает наиболее важное влияние на развитие морских ресурсов, т. е. на их рост, метаболизм, закономерности миграции из-за сокращения среды обитания, воспроизводство и даже смертность [15, 37, 52, 53]. Одна из первых работ, которая, вероятно, была направлена на моделирование изменений в апвеллинге, признала, что океанографические переменные являются полностью случайными,

определяя некоторые физические параметры, имеющие отношение к распределению промысловых видов [52]. Также заслуживает внимания работа [53], в которой использовалось математическое моделирование для оценки изменений океанографических условий при различных климатических сценариях, а также изучалась связь с планктоном в зоне апвеллинга у побережья Калифорнии и влияние океанографических переменных на такой промысловый ресурс, как анчоус в перуанском промысле.

Что касается модельных работ у берегов Перу, то существует несколько публикаций, в которых океанографические переменные рассматриваются как взаимосвязанные. Например, в работе [1] предлагается совместная модель данных температуры поверхности океана (ТПО или SST), полученных с помощью спутникового зондирования, и приливных аномалий уровня моря для изучения их межгодовой и междесятилетней изменчивости. В работах [37] и [54] выполнялись исследования по моделированию характеристик апвеллинга в разные сезоны года. Кроме того, в [55] и [56] рассматривалось воздействие ветра на поверхностные воды океана. Однако до сих пор пространственная и временная изменчивость важнейшего абиотического фактора формирования рыбопродуктивности в водах перуанского апвеллинга, т. е. температуры поверхностных вод океана, изучена слабо. Именно эту проблему мы и рассмотрим, используя широкий спектр методов одномерного и многомерного статистического анализа. Поскольку для района перуанского апвеллинга отсутствуют данные о SST *in situ* за длительный период времени, единственным способом решения проблемы является использование спутниковой информации о SST, которая определяется с 1979 года с достаточной для практических целей точностью.

Рыболовный сектор является стратегическим для экономики Перу, в основном потому, что он является важным источником дохода после добычи полезных ископаемых. Фактически Перу является лидером по вылову рыбы, производству и экспорту рыбной муки. Перуанская рыболовная деятельность традиционно поддерживается пелагическими морскими рыбными ресурсами, в основном анчоусами (*Engraulis ringens*) [31].

Несмотря на то, что Перу является одной из стран с лучшими показателями рыболовства в мире и страной с лучшими показателями рыболовства в Южной Америке [57], индекс экологической эффективности 2024 показывает, что промысел анчоусов в Перу находится под угрозой из-за повышения температуры океана. В новом докладе Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), опубликованном в июле прошлого года, подчеркивается, что высокие выбросы CO₂ представляют значительные риски для основных стран-производителей рыбы. Среди них Перу, на долю которого вместе с Китаем, Индией, Индонезией, США, Россией и Вьетнамом приходится почти 60 % мирового производства рыболовства и аквакультуры. В докладе ФАО подчеркивается, что если текущие тенденции высоких выбросов сохранятся, что приведет к глобальному потеплению на 3–4,0 °С к концу столетия, биомасса рыбы может сократиться на 37,3 % в исключительной экономической зоне Перу. Поэтому создание математической модели могло бы лучше понять влияние окружающей среды на рыболовство, а затем с её помощью можно было бы прогнозировать различные экологические условия.

1.3. Анчоус как основная рыба системы апвеллинга

Анчо́усы ([лат.](#) *Engraulis*) — род пелагических морских рыб из семейства анчоусовых (Engraulidae). К роду анчоусов относят 9 видов. Анчоусы имеют достаточно широкое распространение в различных акваториях океана в умеренных зонах, расположенных между тропиками и полярными кругами. Наиболее известными районами его местообитания являются [58]:

- Калифорнийское течение, простирающееся от Нижней Калифорнии до Британской Колумбии на северо-востоке Тихого океана (*Engraulis mordax*).
- Течение Гумбольдта, простирающееся от северного Перу до южного Чили на юго-востоке Тихого океана (*Engraulis ringens*).

- Южноафриканские воды (*Engraulis capensis*).
- Западная часть Тихого океана в Японии, Тайване и восточном Китае (*Engraulis japonicus*).
- Австралийские воды (*Engraulis australis*) и районы северо-восточной Атлантики.
- Закрытые бассейны, такие как Черное море и Средиземное море (*Engraulis encrasicolus*), которое является высоко олиготрофным.

Однако самым распространенным видом является *Engraulis ringens* JENYNS, 1842 — перуанский анчоус (рисунок 1.8). Как было указано выше, на долю перуанского анчоуса приходится более 90 % его мирового улова (рисунок 1.1) и примерно такая же его доля (около 90 %) приходится на суммарный вылов всех видов рыб в области ПА. Все анчоусы обитают в некотором удалении от берегов, никогда не выходя в открытый океан и встречаются при температуре воды от 6 до 22 °С. При этом совершают суточные (вертикальные) и сезонные миграции. Максимальная длина анчоусов не превышает 20 см, но численность этих стайных рыб очень велика.



Рисунок 1.8 – Перуанский анчоус.

Все анчоусы — планктофаги, при этом они имеют большое значение в морских трофических цепях и служат пищей для хищных рыб, дельфинов,

кальмаров и морских птиц [59, 60]. Плодовитость: 20—30 тыс. икринок, предполагаемая продолжительность его жизни составляет 3 года [61]. Перуанский анчоус гетеросексуален, не имеет внешних вторичных признаков, и случаи гермафродитизма не известны. Он достигает половой зрелости при длине 12 см и размножается, производя икру, которую оплодотворяет самец в воде, а эмбрион развивается вне тела самки [62]. Согласно [63], репродуктивную стратегию самок анчоуса можно классифицировать как итеропарную. Это означает, что они размножаются несколько раз в течение своей жизни [64]. У них также асинхронное развитие ооцитов, неопределенная плодовитость и частичный нерест, как описано в [65].

Рассматриваемый вид *Engraulis ringens* распространен вдоль юго-восточной части Тихого океана от 04°00' ю.ш. до 42°30' ю.ш. При этом он встречается в виде трех рыбных запасов или популяционных единиц [58, 66], два из которых обнаружены около перуанского побережья (рисунок 1.9):

- 1) Североцентральный перуанский рыбный запас (распространен от 3° ю.ш. до 16° ю.ш.);
- 2) Южноперуанский-северочилийский рыбный запас (распространен от 16° ю.ш. до 24° ю.ш.);
- 3) Центральноюжный чилийский рыбный запас (распространен от 30° ю.ш. до 35° ю.ш.).

Из указанных рыбных запасов самую высокую биологическую и промысловую продуктивность имеет североцентральный перуанский запас. Предполагается, что эти три промысла соответствуют трем дискретным запасам [67, 68], хотя вопрос идентичности запасов все еще обсуждается [69, 70].

Анчоус обычно наблюдается на расстоянии до 80 морских миль от береговой линии. Однако это пространственное распределение сильно изменчиво вследствие его чувствительности к изменениям океанографических условий [70, 71]. Межгодовые колебания, связанные с явлением Эль-Ниньо, являются одним из основных факторов, влияющих на распределение и биомассу анчоуса [29] из-за изменений по глубине термоклина, как это наблюдается у тунца [72—74].

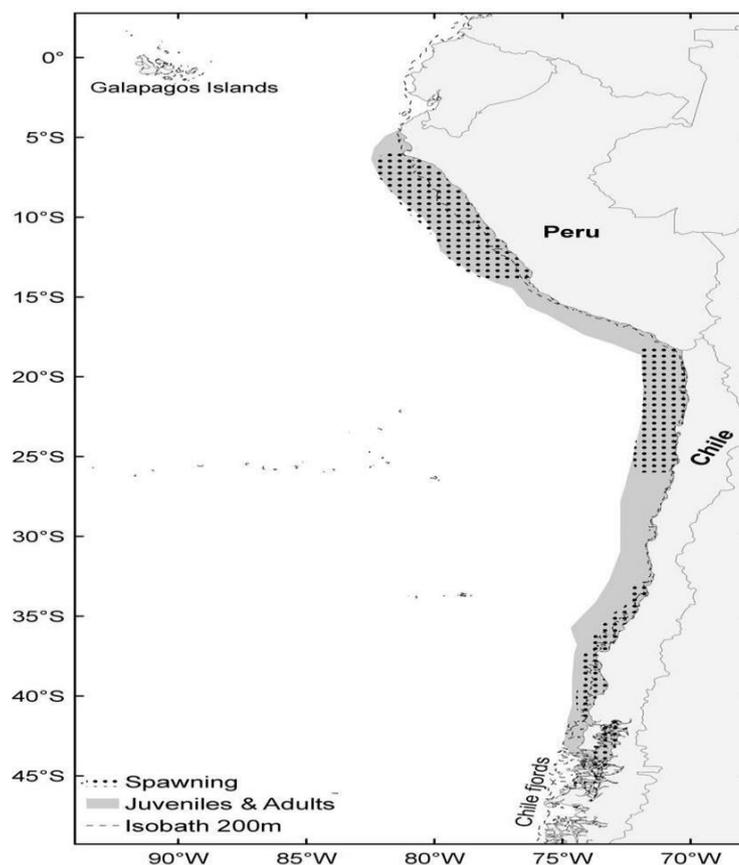


Рисунок 1.9 – Схема ареалов трех промыслов анчоуса (*Engraulis ringens*) в системе течения Гумбольдта: промысел североцентрального Перу, промысел южного Перу – северного Чили и промысел центральноюжного Чили [58].

Таким образом, место обитания анчоуса ограничено холодными морскими водными массами вдоль береговых линий, которые отличаются высокой биологической продуктивностью и значительной биомассой планктона. Эти три популяции анчоуса заметно различаются по нерестилищам и репродуктивным сезонам, которые подробно описаны ниже (таблица 1.1).

С 15 февраля по 9 апреля 2022 года Перуанский морской институт (Instituto del Mar del Perú – IMARPE) провел так называемый «научно-исследовательский круиз», в котором приняли участие 10 перуанских судов. Каждое из них использовало гидроакустические методы для оценки различных пелагических ресурсов в районе перуанского апвеллинга. В отчете по результатам экспедиции говорится, что общий улов пелагических рыб составил 846 053,6 кг, из которых преобладающим видом был анчоус, доля которого составила 67,9 % от общего количества рыб [78].

В этом же отчёте приводятся некоторые оценки доступной биомассы, в которой выделяется анчоус с общим запасом в 10,20 млн. тонн, из которых 9,78 млн. тонн приходится на регион, называемый «североцентральный запас». Биомасса других видов, таких как ставрида и скумбрия, была рассчитана в различных изолированных районах с биомассами 357 433 и 241 010 тонн. соответственно.

На рисунке 1.10 показано распределение биомассы анчоуса в районе перуанского апвеллинга в меридиональном направлении от 3° ю. ш. до 18° ю. ш. Нетрудно видеть, что максимальная биомасса анчоуса наблюдается между 8° ю. ш. и 9° ю. ш. К югу и северу от этого района биомасса резко уменьшается.

Таблица 1.1 – Характеристика нерестилищ и репродуктивных сезонов северной, центральной и южной популяций вида *Engraulis ringens* в юго-восточной части Тихого океана

Рыбный запас	Период нереста	Место нереста	Характеристики нерестилищ
Североцентральный перуанский рыбный запас	Существует два сезона нереста: основной — в южную зиму (август–октябрь), а вторичный — в южную летнюю пору (январь–март) [58]	Значимые места нереста расположены между 6° S и 14° S у северных и центральных районов перуанского побережья в радиусе 80 миль. Они характеризуются концентрацией икры, превышающей 4000 икринок/м ² [75, 76].	Размножение идет на континентальном шельфе, на глубине до 100 метров. Нерест происходит в широком диапазоне температур от 14 °C до 21 °C. Эти воды характеризуются интенсивным апвеллингом и высокой первичной продуктивностью [58].
Южноперуанский-северочилийский рыбный запас	Пик его репродуктивной активности приходится на период с июля по декабрь, а летом он демонстрирует пониженную активность [77].	Район нереста простирается от самой южной точки Перу до Мехильонеса, который находится на 23° ю.ш. [77]	Размножение идет на континентальном шельфе, на глубине до 100 метров. Нерест происходит в широком диапазоне температур от 14 °C до 21 °C. Эти воды характеризуются интенсивным апвеллингом и высокой первичной продуктивностью [58]

Центральноюжный чилийский рыбный запас	Пик его репродуктивной активности приходится на период с июля по декабрь, а летом он демонстрирует пониженную активность [77].	Нерестится к югу от Талькауано между Пуэрто-Сааведра и Корралом [77]. Нерест идет между 42° S и 47° S во фьордах южного Чили. Этим районам свойственны стратифицированные воды, что способствует росту и выживанию личинок [58].	Район нереста с сезонным апвеллингом и холодными водами (11–12 °C) является благоприятной средой для выживания мальков. Отсутствие хищников и доступность пищи для личинок способствуют их успешному развитию [58].
--	--	--	---

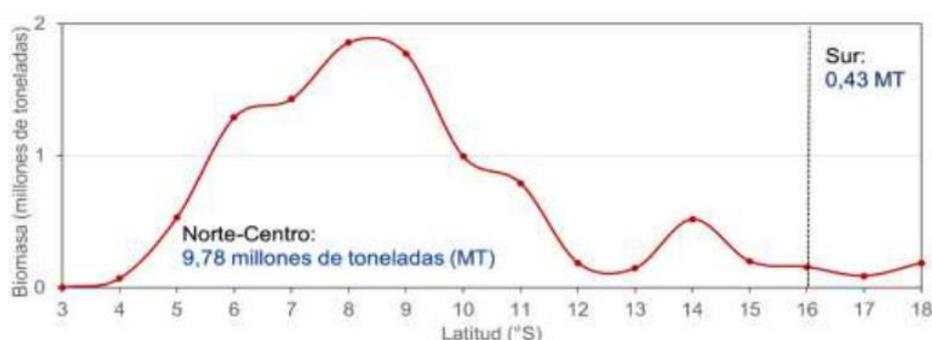


Рисунок 1.10 – Распределение биомассы анчоуса в районе перуанского апвеллинга в меридиональном направлении от 3° ю.ш. до 18° ю.ш. [78].

В результате экспедиции выявлена размерная структура анчоуса в зависимости от расстояния от берега (м. миль) и по широте при лове тралом и кошельковым неводом [78]. Было выявлено, что существует определенная зависимость распределения анчоусов от расстояния от берега. При этом молодые особи располагаются на меньшем расстоянии: например, с февраля по апрель 2022 года они регистрировались на расстоянии менее 50 морских миль, тогда как в июне и августе 2023 года район наибольшего присутствия молоди был зафиксирован ближе к 50 морским милям. Кроме того, имеются также свидетельства того, что широта является важным фактором в распределении молоди анчоусов, причем молодь в основном присутствует в районе ниже 11° ю.ш. [78, 79].

Как упоминалось ранее, ПА поддерживает один из самых продуктивных промыслов в мире. Существует достаточно доказательств изменений климата,

которые могут повлиять на рыбопродуктивность в этом регионе, например, межгодовая и десятилетняя изменчивость, которые существенно влияют на регион. В частности, очевидно влияние явления Эль-Ниньо-Южное Колебание (ENSO) на систему Перуанского апвеллинга и анчоусы, которое будет специально рассмотрено в разделе 3.3.

2. Исходные данные и статистические методы, используемые в работе

2.1 Характеристика исходных данных

Температура поверхности океана.

Начальные данные о температуре поверхности океана (ТПО) были взяты из 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>). Документация архива приводится в работе [80]. Профиль температуры ассимилируется по схеме 3DVAR. Ежемесячные данные по ТПО представлены с января 1980 г. по настоящее время, причем обновление их выполняется ежемесячно. Пространственная область простирается от 75° ю. ш. до 65° с. ш. и 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. [1]. Всего в районе Перуанского апвеллинга было выбрано 216 точек сетки (рисунок 2.1). Из базы данных GODAS взяты среднемесячные значения ТПО за период 1980–2021 гг., на основе которых в ходе данного исследования рассчитывались среднегодовые значения ТПО.

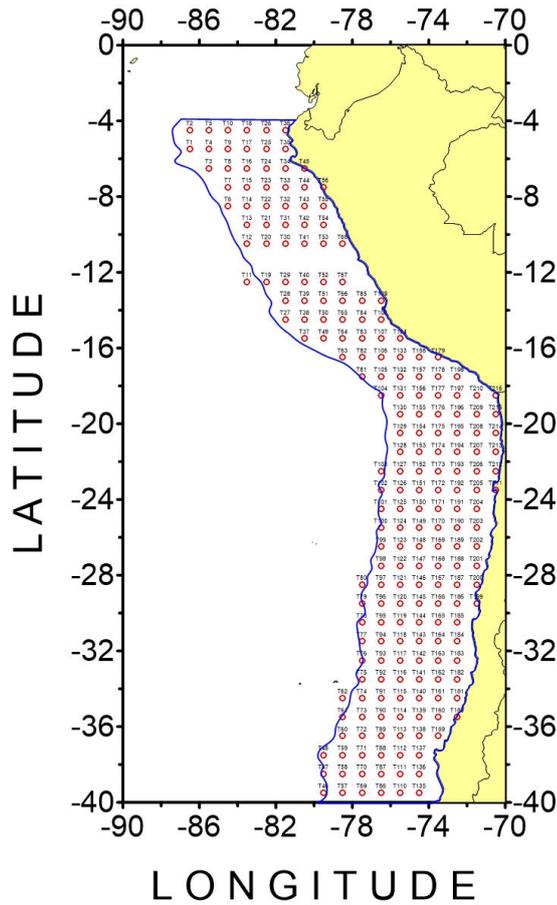


Рисунок 2.1 – Схематическая диаграмма области Перуанского апвеллинга, состоящая из 216 точек сетки, которые использовались в данной работе и определенных по базе данных GODAS.

Ветер в приводном слое атмосферы.

Данные по ветру необходимы для определения по теории Экмана глубины трения и интегрального индекса апвеллинга. Зональная и меридиональная составляющие ветра в поверхностном слое океана выбирались из известного архива реанализа NCEP/DOE AMIP-II (Reanalysis-2) (https://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ncerp2_mon.php) [81], который с 1979 года является естественным продолжением архива NCEP Reanalysis-1 [82]. В этих архивах используется комбинированный подход к усвоению всех типов исходной информации, но основным является спутниковое зондирование. Архив R-2 охватывает период наблюдений с 1979 года по настоящее время с использованием обновленных моделей прогнозирования и усвоения данных. Пространственная область реализации модели простирается от $88,5^{\circ}$ ю.ш. до $88,5^{\circ}$ с.ш. и имеет разрешение $1,8^{\circ} \times 1,8^{\circ}$ [82]. Для области перуанского апвеллинга в границах от 4°

до 40° ю.ш. в узлах сетки выделено 73 точки (рисунок 2.2). Для этих точек из этого архива были отобраны среднемесячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период 1980—2020 гг.

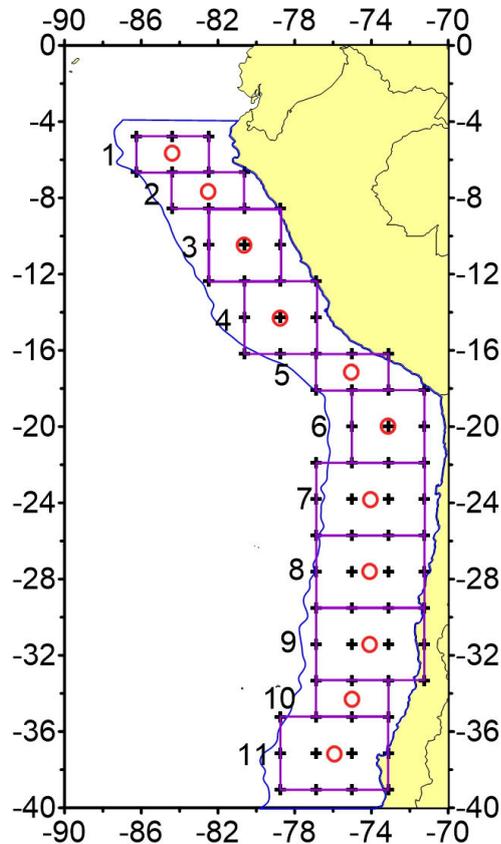


Рисунок 2.2 – Схема области Перуанского апвеллинга. Крестиками обозначены составляющие скорости ветра в приводном слое. Индекс апвеллинга рассчитывался для выделенных прямоугольных районов [83]. Кружками показаны центры районов, в которых значения ТПО использовались в статистических моделях для выделенных районов.

Данные по биомассе анчоусов.

Оценить биомассу популяции анчоусов крайне сложно вследствие его огромной распространенности в системе ПА. Поэтому в качестве косвенного показателя биомассы анчоуса обычно используются оценки улова на единицу рыболовного усилия (CPUE, Catch Per Unit Effort) [84]. CPUE измеряется как улов (в тоннах) за рейс, деленный на вместимость трюма (m^3), который затем делится на продолжительность рейса (эффективное усилие, выраженное в часах). CPUE за сезон промысла оценивается как среднее значение CPUE за рейсы, наблюдаемые в каждом сезоне промысла. В течение года существует два сезона вылова анчоуса

из североцентрального стада. Первый сезон вылова приходится на месяцы с апреля по июль, а второй сезон — на период с ноября по январь следующего года. В связи с этим годовых или ежемесячных оценок CPUE не существует. Однако суммарный (или средний) вылов анчоуса за 2 сезона дает приближенную характеристику годового CPUE.

Систематический мониторинг CPUE проводится Перуанским морским институтом (IMARPE, Instituto del Mar del Perú на испанском языке). В нашей работе использовался период 1996—2020 гг. Статистические характеристики значений CPUE приводятся в таблице 2.1. Как видно из этой таблицы, в среднем вылов анчоуса практически одинаков внутри года. Однако его межгодовая изменчивость очень значительна, амплитуда колебаний превосходит средние значения. Тренды отсутствуют.

Таблица 2.1 – Статистические характеристики значений CPUE (показателя биомассы анчоуса) за период 1996—2020 гг.

Период	$X_{ср}$, тонн/м ³ ×час	A , тонн/м ³ ×час	C (%)	Tr , тонн/м ³ ×час×год	R^2
Апрель-июль	0,029	0,032	27,4	$2,18 \times 10^{-4}$	0,044
Ноябрь-январь	0,025	0,030	30,8	$8,49 \times 10^{-6}$	0
Средний за год	0,027	0,034	29,5	$5,48 \times 10^{-5}$	0,010

2.2. Методы многомерного статистического анализа, используемые в работе

2.2.1. Множественная линейная регрессия (МЛР)

Наиболее широко используемым в гидрометеорологии аппаратом построения прогностической модели между физически установленными предикторами и предиктантом является метод множественной линейной регрессии, который считается классическим методом анализа данных. Данный метод хорошо разработан теоретически, универсален, прост и доступен, так как входит практически во все пакеты прикладных статистических программ

(ППСП). Поскольку его описание содержится во многих работах [85—92], то рассмотрим только те аспекты, которые непосредственно связаны с задачей построения прогностических моделей. Известно, что зависимости между характеристиками природной среды носят, как правило, многофакторный характер, т.е. когда рассматриваемая переменная зависит от многих других переменных. Это полностью соответствует сути множественной линейной регрессии (МЛР), основной задачей которой как раз является построение линейной модели взаимосвязи зависимой переменной с объясняющими (независимыми) переменными. В общем виде модель МЛР можно представить в следующем виде:

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j x_{ij} + \varepsilon_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_m x_{im} + \varepsilon_i, \quad (2.1)$$

где b_j – коэффициенты регрессии, m – число независимых переменных ε_i – вектор остатков (ошибок), которые не описываются уравнением регрессии. Отметим, что уравнение (2.1) можно интерпретировать как некую условную гиперплоскость в $(m + 1)$ -мерном пространстве, которая обладает тем свойством, что сумма квадратов отклонений точек $(y_i, x_{ij}, \dots, x_{im})$ от нее меньше, чем до любой другой поверхности.

Основные предположения, накладываемые на регрессионную модель, состоят в следующем:

- 1) ошибки (остатки) модели МЛР должны иметь нулевое среднее значение ($\bar{\varepsilon} = 0$);
- 2) дисперсия остатков должна быть постоянной ($\sigma^2_{\varepsilon} = \text{const}$), т.е. выполняется условие гомоскедастичности регрессионных остатков;
- 3) ошибки должны быть независимы (некоррелированы) по отношению к факторам и функции отклика;
- 4) исходные факторы x_1, x_2, \dots, x_m являются неслучайными переменными;
- 5) ранг матрицы исходных данных X должен быть максимальным, но при этом меньше n , т.е. $\text{rank}X = (m + 1) < n$;
- 6) желательно, но не обязательно, нормальное распределение остатков.

Первые три предположения являются необходимыми условиями использования метода наименьших квадратов. Обсуждая пятое условие, прежде всего, напомним, что *ранг матрицы* может быть определен как наибольший порядок ее отличного от нуля минора, который совпадает с максимальным числом линейно независимых столбцов. Если требование к рангу матрицы X не выполняется, то возникает линейная зависимость хотя бы между двумя столбцами. В результате происходит вырождение матрицы $X'X$ и, следовательно, её детерминант (главный определитель) становится равным нулю, т.е. $\det(X'X) = 0$, что приводит к возникновению проблемы мультиколлинеарности. Данная проблема возникает сравнительно редко и легко решается удалением одной из коррелирующих переменных.

При выполнении указанных предположений коэффициенты регрессии определяются классическим методом наименьших квадратов. Оценивание параметров модели МЛР (рисунок 2.3) можно представить в виде четырех блоков. Блок качества модели состоит из коэффициента детерминации R^2 , коэффициента множественной линейной корреляции R , скорректированного коэффициента множественной линейной корреляции $R_{ск}$. Блок точности модели включает среднеквадратические ошибки параметров, критерии Стьюдента и Фишера. Следующие два блока состоят из параметра частной корреляции и анализа остатков. Подробное описание оценивания параметров модели МЛР дается в работе [86].

Отметим наличие структурных противоречий между блоками качества и точности моделей. При неизменном объеме выборки с включением в модель новой переменной повышается качество описания функции отклика (R^2), но при этом ухудшается точность всех параметров модели, связанных с тем, что в знаменателе соответствующих формул находится выражение $n-k-1$. Особенно значительными ошибки параметров становятся, когда разность $n-k$ является малой.

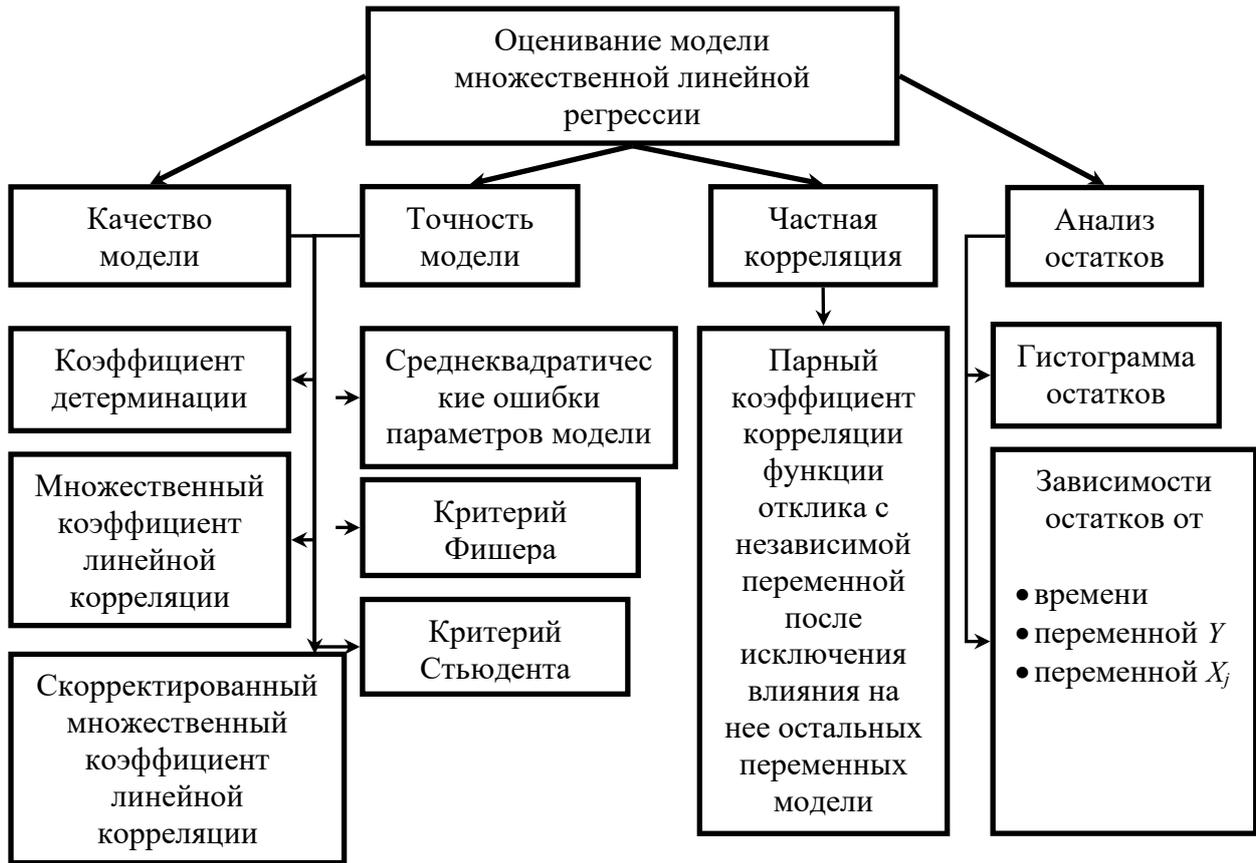


Рисунок 2.3 – Оценивание модели множественной линейной регрессии [86]

Как известно, в действительности гидрометеорологические переменные зачастую скоррелированы друг с другом. Поэтому при включении в набор нового предиктора может оказаться, что его дисперсия будет полностью описана уже имеющимся набором из k переменных. В результате частный коэффициент корреляции нового предиктора с предиктантом будет равен нулю и, как следствие, $R_{k+1} = R_k$. При этом повышается уровень мультиколлинеарности модели и, следовательно, ухудшается ее точность. Таким образом, добавление новой переменной может даже усилить отмеченное выше противоречие. Итак, из сказанного вытекает очевидный вывод о необходимости построения оптимальных в смысле критериев точности регрессионных моделей и детального оценивания параметров моделей на всех ее этапах [86].

Пошаговые методы построения оптимальной модели МЛР.

В общем случае построение оптимальной модели можно рассматривать как задачу выбора некоторой системы эффективных предикторов, обеспечивающих максимальную точность модели МЛР с минимально возможными погрешностями ее параметров. Следует иметь в виду, что каким бы способом не проводился отбор эффективных (существенных) предикторов, обусловленность матрицы $X'X$ при этом улучшается с уменьшением числа переменных, включаемых в модель. В настоящее время наиболее эффективным методом решения данной задачи, особенно при большом числе предикторов, считаются пошаговые процедуры, которые в широком смысле включают в себя несколько различных алгоритмов, причем во многих пакетах прикладных статистических программ реализованы:

Соответствие исходных данных указанным требованиям является важным условием построения оптимальных моделей МЛР. В общем случае построение такой модели можно рассматривать как задачу выбора некоторой системы эффективных предикторов, обеспечивающих максимальную точность модели МЛР с минимально возможными погрешностями ее параметров. Следует иметь в виду, что каким бы способом не проводился отбор эффективных (существенных) предикторов, обусловленность матрицы $X'X$ при этом улучшается с уменьшением числа переменных, включаемых в модель. Впрочем, процедура отбора наиболее существенных переменных имеет самостоятельное значение и может рассматриваться как процесс выбора размерности линейной модели. В настоящее время наиболее эффективным методом решения данной задачи, особенно при большом числе предикторов, считаются пошаговые процедуры, которые в широком смысле включают в себя несколько различных алгоритмов, причем во многих пакетах прикладных статистических программ реализованы:

- метод включения переменных;
- метод исключения переменных;

Суть *метода включения переменных* заключается в том, что вначале на первом шаге выбирается наиболее коррелированный с функцией отклика предиктор и рассчитываются все параметры модели парной регрессии, т.е. $Y = f(X_1)$. После этого вычисляются, например, частные коэффициенты

корреляции для оставшихся $m-1$ предикторов, которые показывают «чистый» вклад каждой переменной в дисперсию функции отклика. Таким образом, выбирается вторая переменная, имеющая максимальный частный коэффициент корреляции и строится новая модель $Y = f(X_1, X_2)$. Данная процедура может повторяться до тех пор, пока не будут построены все m моделей, т.е. $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$. Метод исключения переменных реализует обратную процедуру.

Наиболее принципиальным моментом является выбор наилучшей или, другими словами, оптимальной в некотором смысле модели [86]. В пакеты прикладных статистических программ (ППСП) (Statistica, Statgraphics и др.) этот вопрос решается с помощью *частного F-критерия*, который представляет собой обычный F -критерий для каждой переменной при условии, что она оказывается последней переменной, включенной в модель регрессии. Частный F -критерий связан с коэффициентом частной корреляции следующим соотношением:

$$F_k = \frac{\rho_{yxj}^2 (n - k - 2)}{1 - \rho_{yxj}^2}. \quad (2.2)$$

Здесь k – число переменных, уже включенных в модель ($k \leq m$) с учетом последней переменной X_j , для которой и рассчитывается частный коэффициент корреляции ρ_{yxj} . На каждом шаге выполняется проверка адекватности (значимости) модели и сравнение с некоторым пороговым (критическим) значением $F_{кр}$. Величина $F_{кр}$ может быть задана самим исследователем. По умолчанию она обычно принимается в ППСП $F_{кр} = 4.0$. Как только величина F_k становится меньше $F_{кр}$, программа прекращает работу и последний шаг принимается за оптимальную модель регрессии. Заметим, однако, что при этом не все коэффициенты регрессии могут быть значимыми.

Поэтому можно предложить более общую схему оценки оптимальности модели [86]. Вначале рассчитывается полный комплекс (от 1 до m) моделей. После этого выполняется детальный анализ основных параметров моделей на каждом шаге (коэффициент детерминации, стандартная ошибка модели, критерий Фишера, p -level коэффициентов регрессии). Комплексный анализ полученных моделей

может позволить надежно определить, на каком шаге она достигает оптимального вида. При этом полезным представляется графический анализ параметров модели, когда ось абсцисс соответствует шагам модели, а по оси ординат откладываются указанные выше параметры модели.

Частным случаем МЛР является парная регрессия, которая использовалась в работе для расчета и анализа линейных трендов. Основными параметрами ее являются величина тренда (Tr), которая представляет угловой коэффициент регрессии (a_1) и коэффициент детерминации R^2 , описывающий часть дисперсии исходного ряда, приходящейся на тренд. В соответствии с критерием Стьюдента при $\alpha = 0,05$ получим приближенное критическое значение $R_{кр}^2 \approx 4/(n+2)$, где n – длина выборки [86]. При $R^2 > R_{кр}^2$ тренд считается значимым, т. е. отклоняющимся от нуля не случайным образом.

2.2.2. Факторный анализ

Целью факторного анализа (ФА) является выделение среди большого числа наблюдаемых переменных гипотетических величин, содержательно интерпретируемых и по возможности наиболее просто объясняющих совокупность изучаемых переменных. Другими словами, *конечной целью факторного анализа является получение содержательно интерпретируемых факторов*. Этим он отличается от метода главных компонент (МГК), в котором осуществляется формальное разложение исходной матрицы по дисперсии переменных.

Модели ФА применяются при решении следующих задач:

- понижение размерности признакового пространства в данных типа “объект-признак”,
- классификация объектов в признаковом пространстве общих факторов,

- косвенные оценки признаков, не поддающихся непосредственному измерению,
- преобразование исходных переменных к более удобному для интерпретации виду,
- создание структурной теории исследования объектов.

В общем случае методы факторного анализа можно разбить на две группы: упрощенные и современные аппроксимирующие. Классификация методов факторного анализа представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Классификация методов факторного анализа [93].

В настоящее время простые методы имеют в основном исторический интерес и почти не используются. Из указанных на рисунке 2.4 современных аппроксимирующих методов, наиболее сложным и, по мнению многих исследователей, наиболее точным является метод максимального правдоподобия. Однако наиболее часто используется метод главных факторов (более 90 % случаев), который входит почти во все пакеты прикладных статистических программ (ППСП). Основой его служит МГК, который позволяет получить первоначальные факторные нагрузки в m -мерном пространстве признаков. После этого осуществляется переход из m -мерного пространства в k -мерное

пространство общих факторов, вследствие чего удаляются те оси, вдоль которых наблюдаемая изменчивость не выходит за рамки принятых ошибок.

Огромный вклад в развитие теории ФА внес американский психолог и математик Тэрстоун. Теоретические основы ФА им были заложены в 1930-40-е гг. Он дал не только общую вычислительную схему, но и предложил много конструктивных идей, развитие которых продолжается до настоящего времени. Так, Тэрстоун доказал основную факторную теорему, предложил центроидный метод определения факторов, методику оценки общности, сформировал принцип простой структуры и способы упрощения факторов [94]. Кроме того, значительный вклад в развитие и описание методов ФА внесли [93, 95—98]. В настоящее время методы ФА получили довольно широкое распространение в различных областях науки, в том числе в океанологии [15, 16, 91 и др].

Идеология ФА базируется на предположении о том, что регистрируемые в природе характеристики не являются сами по себе причиной происходящих изменений. Они скорее представляют собой следствие действия разнообразных внешних и внутренних сил, скрытых от наблюдателя за сложной динамикой взаимосвязи наблюдаемых явлений. В общем случае каждая из влияющих сил, очевидно, может, воздействовать сразу более чем на одну переменную. И хотя переменные неодинаково реагируют на внешнее воздействие, их взаимная коррелированность указывает на существование неких общих для них факторов, вызывающих их изменения. В общем случае в ФА происходит разделение каждой переменной на отдельные части согласно схеме на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Виды дисперсий переменной X_j в факторном анализе [16].

Изначально дисперсия переменной представляется в виде общности, специфичности и ненадежности. *Общность* – это та часть постоянной дисперсии переменной, которая связана с другими переменными и является общей для ряда переменных, т.е. служит отражением действия общего фактора. *Специфичная* дисперсия состоит из той части постоянной дисперсии, которая не связана с другими переменными и присуща лишь одной определенной переменной. Дисперсия, вызванная ошибками измерений и расчетов (*ненадежность*), носит случайный характер и обусловлена суммой действий разнообразных причин, не поддающихся учету. Две первые компоненты дисперсии j -ой переменной образуют так называемую *надежную* дисперсию, показателем которой служит коэффициент надежности. Нахождение общности – одна из главных задач ФА. Поскольку раздельный учет специфичности и ненадежности весьма сложен и не представляет для исследователя какого-либо интереса, эти величины объединяются вместе и их сумма называется дисперсией *характерности*, которая может трактоваться как дополнение общности до единицы [99].

С учетом вышеприведенных соображений корреляционной матрицу размером $m \times m$ можно представить в виде:

$$\sum_{j=1}^m (u_j^2 + h_j^2) = m, \quad (2.3)$$

т.е. порядок корреляционной матрицы m равен сумме общности h_j^2 и характерности u_j^2 отдельных переменных. Найденные тем или иным способом оценки общностей подставляются на главную диагональ корреляционной матрицы вместо единиц, т.е. $h_j^2 = 1 - u_j^2$. В результате получаем редуцированную корреляционную матрицу R^h .

По сравнению с МГК, представляющим собой математический метод и не требующим в явном виде предварительных статистических гипотез, факторный анализ уже изначально является статистическим методом. В матричном виде основное уравнение ФА имеет вид:

$$Z = A'F + E, \quad (2.4)$$

где Z – матрица исходных стандартизованных данных ($m \times n$); A' – матрица коэффициентов связи общих факторов с исходными переменными (матрица факторного отображения) размером $k \times m$, F – матрица общих факторов размером $k \times n$; E – матрица характерных факторов (остатков) размером $k \times n$.

Условия, накладываемые на факторную модель (2.4), сводятся к следующему:

- общие факторы должны быть взаимно независимы;
- общие факторы должны быть нормированы и приведены к единичной длине;
- общие факторы не должны быть коррелированы с ошибками;
- ошибки не должны быть коррелированы друг с другом;
- число общих факторов не должно превышать половины количества наблюдаемых переменных, т.е. $k \leq m/2$.

Последнее условие является принципиально важным, поскольку в этом состоит смысл факторного разложения.

Методы факторного анализа при всем своем многообразии имеют общий алгоритм решения, который состоит из следующих шагов [89]:

Шаг 1. Строится матрица исходных данных X (из m строк и n столбцов).

Шаг 2. Стандартизуются исходные данные (столбцы матрицы) по формуле $z_{ij} = (x_{ij} - x_{cp})/\sigma_j$.

На этом шаге получаем матрицу Z (из m строк и n столбцов).

Шаг 3. Строится стандартная матрица парных корреляций $R = n^{-1}ZZ'$

Шаг 4. Вычисляется редуцированная корреляционная матрица R^h .

Шаг 5. Рассчитываются собственные числа и первоначальные факторные нагрузки для матрицы R^h .

Шаг 6. Выбирается число общих факторов согласно правилу $k < m/2$.

Шаг 7. Рассчитывается матрица окончательного факторного отображения A с помощью второго вращения.

Шаг 8. Рассчитывается матрица общих факторов на основе произведения матриц Z и A .

На рисунке 2.6 приводится структурная схема вычисления общих факторов методом главных факторов, которая наглядно показывает последовательность отдельных операций.

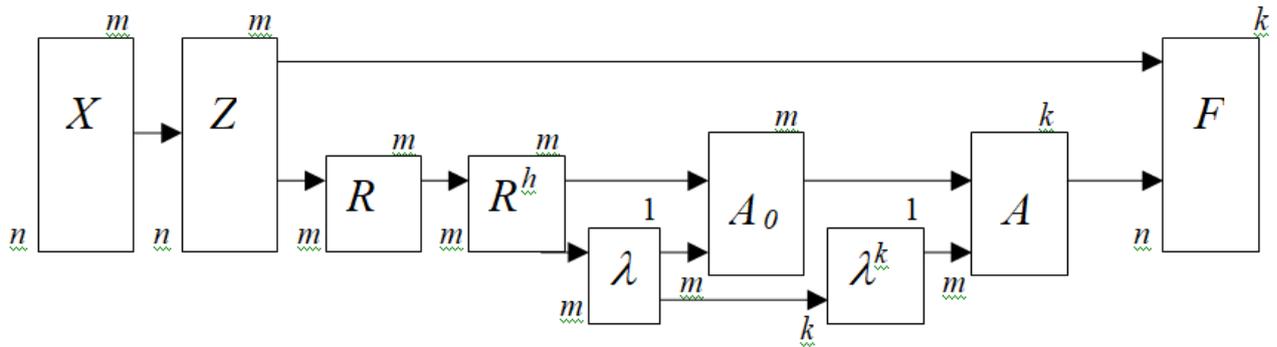


Рисунок 2.6 – Структурная схема расчета общих факторов методом главных факторов [89].

Первые три шага достаточно простые и не требуют дополнительных пояснений. В редуцированной корреляционной матрице R^h осуществляется переход на главной диагонали от единиц к общностям. Только Тэрстоун предложил 12 различных способов. В данной работе для оценки общностей использовался *регрессионный метод*. Суть его состоит в том, что для каждой переменной рассчитывается модель МЛР с остальными $(m-1)$ переменными и полученная величина R^2 подставляется на главную диагональ. Поскольку R^2 показывает объясненную долю дисперсии искомой переменной от переменных, используемых в модели МЛР, то она является общей для рассматриваемой переменной и остального множества, поэтому она может быть принята как общность.

Так как матрица R^h является симметрической положительно определенной матрицей, то она может быть разложена на произведение диагональной матрицы собственных (характеристических) чисел λ порядка m и матрицы первоначального факторного отображения (собственных векторов разложения) A_0 . Это позволяет путем перемножения матриц Z и A получить матрицу главных компонент F . Смысл МГК становится очевиден при геометрической интерпретации метода. При повороте матрицы Z на некоторый угол α против часовой стрелки можно достичь такой ситуации, что ось первой главной

компоненты f_1 , соответствующей наибольшему числу λ_1 , будет описывать максимальную дисперсию матрицы X . При этом вторая ось компоненты f_2 ортогональна первой и описывает максимальное остаточное рассеяние наблюдений. Поэтому последняя компонента f_m будет характеризовать минимальную дисперсию исходной матрицы, зачастую равную нулю.

Однако в результате такого разложения обычно не удается достичь цели ФА – получение содержательно интерпретируемых и в тоже время наиболее просто объясняющих совокупность изучаемых переменных. В связи с этим необходимо выполнить второе вращение, т. е. осуществить переход из m -мерного пространства исходных данных в k -мерное пространство общих факторов. При этом число общих факторов k выбирается непосредственно исследователем согласно указанному выше правилу $k \leq m/2$ или это может быть выполнено программой автоматически по формуле $(m + k) < (m - k)^2$.

После сокращения $m-k$ осей получаем первичные факторные нагрузки в новом факторном пространстве, которые необходимо оптимизировать таким образом, чтобы ряд исходных переменных доминировал над всеми остальными. Это облегчает нахождение физической интерпретации факторов. В настоящее время общепризнанным способом решения данной задачи является предложенный Тэрстоуном принцип простой структуры (simple structure). Цель нахождения простой структуры состоит во вращении осей в новом факторном пространстве таким образом, чтобы максимальное число переменных имело факторную нагрузку близкую к единице только на один общий фактор, а все остальные факторные нагрузки были бы близкими к нулю. Известно достаточно большое число методов нахождения простой структуры. В данной работе использовался ортогональный метод Кайзера «варимакс» [96]. Согласно Кайзеру простота фактора определяется дисперсией квадратов его нагрузок. Если эта дисперсия максимальна, то отдельные его нагрузки близки к нулю или единице, т.е. они описываются наиболее просто и его можно наилучшим образом проинтерпретировать.

Эта дисперсия рассчитывается следующим образом:

$$D(F) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \left(a_{jk}^2 - \bar{a}_{jk}^2 \right)^2, \quad (2.5)$$

где: a_{jk} – элементы матрицы факторных отображений или величины факторных нагрузок; r – число общих факторов (т.е. число осей). Величина дисперсии D максимальна, когда одно из значений квадратов нагрузок равно общности h_j^2 , а все остальные элементы в строке нулевые. Если содержательная интерпретация результатов достигается, то использование ФА считается успешным.

2.2.3. Кластерный анализ

Кластерный анализ (КА) – это совокупность методов и алгоритмов теории распознавания образов, направленных на решение процедуры классификации множества объектов в многомерном пространстве признаков посредством процедуры самообучения. КА относится к числу наиболее интенсивно развивающихся направлений многомерного статистического анализа [100, 101]. В общей постановке задача классификации объектов заключается в том, чтобы всю анализируемую совокупность разбить на сравнительно небольшое, обычно заранее неизвестное число квазиоднородных подмножеств (групп, классов) по признакам их сходства [95, 102]. При этом принципиально важным является понятие однородности. В классическом КА понятие *однородности основывается на том, что геометрическая близость двух или более объектов означает близость их физических состояний, т.е. их сходство*. По сути, физическая близость эквивалентна геометрической близости. Это утверждение можно рассматривать как *основной постулат КА*.

Устойчивое выделение однородных подмножеств возможно при выполнении следующих условий:

1. Получаемые подмножества не будут пересекаться. Отсюда следует, что каждый вектор наблюдений, характеризующийся m признаками, может одновременно принадлежать только одному из выделенных подмножеств.

2. Каждое подмножество не должно быть пустым. Это означает, что возможное количество классов колеблется от $k = 1$, когда все объекты относятся к одному классу, до $k = n$, когда каждый объект образует один класс.

3. Неоднородное распределение объектов в пространстве признаков, т.е. наличие компактных групп точек. В противном случае, при сравнительно однородном распределении точек, классификация теряет смысл.

Эти три условия соответствуют постановке задачи классического кластерного анализа. Действительно, существуют такие алгоритмы КА (например, метод поиска сгущений), которые допускают, чтобы один и тот же объект мог принадлежать двум классам, если находится на границе между ними.

В общем виде задачу классификации можно разделить на следующие этапы:

- ✓ выбор исходной системы признаков;
- ✓ снижение размерности признакового пространства;
- ✓ выбор меры сходства (близости);
- ✓ выбор алгоритма классификации;
- ✓ оценка качества классификации.

Общие сведения об указанных этапах МКА можно найти в работах [102, 103]. Отметим только, что каждый из них несет в себе элементы субъективизма и неопределенности, поэтому любая классификация в конечном счете представляет собой сочетание объективного и субъективного начал.

Следует иметь в виду, что почти любая классификация носит одновременно объективный и субъективный характер, который проявляется практически на каждом этапе, даже при выборе исходной системы признаков. Признаки – набор реально существующих переменных. Исследователь выбирает те из них, которые, по его мнению, наилучшим образом соответствуют решению задачи классификации.

К узловым моментам классификации относится выбор меры сходства, от которого зависит окончательный результат разбиения объектов на однородные группы при заданном алгоритме классификации [100, 101]. Наиболее часто в задачах классификации используются метрические показатели близости, характеризующие расстояние между объектами в геометрическом пространстве признаков и поэтому наилучшим образом отвечающие сущности КА. Наиболее универсальным метрическим показателем является метрика Минковского:

$$d(x_j, x_{j+1}) = \left[\sum_{i=1}^n p_i (x_{i,j} - x_{i,j+1})^b \right]^{1/c} \quad (2.6)$$

где n – число исходных признаков; p_i – вес i -того признака; b и c – параметры, определяемые пользователем, которые могут быть любыми положительными числами. Параметр b ответственен за постепенное взвешивание разностей по отдельным координатам, параметр c ответственен за прогрессивное взвешивание больших расстояний между объектами. Если оба параметра b и c равны двум, а вес признаков является одинаковым и равным $p_i = 1$, то в этом случае имеем *классическую евклидову метрику*:

$$d(x_j, x_{j+1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{i,j} - x_{i,j+1})^2} \quad (2.7)$$

Как видно из формулы (2.7), евклидова метрика показывает геометрическое расстояние между объектами (точками). Именно данная метрика получила максимальное использование при решении задач классификации. В некоторых случаях, когда требуется выполнить классификацию по степени связности (коррелированности) признаков друг с другом, используется *аналог евклидовой метрики*, имеющей вид:

$$d'(x_j, x_{j+1}) = 1 - r \quad (2.8)$$

где r – параметрический коэффициент парной корреляции. Из формулы (2.8) видно, что при $r = 1$ $d' = 0$, т.е. объекты полностью идентичны по характеру колебаний и следовательно, принадлежат одному классу. При $r = 0$ связь между объектами носит случайный характер. Принципиальное отличие евклидовой

метрики от коэффициента корреляции состоит в том, что первая может быть рассчитана практически для любой величины n , включая $n = 1$, и не требует нормальности распределения.

К настоящему времени известно уже несколько сотен различных алгоритмов классификации [101], среди которых встречаются весьма экстравагантные. В этих условиях «классификация» их весьма затруднительна. Тем не менее, большинство алгоритмов можно, вероятно, разделить на три большие группы: вероятностные, иерархические, эвристические [95, 102]. Для решения гидрометеорологических задач наиболее приемлемыми, очевидно, являются алгоритмы двух последних групп. Наибольшее распространение получили эвристические алгоритмы, основанные на выделении в многомерном пространстве компактных групп точек в виде геометрических образов.

К числу наиболее известных и включенным во многие современные пакеты прикладных статистических программ относятся иерархическая классификация и метод k -средних (*k-means*). Суть агломеративной стратегии иерархической классификации состоит в последовательном объединении объектов до тех пор, пока они не объединятся в единую группу. Последовательность объединения легко поддается геометрической интерпретации и может быть представлена в виде графика, связывающего точки в единую сеть, который называется дендрограммой (рисунок 2.7).

Существует довольно много методов иерархического объединения кластеров. В гидрометеорологии наиболее широкое применение получил метод Уорда [15, 91, 104] минимизирующий сумму квадратов расстояния для двух кластеров, формирование которых происходит на каждом шаге. Принципиальное достоинство иерархических алгоритмов состоит в визуализации самого процесса кластеризации.

Название и обоснование метода k -средних были сделаны Мак-Куином в 1967 г. [105]. Метод основан на минимизации суммы квадратов расстояний между каждым элементом исходных данных и центром его кластера. Центр кластера определяется как среднее арифметическое входящих в этот кластер

элементов. Предварительно исследователем исходная совокупность из n объектов разбивается на определенное число классов и k точек в качестве «центров» этих классов. Если же центры классов не заданы, то они отбираются случайным образом самой программой. Эти заданные или случайно отобранные точки принимаются за первоначальные эталоны, т.е. центры кластеров; каждому из них присваивается порядковый номер, который одновременно является и номером кластера.

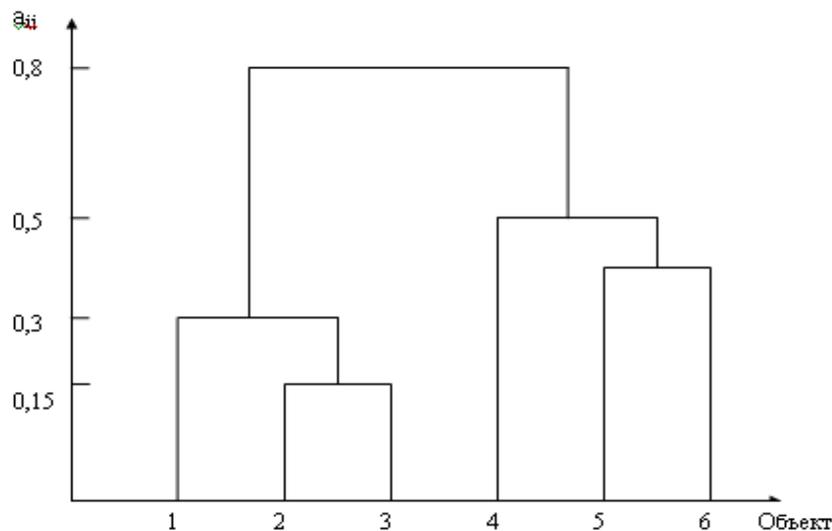


Рисунок 2.7 – Пример дендрограммы. Исходная совокупность из 6 объектов делится на 2 равноправных класса.

На первом шаге из оставшихся $(n-k)$ объектов извлекается любая точка x_j и на основе известной матрицы расстояний строится вектор расстояний от точки x_j до всех эталонов. Данная точка присоединяется к тому эталону, которому соответствует минимальное расстояние до этой точки. Затем этот эталон заменяется новым, пересчитанным с учетом присоединенной точки, и вес его (т.е. число объектов, входящих в данный кластер) увеличивается на единицу. Если встречаются два или более одинаковых расстояния, то x_j присоединяется к центру с наименьшим порядковым номером.

На следующем шаге выбирается новая точка x_{j+1} и для нее повторяется аналогичная процедура. В результате через $(n-k)$ шагов все точки окажутся разнесенными по кластерам, причем рассчитанные центры классов могут уже

сильно отличаться от первоначальных эталонов. Однако процесс кластеризации на этом не заканчивается. Чтобы добиться устойчивости разбиения все точки x_1, x_2, \dots, x_n заново присоединяются к выбранным кластерам, причем веса продолжают накапливаться. Новое разбиение сравнивается с предыдущим. При совпадении числа точек в каждом классе и центров классов работа алгоритма заканчивается, в противном случае продолжается. Доказано, что такой итерационный процесс не может быть бесконечным и быстро сходится.

Нетрудно видеть, что данный метод противоречит одному из постулатов классического кластерного анализа, а именно, что число классов задается заранее, а не ищется в процессе кластеризации. Действительно, на практике мы обычно заранее не знаем какое число классов является оптимальным для заданной матрицы. Впрочем, это противоречие может быть довольно просто преодолено. Для этого достаточно для разных вариантов кластеризации рассчитать, например, средние внутриклассовые ($I_{вр}$) и межклассовые расстояния ($I_{мр}$). Затем определить величину $I_{опт} = I_{мр} - I_{вр}$. Максимальное значение критерия $I_{опт}$ позволит оценить оптимальное число классов для исходной матрицы.

2.2.4. Деревья решений (ДР)

Метод деревьев решений (decision trees) относится к числу наиболее популярных методов Data Mining и может быть использован в практике многих гидрометеорологических задач, в частности задач классификации и прогнозирования. Дословно Data Mining переводится как "добыча" (раскопка) данных. По сути Data Mining – анализ экспериментальных данных с целью поиска неочевидных, объективных и полезных на практике закономерностей. Неочевидных - это значит, что найденные закономерности не обнаруживаются стандартными методами обработки информации или экспертным путем. Объективных - это значит, что обнаруженные закономерности будут полностью

соответствовать действительности, в отличие от экспертного мнения, которое всегда является субъективным. Полезных - это значит, что выводы имеют конкретное значение, которому можно найти практическое применение [106]. На русском языке этот вид анализа еще не получил устоявшейся терминологии. Data Mining является мультидисциплинарной областью, возникшей и развивающейся на базе достижений прикладной статистики, распознавания образов, методов искусственного интеллекта, нейронных сетей, теории баз данных и др. Отсюда обилие методов и алгоритмов, реализованных в различных действующих системах Data Mining [107—113].

К методам и алгоритмам Data Mining относятся: искусственные нейронные сети, деревья решений, символьные правила, метод опорных векторов, байесовские сети, линейная регрессия, корреляционно-регрессионный анализ; методы кластерного анализа, методы поиска ассоциативных правил, метод ограниченного перебора, эволюционное программирование и генетические алгоритмы, разнообразные методы визуализации данных и множество других методов. В связи с этим удобно все многообразие методов Data Mining разделять на две группы: статистические и кибернетические методы.

Довольно долго Data Mining не признавалась полноценной самостоятельной областью анализа данных, иногда ее даже называли "задворками статистики" [114]. Однако в настоящее время идет её интенсивное развитие. В основу современной технологии Data Mining (discovery-driven data mining) положена концепция шаблонов (паттернов), отражающих фрагменты многоаспектных взаимоотношений в данных. Эти шаблоны представляют собой закономерности, свойственные подвыборкам данных, которые могут быть компактно выражены в понятной человеку форме. Поиск шаблонов производится методами, не ограниченными рамками априорных предположений о структуре выборке и виде распределений значений анализируемых показателей. Важное положение Data Mining — нетривиальность разыскиваемых шаблонов. Это означает, что найденные шаблоны должны отражать неочевидные, неожиданные (unexpected) регулярности в данных, составляющие так называемые скрытые знания (hidden

knowledge). К обществу пришло понимание, что сырые данные (raw data) содержат глубинный пласт знаний, при грамотной раскопке которого могут быть обнаружены настоящие самородки [115].

В целом технологию Data Mining достаточно точно определяет Григорий Пиатецкий-Шапиро — один из основателей этого направления: *«Data Mining — это процесс обнаружения в сырых данных ранее неизвестных; нетривиальных; практически полезных; доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности»*.

Хотя за рубежом метод ДР является довольно популярным, однако в России он не получил широкого распространения при решении гидрометеорологических задач. Можно отметить, что наиболее активно он использовался для построения статистических моделей и долгосрочного прогноза стока крупных рек, уровня Каспия, климатических параметров Северной Атлантики и др. [116–119]. При этом в большинстве случаев метод ДР имеет некоторые преимущества в точности описания, в визуализации получаемых результатов и более понятной их интерпретации по сравнению с методом МЛР.

Очевидно, впервые суть решений деревьев была изложена в 1966 году в работе Ханта и др. [120]. К достоинствам деревьев решений относятся:

- визуализация получаемых результатов и более понятная их интерпретация;
- алгоритм конструирования дерева решений не требует от пользователя выбора независимых переменных. На вход алгоритма можно подавать все переменные и алгоритм сам выберет наиболее значимые из них, которые в дальнейшем будут использованы для построения дерева;
- большинство алгоритмов конструирования деревьев решений имеют возможность специальной обработки пропущенных значений;
- точность моделей, созданных при помощи решений деревьев, сопоставима с другими методами построения классификационных моделей (статистические методы, нейронные сети);
- деревья решений могут работать с любыми типами исходных данных, как с числовыми, так и с категориальными переменными.

– деревья решений строят непараметрические модели, т.е. исходные данные свободны от теоретического распределения.

В наиболее простом виде дерево решений – это способ представления классифицирующих правил в виде иерархической структуры. Ее основой, имеющей вид дерева, являются правила типа «если..., то...» (*if-then*). Для принятия решения, к какому классу отнести некоторый объект или ситуацию, требуется ответить на вопросы, стоящие в узлах этого дерева, начиная с его корня. Корень – исходный вопрос, внутренний узел дерева является узлом проверки определенного условия. Далее идет следующий вопрос и т.д., пока не будет достигнут конечный узел дерева, являющийся узлом решения. Вопросы имеют вид «значение параметра A больше x ?». Если ответ «да», то осуществляется переход к правому узлу следующего уровня, если «нет» – то к левому узлу; затем снова следует вопрос, связанный с соответствующим узлом.

В соответствии с иерархической природой деревьев ветвления выполняются последовательно, начиная с корневой вершины, затем переходят к вершинам потомков, пока дальнейшее ветвление не прекратится и «неразветвленные» вершины потомки окажутся терминальными. *Терминальные вершины («листья»)* – это узлы дерева, начиная с которых никакие решения больше не принимаются. На рисунках терминальные вершины показываются программой Statistica красными пунктирными линиями, а остальные – так называемые решающие вершины, или вершины ветвления, – сплошными синими линиями. Началом дерева считается самая верхняя решающая вершина, которую иногда также называют корнем дерева (рисунок 2.8).

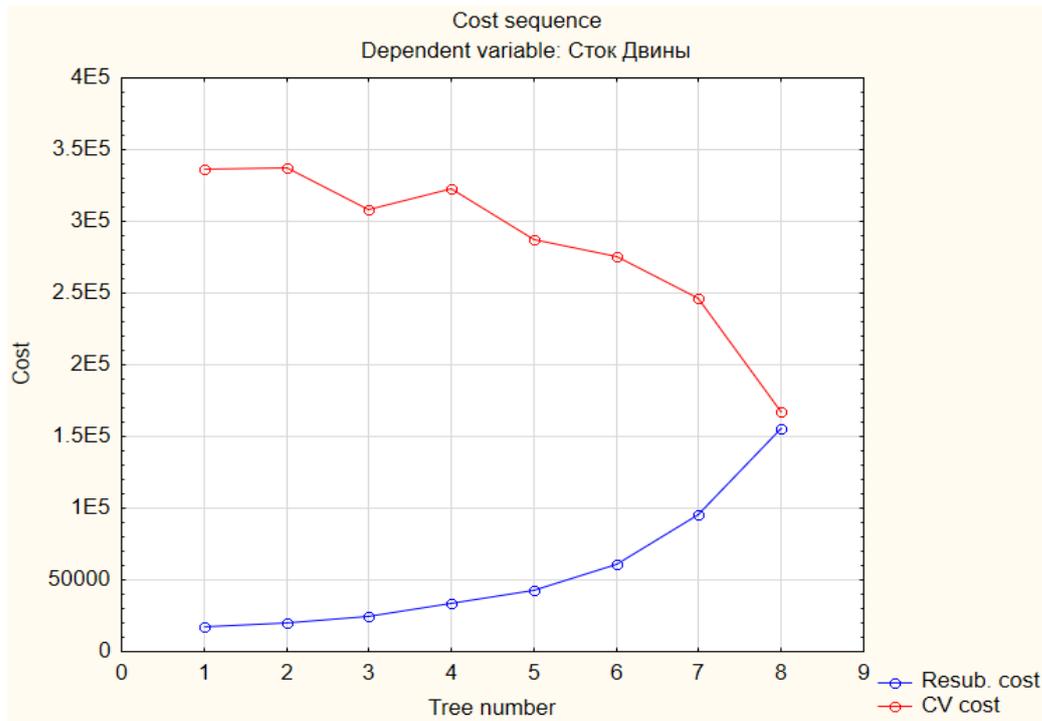


Рисунок 2.8 – Распределение значений цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (*Resubstitution cost*) и цены ошибки кросс-проверки (*CV cost*) в зависимости от количества узлов дерева.

В пакете Statistica [121] предусмотрено три алгоритма ветвления дерева.

Первый алгоритм – *Дискриминантное одномерное ветвление* для категориальных и порядковых предикторов (QUEST) – можно использовать, если независимые переменные являются категориальными, порядковыми или смесью обоих типов. При этом под порядковыми переменными понимаются любые количественные переменные.

Второй алгоритм – *Дискриминантное ветвление по линейным комбинациям порядковых предикторов* можно применять, если для анализа выбраны только порядковые переменные.

Третий алгоритм – *Полный перебор для одномерных ветвлений* методом CART (Classification and Regression Tree) можно использовать для категориальных, порядковых или смеси обоих типов независимых переменных.

По сравнению с предыдущими методами ветвления, в этом методе для нахождения наилучшего варианта выполняется последовательный перебор всех возможных комбинаций независимых переменных. Так как количество вариантов

для такого перебора может оказаться очень большим, то вычисления могут занять много времени, вследствие чего дерево решений окажется достаточно сложным.

Процесс создания дерева происходит сверху вниз, т.е. является нисходящим. Алгоритмы конструирования деревьев решений состоят из этапов "построение" или "создание" дерева (tree building) и "сокращение" дерева (tree pruning). В ходе создания дерева решаются вопросы выбора критериев расщепления (разбиения) и ветвления и остановки обучения. При сокращении дерева решается вопрос определения подходящего размера дерева, т.е. отсечения некоторых его ветвей. Впрочем, деление на отдельные этапы во многом условно, поскольку некоторые алгоритмы включают эти этапы последовательно, т.е. построение дерева и его сокращение, а другие чередуют их в процессе своей работы для предотвращения наращивания внутренних узлов.

Критерий расщепления требуется для того, чтобы разбить множество на однородные подмножества, которые должны быть связаны с данным узлом. Каждый узел помечается определенным атрибутом. Существует правило выбора атрибута: он должен разбивать исходное множество данных таким образом, чтобы объекты подмножеств, получаемых в результате этого разбиения, являлись представителями одного класса или же были максимально приближены к такому разбиению. Это означает, что в каждом классе количество инородных объектов из других классов («примесей») должно быть минимальным.

Существуют различные критерии расщепления [115]. Наиболее известные – мера энтропии и индекс *Gini*. Мера энтропии в некоторых алгоритмах известна под названием «мера информационного выигрыша» (information gain measure). Другой критерий расщепления реализован в алгоритме CART. Как следует из названия, он решает задачи классификации и регрессии. Алгоритм был разработан в 1974—1984 годах четырьмя профессорами статистики: Leo Breiman (Berkeley), Jerry Friedman (Stanford), Charles Stone (Berkeley) и Richard Olshen (Stanford) [122]. В алгоритме CART в качестве критерия расщепления используется индекс *Gini*. При помощи этого индекса атрибут выбирается на

основании расстояний между распределениями классов. Индекс *Gini* определяется по формуле:

$$Gini(T) = 1 - \sum_{j=1}^n p_j^2 \quad (2.9)$$

где T – текущий узел, p_j – вероятность класса j в узле T , n – количество классов.

Алгоритм CART предназначен для построения бинарного дерева решений. Бинарные деревья также называют двоичными. Каждый узел бинарного дерева при разбиении имеет только двух потомков, называемых дочерними ветвями. Дальнейшее разделение ветви зависит от того, много ли исходных данных описывает данная ветвь. На каждом шаге построения дерева правило, формируемое в узле, делит заданное множество примеров на две части. Правая его часть (ветвь *right*) – это та часть множества, в которой правило выполняется; левая (ветвь *left*) – та, для которой правило не выполняется.

Важно, что алгоритм CART работает как с числовыми, так и категориальными атрибутами. В каждом узле разбиение может идти только по одному атрибуту. Если атрибут является числовым, то во внутреннем узле формируется правило вида $x_i \leq c$, значение c обычно выбирается как среднее арифметическое двух соседних значений переменной x_i обучающего набора данных. Если же атрибут относится к категориальному типу, то во внутреннем узле формируется правило $x_i \in V(x_i)$, где $V(x_i)$ – некоторое непустое подмножество множества значений переменной x_i в обучающем наборе данных.

В качестве примера приведем дерево с одним ветвлением для атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний период (июнь-август) 2013 г. (рисунок 2.9). Нетрудно видеть, что первым параметром, разделяющим условия «идет дождь» и «нет дождя», является не атмосферное давление, как можно было предположить, а влажность воздуха [116]. Если относительная влажность (U) меньше 68,5 %, дождь отсутствует, если больше – дождь идет. При $U < 68,5$ % имеем 75 случаев, из них 69 дней дождя не было, а в течение 6 дней дождь шел. Условие $U > 68,5$ % соответствует 17 дням, из которых 13 дней шел дождь, а 4 дня он отсутствовал. Итак, влажность воздуха дает правильное решение

выполнения условия «идет дождь» и «нет дождя» в 89 % случаях, т.е. цена неправильной классификации составляет 11 %.

С точки зрения качества получаемых результатов весьма важной представляется оценка точности распознавания. В методе decision trees наиболее точной классификацией считается та, которая связана с наименьшей ценой. При этом *под ценой понимается доля неправильно классифицированных объектов. Под неправильной классификацией понимается ошибочное отнесение объекта, принадлежащего одному классу, в другой класс.* Очевидно, что самым лучшим прогнозом будет тот, который дает наименьший процент неправильных классификаций.

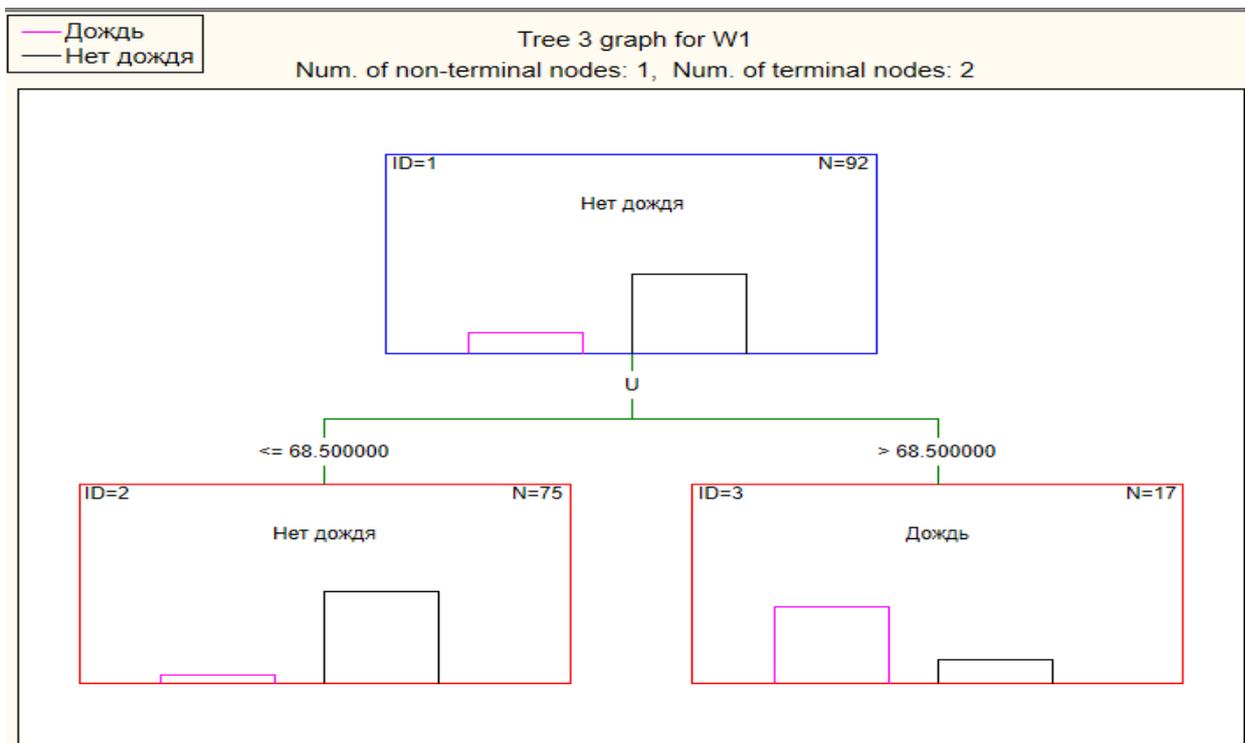


Рисунок 2.9 – Дерево решений после первого ветвления для атмосферных параметров в Санкт-Петербурге за летний период (июнь-август) 2013 г. [116].

В модуле *Деревья классификации* пакета Statistica [121] предусмотрено два варианта задания цены неправильной классификации объектов: *Равные* и *Пользовательские*. В первом варианте, когда цены берутся одинаковые, все внедиагональные элементы матрицы цен ошибок классификации (прогнозируемые классы – по строкам, наблюдаемые классы – по столбцам)

полагаются равными 1. Второй вариант соответствует случаю, когда по каким-либо причинам для одних классов требуется более точный прогноз, чем для других. Наиболее просто это можно учесть путем придания «важным» классам больших «весов», чем остальным.

В рамке *Априорные вероятности* нужно указать способ вычисления априорных вероятностей, то есть задать вероятность того, что объект будет принадлежать определенному классу даже при отсутствии какой-либо априорной информации о значениях независимых переменных. Если при этом априорные вероятности выбраны пропорциональными численности классов, а цена ошибки классификации является одинаковой для всех классов, то минимизация потерь будет в точности эквивалентна минимизации доли неправильно классифицированных наблюдений. Отметим, что *выбор априорных вероятностей, используемых для минимизации потерь, очень сильно влияет на результаты классификации*. Если различия между исходными частотами в данной задаче не считаются существенными или если мы заранее знаем, что классы содержат примерно одинаковое количество наблюдений, то тогда можно взять одинаковые априорные вероятности, что соответствует опции *Равные*. Если исходные частоты связаны с размерами классов, то следует в качестве оценок для априорных вероятностей взять относительные размеры классов в выборке опция *Оцениваемые*. Наконец, если мы располагаем какой-то информацией об исходных частотах, то априорные вероятности нужно выбирать с учетом этой информации в опции *Пользовательские*.

3. Закономерности межгодовых колебаний температуры поверхности океана

3.1. Временная изменчивость температуры поверхности океана

Как показано в 1 главе, влияние температуры морской воды на жизнедеятельность морских организмов исключительно многогранно, может проявляться в явной и опосредованной формах, может как ускорять, так и замедлять рост численности отдельных видов и даже приводить к массовой гибели организмов при резких изменениях температуры. В конечном счете, температура в значительной степени определяет общий вид флоры и фауны различных климатических зон океана, разнообразие видов и их численность [15].

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 растительному зоопланктону, к хищному планктону и нектону. При этом доминирующее значение температуры для живых организмов состоит в ее лимитирующем влиянии на их распространение, время нереста, созревание икры и личинок, интенсивность роста молоди и т.д., которые связаны с определенными пределами оптимальных значений температуры, адаптированными под тот или иной вид. Понижение температуры ниже этого предела задерживает созревание половых продуктов, а повышение, напротив, активизирует. Вследствие этого изменения температуры, выходящие за пределы оптимального диапазона, либо задерживают, либо, наоборот, ускоряют время нереста.

В прямой зависимости от температуры находится продолжительность инкубационного периода икры, личиночной стадии и выживание личинок, в значительной степени определяющих численность будущего поколения. Как правило, она достигает наибольшего значения при предшествующей высокой температуре и значительно снижается при низкой температуре, сопутствующей созреванию икры и личинок. При низкой температуре снижается также продуктивность фитопланктона и зоопланктона, являющихся пищей личинок.

Изменение температуры существенно сказывается на темпе роста, кормовой активности и процессе обмена, т.е. скорости преобразования питательных веществ в живую материю, которая при повышении температуры повышается, а при понижении уменьшается. Для взрослых особей температура определяет условия распространения всего стада, причем для каждой возрастной группы лимитирующие ее значения могут быть различные.

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, и изменения температуры вне этого диапазона, которые уже неблагоприятным образом воздействуют на жизнедеятельность морских организмов [15].

Отсюда следует, что прогноз термических условий в океане может стать основой прогнозов численности и биомассы промысловых рыб, а также ожидаемой производительности промысла.

В общем случае существует три источника информации о температуре поверхности океана в области ПА. Это береговые станции, экспедиционные наблюдения и спутниковые измерения. Сеть океанографических станций вдоль побережья Перу, состоит из 6 стационарных станций и управляется Перуанским морским институтом IMARPE (Instituto del Mar del Perú, на испанском языке). Местоположение станций приводится на рисунке 3.1. Стационарные наблюдения за ТПО на станциях Пайта, Кальяо и Писко начались в 1979 году, на трех других (Сан Хосе, Чикама, Хуанчако) несколько позже.

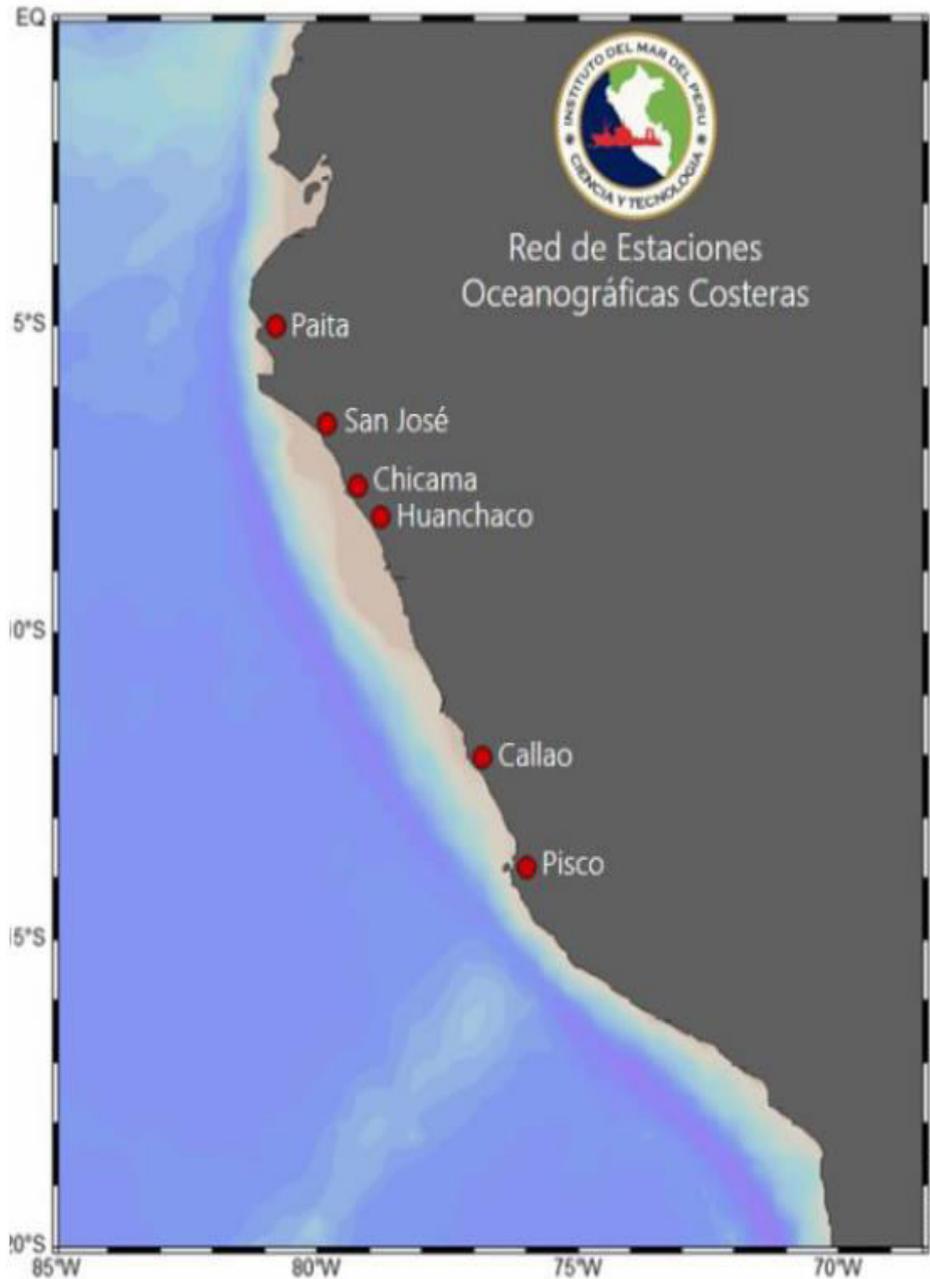


Рисунок 3.1 – Расположение береговых океанографических станций на побережье Перу [<http://www.imarpe.gob.pe>].

На рисунке 3.2 представлен временной ход среднегодовых значений ТПО по данным 4 береговых станций без учета Сан Хосе и Хуанчако, наблюдения за ТПО в которых начались только в нынешнем веке. Нетрудно видеть два сильных пика ТПО, обусловленных явлением Эль-Ниньо в эти годы. В остальном изменения ТПО носят преимущественно случайный характер.

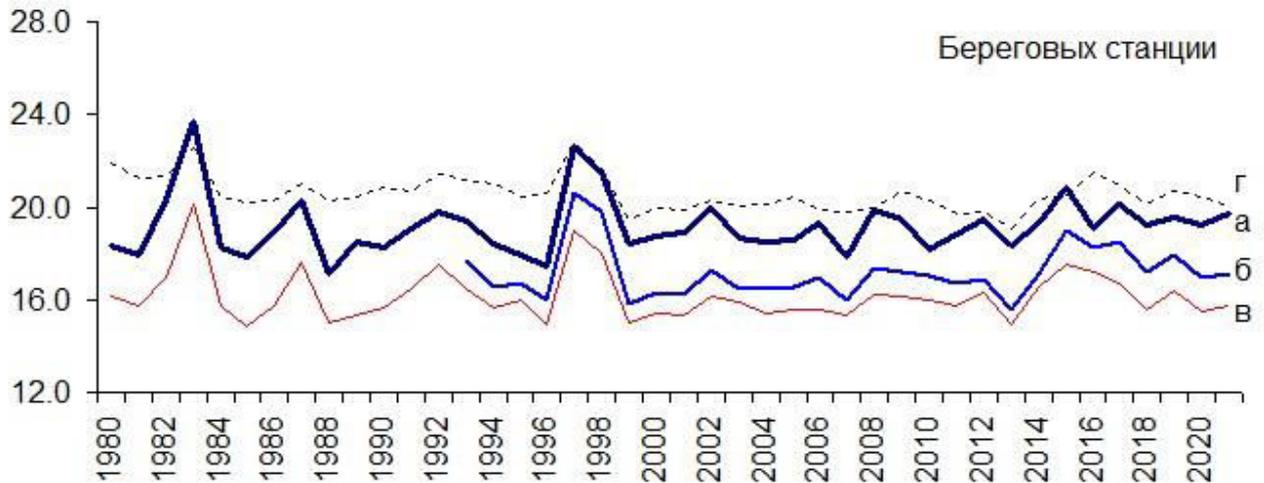


Рисунок 3.2 – Межгодовой ход ТПО на береговых станциях Перу: а) Пайта, б) Чикама, в) Кальяо, г) Писко

Статистические характеристики годовых значений ТПО на береговых станциях представлены в таблице 3.1. Обращает на себя внимание, что температура воды на самой южной станции (Писко) заметно выше чем на станциях севернее. Это связано с тем, что станция находится в мелководной бухте, отдаленной от открытой части океана узким проливом. В результате вода в бухте хорошо прогревается и апвеллинг здесь отсутствует. На ст. Писко отмечается наименьшая амплитуда колебаний и наименьшая межгодовая изменчивость ТПО, характеризуемая коэффициентом вариации. Кроме того, значимый отрицательный тренд в ТПО наблюдается только на ст. Писко. Отметим, что между ТПО на этих станциях отмечается довольно высокая корреляция. Самая высокая между станциями Чикама и Каллао ($r = 0,91$), а наименьшая между ст. Каллао и ст. Писко ($r = 0,51$).

Таблица 3.1 – Статистические характеристики годовых значений ТПО на береговых станциях в области Перуанского апвеллинга (X_{cp} – среднее, A – амплитуда, C – коэффициент вариации, Tr – коэффициент тренда, R^2 – коэффициент детерминации тренда)

Станция, период наблюдений	Координаты станции	X_{cp} , °C	A , °C	C (%)	Tr , °C/10 лет	R^2
Пайта (1980—2021)	81,12° з.д.; 05,07° ю.ш.	19,2	6,6	6,68	0,070	0,004
Чикама (1993—2021)	79,43° з.д.; 07,70° ю.ш.	17,2	5,1	6,72	0,096	0,005
Каллао (1980—2021)	77,16° з.д.; 12,07° ю.ш.	16,2	5,3	6,76	-0,106	0,014
Писко (1980—2021)	76,22° з.д.; 13,71° ю.ш.	20,6	3,7	3,71	-0,262	0,177

Экспедиционные исследования пока что не получили широкого развития в Перу. Они проводятся под руководством IMARPE и целями, направленными на решение задач промысловой океанологии, являются:

- гидроакустическая экспедиция для оценки популяции анчоуса и других пелагических ресурсов. Проводится в течение зимне-весеннего сезона в Южном полушарии;

- экспедиция для оценки популяции хека и других демерсальных ресурсов. Обычно проводится осенью в Южном полушарии;

- экспедиция для оценки нерестовой биомассы анчоуса (*Engraulis ringens*) с использованием метода производства яиц. Проводится с августа по сентябрь. Он основан на процессе нереста анчоуса;

- исследовательская экспедиция по гигантскому кальмару (*Dosidicus gigas*). Проводится с ноября по декабрь.

Естественно, экспедиции включают мониторинг ТПО, солености, растворенного кислорода и питательных веществ на разных глубинах. На рисунке 3.3 дан пример маршрутов экспедиции океанографических исследований и гидроакустической оценки демерсальных (придонных) водных биоресурсов. Видно, что экспедиция проводится в прибрежной зоне и в пределах юрисдикции Перу. Очевидно, что экспедиционные наблюдения не могут быть использованы для изучения крупномасштабной пространственно-временной изменчивости ТПО всей области ПА.

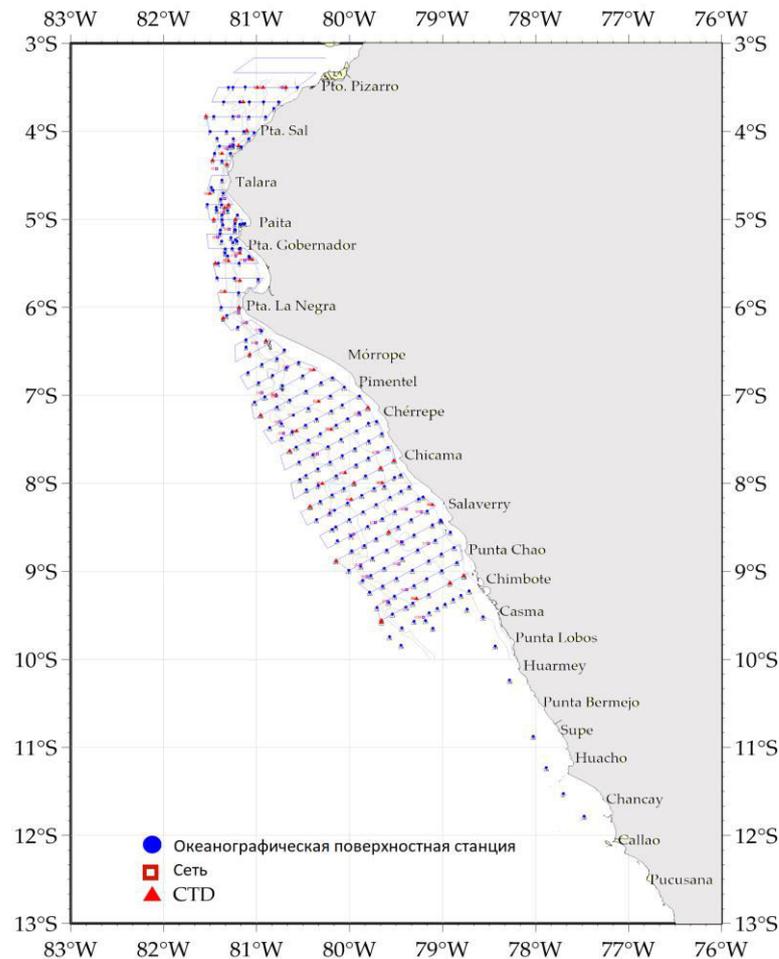


Рисунок 3.3 – Пример маршрутов экспедиции океанографических исследований и гидроакустической оценки демерсальных (придонных) водных биоресурсов [<http://www.imarpe.gob.pe>]

Лучше всего задаче выявления закономерностей пространственно-временной изменчивости ТПО соответствуют измерения температуры воды со спутников. Метеорологические спутники предоставляют информацию о ТПО с 1967 года, а первые глобальные карты ТПО появились в 1970 году. Радиометры, работающие в инфракрасной (ИК) части электромагнитного (ЭМ) спектра, регистрируют излучение, которое термически испускается поверхностью моря [123]. Измеренное радиометром ИК излучение затем может быть пересчитано для оценки физической температуры воды, потому что существует тесная связь между излучаемым инфракрасным излучением и температурой поверхности моря (ТПМ). Основной проблемой при получении оценок температуры ИК-датчиками является, удаление ошибок, внесенных атмосферой и при этом сохранение точности измерений в пределах нескольких десятых долей Кельвина. Главной

ошибкой является наличие облачности, поэтому для районов, практически постоянно закрытых облачностью, используются СВЧ-радиометры, которые обладают существенно худшим разрешением по пространству – 25 км и температуре – 0.8 °С [124].

Атмосферные поправки для количественной оценки ТПО стали возможны после того, как в 1979 году были развернуты радиометры с несколькими инфракрасными каналами [125]. С внедрением в 1982 г. для измерения температуры поверхности моря усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) появилась возможность изучать пространственно-временные изменения ТПО в пределах Мирового океана, исключая площади, занятые морским льдом, каждые 1 – 2 дня с высокой точностью [126]. При этом для решения климатических задач используются композитные карты ТПО, в которых убраны эффекты облачности и локального солнечного прогрева за счет осреднения значений ТПО с помощью различных численных методов. Такие карты, которые ассимилируются в виде спутниковых баз данных, используются для исследования сезонной и межгодовой изменчивости ТПО отдельных морей или всего Мирового океана в целом [126].

Понятно, спутниковая информация о ТПО имеет принципиальные преимущества перед береговыми и экспедиционными наблюдениями. Как было указано в разделе 2.1, в данной работе использовалась база данных о ТПО GODAS (Global Ocean Data Assimilation System), которая имеет разрешение $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Из этой базы было выбрано 216 точек в узлах сетки в пределах от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. Базовый период исследования составлял 41 год (1980—2020 гг.).

На рисунке 3.4 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°C отмечаются на севере ПА, а минимальные ниже 15°C 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.

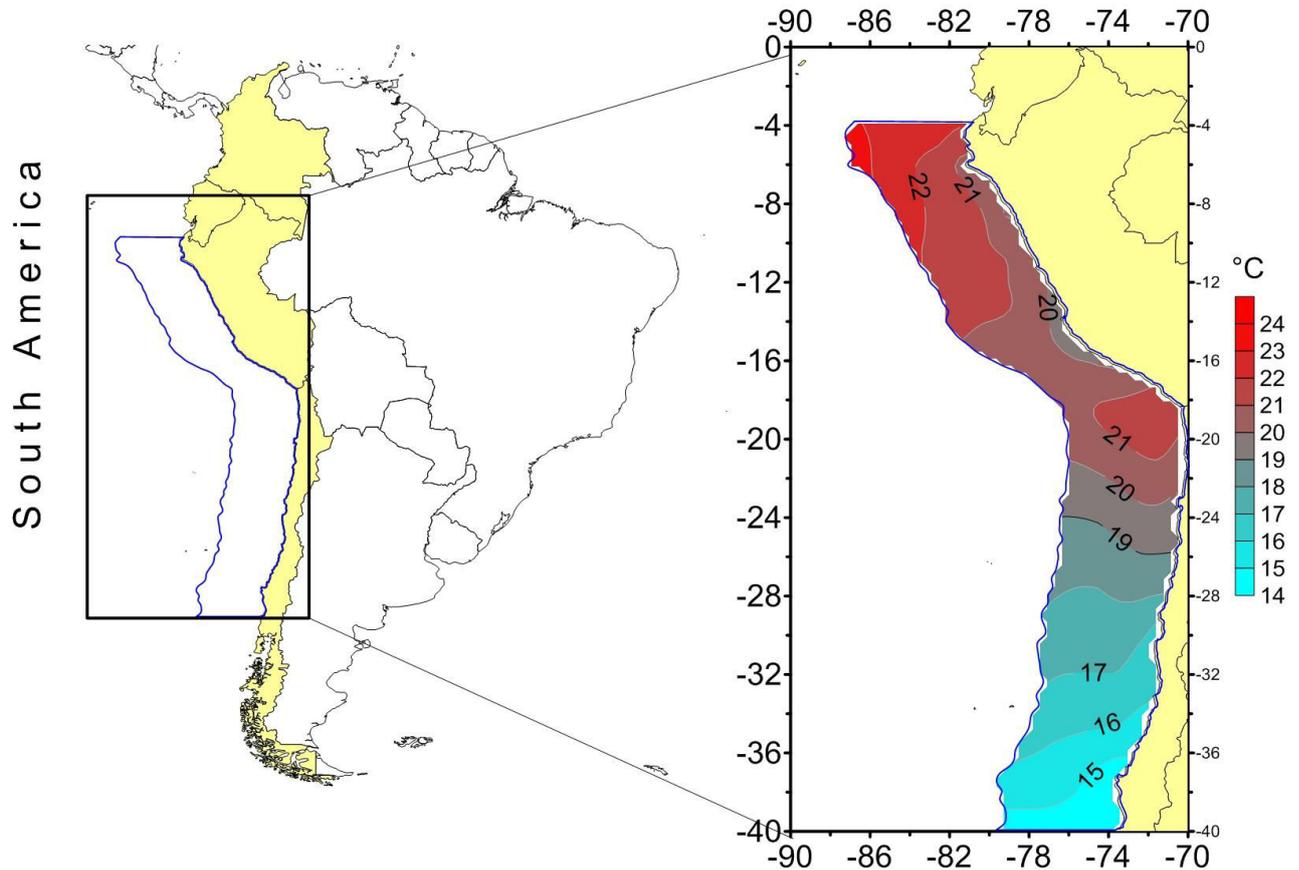


Рисунок 3.4 – Распределение среднегодовых значений ТПО в области Перуанского апвеллинга за период 1980–2020 гг. по данным GODAS [127].

Обратимся к таблице 3.2, в которой представлены статистические характеристики годовых значений ТПО в точках системы GODAS наиболее близко расположенных к береговым станциям. Прежде всего, отметим довольно высокую корреляцию между ними (0,77–0,94). Корреляция не влияет на расхождения в средних значениях. Исключая ст. Писко, ТПО в точках GODAS существенно превышает ТПО на береговых станциях. Особенно велико расхождение с ТПО на ст. Каллао (около 4 °C). В отличие от береговых станций в точках системы GODAS ярко выражены отрицательные тренды.

Таблица 3.2 – Статистические характеристики годовых значений ТПО в близлежащих точках системы GODAS к береговым станциям (r – коэффициент корреляции, X_{cp} – среднее, A – амплитуда, C – коэффициент вариации, Tr – коэффициент тренда, R^2 – коэффициент детерминации тренда)

Координаты точки	Ближайшая станция	r	X_{cp} , °C	A , °C	C (%)	Tr , °C/10 лет	R^2
05,5° ю.ш.; 81,5° з.д.	Пайта	0,77	21,0	6,1	6,18	-0,423	0,160
07,5° ю.ш.; 79,5° з.д.	Чикама	0,94	20,1	5,9	5,94	-0,249	0,065
12,5° ю.ш.; 77,5° з.д.	Каллао	0,80	20,2	6,2	6,55	-0,610	0,321
76,5° ю.ш.; 13,5° з.д.	Писко	0,81	19,7	6,0	6,30	-0,583	0,332

Рассмотрим теперь пространственное распределение угловых коэффициентов линейного тренда для среднегодовых значений ТПО (рисунок 3.5). Здесь видно, что отрицательные тренды ТПО наблюдаются на всей акватории ПА. Максимальные их значения (числа по абсолютной величине) сосредоточены в узкой прибрежной полосе океана в северной части ПА между 6° и 16° ю.ш. Также можно отметить, что практически для всей области ПА, за исключением локальных очагов на севере и юге ПА, тренды ТПО значимы.

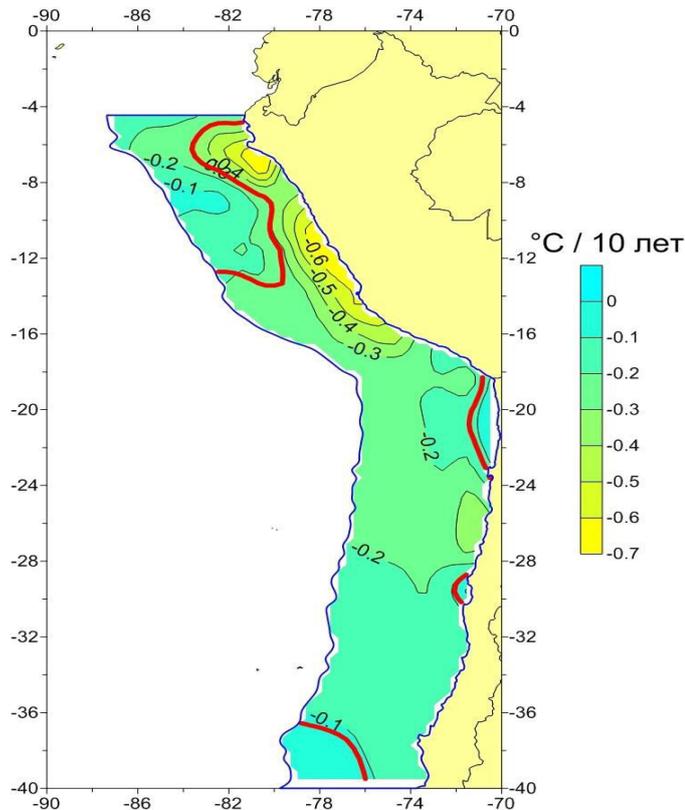


Рисунок 3.5 – Пространственное распределение коэффициентов тренда для среднегодовых значений ТПО в области Перуанского апвеллинга. Жирной кривой красного цвета отделены локальные очаги незначимых трендов [127].

Причиной отрицательных трендов ТПО является холодное Перуанское течение, которое формируется из северной ветви Антарктического циркумполярного течения. На первый взгляд, относительное охлаждение вод ПА противоречит общеизвестному факту потепления вод океана. Однако потепление океана происходит неравномерно. Хотя на большей части океана наблюдается четко выраженный рост ТПО, все же есть области с отрицательными трендами. Согласно системе Copernicus [128], за период 1993—2021 гг. в регионе ПА и прилегающих районах юго-восточной части Тихого океана наблюдается снижение ТПО, что обусловлено холодным Перуанским течением. Это также подтверждается работой [129], результаты которой показали, что усиление вдольберегового ветра у берегов Перу и Чили приводит к круглогодичной интенсификации апвеллинга и снижению температуры поверхности моря вблизи побережья.

В работе [130] предложена гипотеза, согласно которой ветры, благоприятствующие прибрежному апвеллингу, усиливаются вследствие антропогенного глобального потепления. Данная гипотеза была исследована этими авторами для динамики апвеллинга Перу-Чили, охватывающего период 1940—2014 гг. Они нашли доказательства усиления ветров в этом регионе, благоприятствующих апвеллингу. Кроме того, имеются также доказательства непрерывного усиления апвеллинга, вызванного ветром, в течение 1980-2014 гг. [131]. Это происходит у берегов Чили с 1980-х годов [132], а у берегов центральной и южной части Перу с 1950-х годов [18, 133]. В тоже время другие восточные пограничные системы апвеллинга Южного полушария, Бенгельская у берегов Южной Африки [134] и система к западу от Австралии [135] не демонстрируют охлаждения ТПО.

Хотя существуют разные взгляды на причины похолодания, на наш взгляд, реалистичным выглядит предположение, что оно вызвано интенсификацией зональной циркуляции атмосферы [136], основным параметром которой служит южная круговая мода (Southern Annular Mode — SAM), рассчитываемая непосредственно по данным об атмосферном давлении на метеорологических

станциях между 40 и 65° ю. ш. Вследствие интенсификации SAM происходит усиление Антарктического циркумполярного течения, в том числе его северной ветви, формирующего холодное Перуанское течение. Свидетельством усиления Перуанского течения являются положительные тренды в морском уровне вдоль побережья Южной Америки [137]. В результате обширная акватория в зоне ПА приобретает тенденцию к похолоданию. Другим фактором, способствующим формированию отрицательных трендов, как будет показано ниже, является усиление апвеллинга наиболее выраженное в прибрежной зоне океана.

Рассмотрим теперь особенности распределения среднемесячных трендов ТПО на акватории ПА. С этой целью для каждого месяца года были построены карты трендов. 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 3.3.

Нетрудно видеть, что на акватории ПА отрицательные тренды, характеризующие понижение ТПО, преобладают в течение всего года. Максимальные по величине отрицательные тренды 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 3.3 – 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

На рисунке 3.6 приводится карта местоположения максимальных среднемесячных трендов ТПО, взятых из таблицы 3.3. Нетрудно видеть, что максимальные отрицательные тренды приурочены к северной части ПА, причем все они сосредоточены в прибрежной полосе. Для 8 месяцев они почти совпадают, так как отмечаются в близлежащих точках с координатами $70,5^\circ$ з.д., $19,5^\circ$ ю.ш. и $71,5^\circ$ з.д., $29,5^\circ$ ю.ш. Такое местоположение трендов свидетельствует, что здесь развивается интенсивный апвеллинг, на который преобладающее влияние оказывают локальные условия, в частности, береговой рельеф местности. По абсолютной величине наибольшие отрицательные тренды отмечаются с февраля по март. Что касается максимальных положительных трендов, то они существенно меньше отрицательных трендов, причем их наибольшее число (ноябрь-март) сосредоточено также в прибрежной зоне с центром около 30° ю.ш.

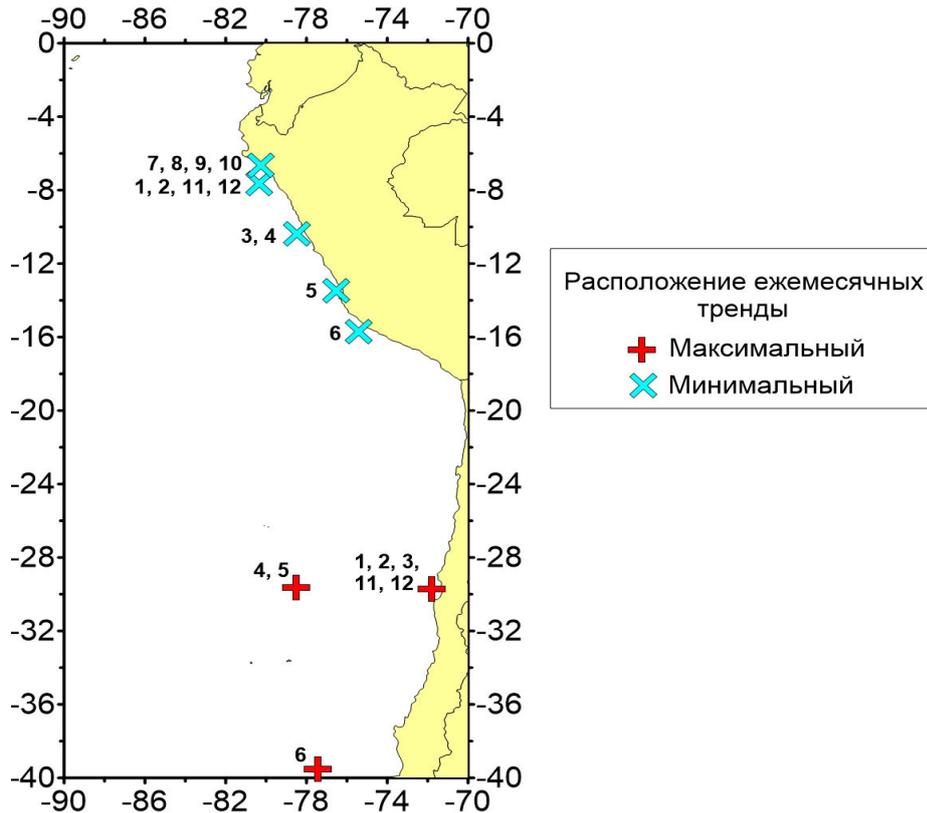


Рисунок 3.6 – Карта местоположения максимальных положительных (+) и отрицательных (x) среднемесячных трендов ТПО, взятых из Таблицы 3.3.

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 [86, 89].

Очевидно, в общем случае совокупность гидрометеорологических наблюдений целесообразно представить в виде «куба данных» (рисунок 3.7). Куб данных составляют три рабочих оси: пространство, время, переменные (признаки). Как известно, основой применения многих статистических методов и, прежде всего методов МСА, служат матрицы исходных данных, представляющие

собой применительно к рассматриваемому кубу его грани (плоскости) с теми или иными параметрами. Количество возможных вариантов построения матриц – шесть и все они приводятся на рисунке 3.7.

Наибольший интерес для нас представляют матрицы, представляющие плоскости «время-пространство» и «пространство-время». Если мы имеем длительные наблюдения за температурой поверхности океана в m точках за период времени n , то исходная матрица может иметь вид $m \times n$ или $n \times m$, где первый элемент означает столбцы, а второй – строки. При использовании многих методов МСА довольно часто принимается условие, что $m < n$. Понятно, что задание вида матрицы практически обуславливает постановку задачи. Например, если необходимо решить задачу районирования акватории, то матрица должна иметь вид $m \times n$ и тогда процедура районирования осуществляется в пространстве собственных векторов или факторных нагрузок.

В общем случае пространственно-временная классификация крупномасштабной изменчивости гидрометеорологической характеристики (из соображений удобства примем период осреднения равным одному месяцу) может быть разбита на следующие локальные задачи [89]:

- снижение размерности признакового пространства без существенной потери точности;
- районирование акватории океана по характеру межгодовых или сезонных колебаний заданной характеристики;
- разбиение межгодового хода заданной характеристики на однородные градации;
- классификация сезонного хода, т.е. выделение квазиоднородных сезонов года;
- типизация временной изменчивости гидрометеорологических данных.

В данной работе решались две первые задачи. Как было указано в главе 2, наиболее эффективными способами снижения размерности, являются методы главных компонент и факторного анализа. МГК представляет формальное

разложение исходных переменных на линейно независимые составляющие с существенно 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 (k_{cc}) 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 (таблица 3.4). Анализ значений поля первого собственного вектора разложения показал, что значимые коэффициенты корреляции охватывают преобладающую часть акваторию ПА, т.е. поле ТПО выглядит излишне однородным [127].

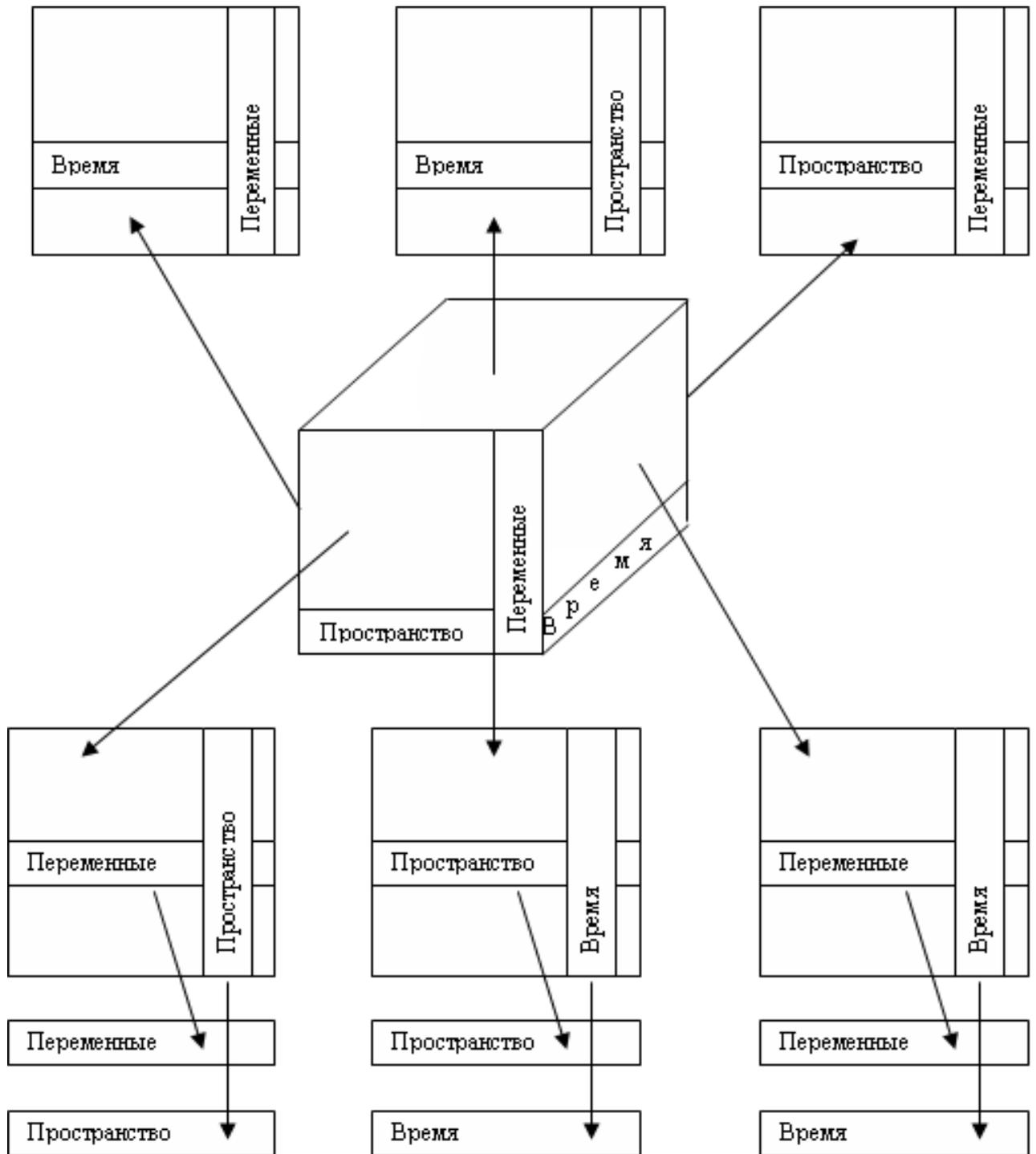


Рисунок 3.7 – Формирование «куба» гидрометеорологических данных.

Таблица 3.4 – 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	76,2	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 пространственную протяженность региона ПА, такой результат показался неочевидным. Поэтому собственные векторы разложения и главные компоненты этих 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 (таблица 3.4). 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.

Для оценки степени связности 4 общих факторов друг с другом было выполнена иерархическая классификация 216 факторных нагрузок значений ТПО и построена дендрограмма методом Уорда (рисунок 3.8). В качестве метрики расстояния использован аналог Евклидовой метрики $d' = 1 - r$. Нетрудно видеть, что очень четко выделяются 4 класса. Очевидно, что область ПА может быть разбита на 4 квазиоднородных района.

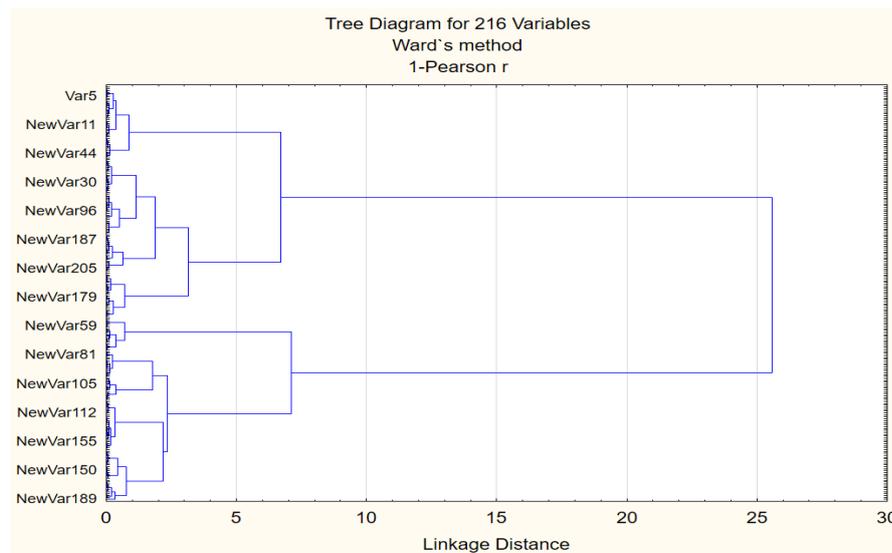


Рисунок 3.8 – Дендрограмма общих факторов среднегодовых значений ТПО в области Перуанского апвеллинга в 216 точках.

Возможно несколько вариантов разбиения области ПА на 4 района. Первый – по результатам дендрограммы на рисунке 3.8. Другой – на основе использования метода к-средних кластерного анализа, который минимизирует сумму квадратов внутрикластерных расстояний до центра кластера. Наконец, выполнить районирование можно даже вручную, не прибегая к методам кластерного анализа. Для этого надо выделить 216 максимальных значений ФН в каждой строке из 4 значений ОФ. Если нанести выделенные максимальные значения ФН для 1-го фактора на карту, то получим 1-й район. Значения ФН для 2-го фактора будут соответствовать 2-му району и т.д. При условии территориальной связности точек число классов должно соответствовать числу районов. Поскольку в 4 район будут входить точки, имеющие наименьшие оценки ФН, то и сам район будет иметь наименьшую площадь. 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 рисунке 3.9 приводятся результаты районирования области ПА по характеру межгодовой изменчивости ТПО.

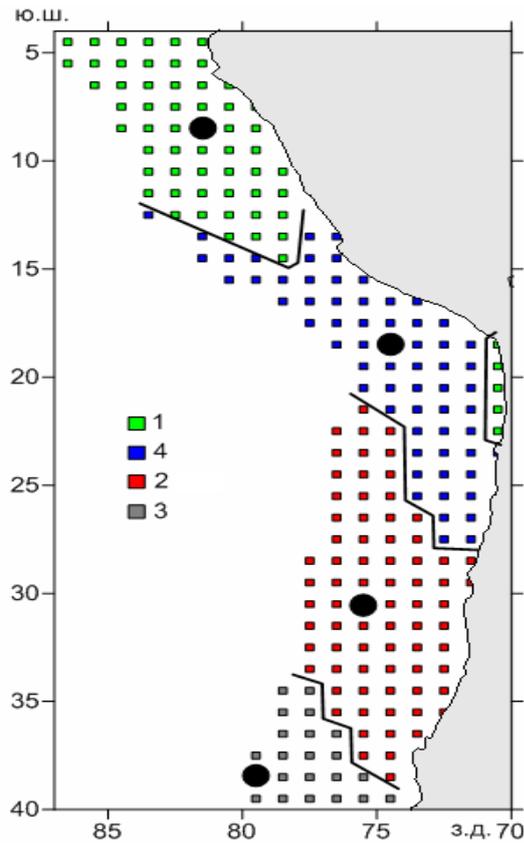


Рисунок 3.9 – Результаты районирования области ПА по характеру межгодовой изменчивости ТПО. Номера районов соответствуют номерам факторов. Черными точками указаны центры квазиоднородных районов, оптимальным образом описывающих изменчивость ТПО внутри района [127].

Наиболее высокие ФН отмечаются для 1 района (кластера), выделенного на рисунке 3.9 зеленым цветом. В него входит 59 точек и он занимает крайне северное положение в области ПА. Очевидно, за центр кластера целесообразно принять максимальную факторную нагрузку в данном районе, которая равна 0,97 и имеет координаты $8,5^\circ$ ю.ш. и $81,5^\circ$ з.д., причем эта оценка является максимальной для всей матрицы ФН. Центр кластера имеет максимальную корреляцию с точками, входящими в кластер. Вторая ФН в основном формирует 2 кластер (красный цвет), который занимает частично центральную и южную части области ПА, состоит из 74 точек, а центр кластера имеет величину равную 0,95. Самый маленький по площади 3 кластер (22 точки) находится на крайнем юге ПА. Наконец, 4 кластер формируется из значений ФН в основном меньших 0,65 и занимает промежуточное положение между 1 и 2 кластерами. Итак, в результате использования метода главных факторов удалось снизить размерность

исходного поля ТПО до 4 точек, описывающих, по сути, межгодовую изменчивость поля ТПО в области ПА.

В таблице 3.5 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 3.5 – Статистические характеристики годовых значений ТПО в центрах кластеров и коэффициенты корреляции между ними (X_{cp} – среднее, A – амплитуда, C – коэффициент вариации, Tr – коэффициент тренда, R^2 – коэффициент детерминации тренда) [127].

Номер кластера	X_{cp} , °C	A , °C	C	Tr , °C/10 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

Межгодовой ход ТПО в центре выделенных кластеров приводится на рисунке 3.10. Нетрудно видеть, что статистические характеристики ТПО, приведенные в таблице 3.5, полностью отражают особенности межгодовой изменчивости ТПО. Кроме того, на рисунке 3.10 вертикальными прямоугольниками выделено явление Эль-Ниньо в районе N 3+4. При этом цвет означает интенсивность явления: черный цвет – слабое или умеренное явление, красный цвет – экстремальное явление. Видно, что основное влияние N 3+4 оказывает на ТПО в 1 кластере и практически игнорирует ТПО в 2 и 3 кластерах.

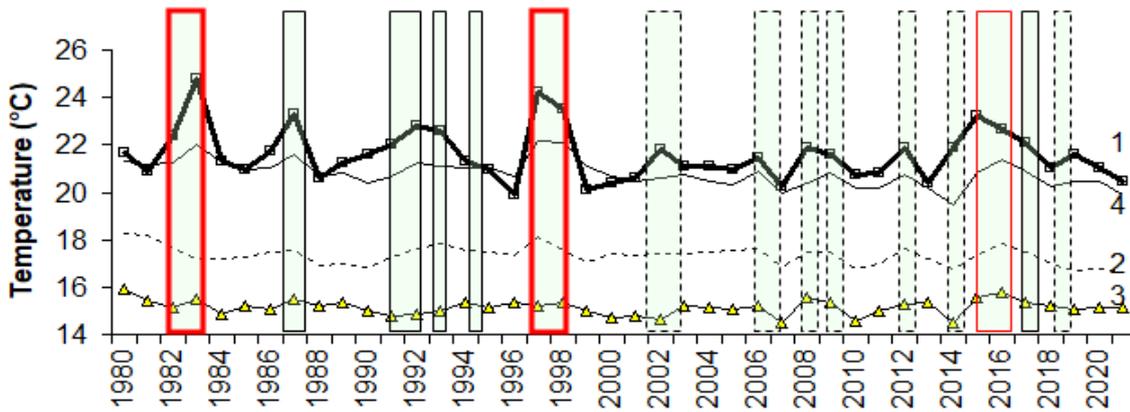


Рисунок 3.10 – Межгодовая изменчивость ТПО в центре каждого кластера ПА. Вертикальными прямоугольниками показано явление Эль-Ниньо в районе N 3+4. Цвет означает интенсивность явления: черный цвет – слабое или умеренное явление, красный цвет – экстремальное явление.

Определенный интерес представляет выявление цикличностей в межгодовой изменчивости ТПО. С этой целью выполнен классический Фурье-анализ ТПО в центрах четырех кластеров. В табл. 3.6 приводятся результаты двух значимых гармоник, дающих наибольший вклад в дисперсию годовых значений ТПО центров кластеров ПА. Циклический характер колебаний ТПО лучше всего выражен в 1 кластере, две гармоники которого описывают 38,5 % дисперсии ТПО, в то время как в 4 кластере они характеризуют только 20,8 % дисперсии ТПО. Основная часть циклических колебаний обусловлена короткопериодными гармониками с периодами 3,6 и 4,8 лет.

Таблица 3.6 – Частотная структура годовых значений ТПО в центрах кластеров Перуанского апвеллинга (Т – период гармоники, Д – вклад гармоники в дисперсию временного ряда)

Номер кластера	1 гармоника		2 гармоника	
	Период Т, годы	Вклад Д, %	Период Т, годы	Вклад Д, %
1	4,8	15,9	3,6	22,6
2	11,3	16,9	6,1	19,7
3	9,1	11,1	3,6	11,6
4	4,8	9,7	3,6	11,1

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. Одновременно ЭНЮК является наиболее мощным очагом потока CO_2 из океана в атмосферу, который характеризуется значимым положительным трендом [138].

Несмотря на длительную историю исследований ЭНЮК, механизм формирования и особенно прогноз Эль-Ниньо и обратного ему явления Ла-Нинья остается одной из важнейших современных научных задач, которая не решена до сих пор [139—141]. Однако, не вызывает сомнений, что основной причиной формирования ЭНЮК являются пассаты в экваториальной циркуляционной ячейке Уокера [142]. Интенсивность пассатов характеризует Южное колебание, для оценки которого используется индекс *SOI* (South Oscillation Index). Данный индекс рассчитывается как разность атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин (север Австралии). При больших положительных значениях *SOI* (явление Ла-Нинья) пассаты усиливаются, что приводит к значительному нагону более теплых поверхностных вод к побережью Индонезии и понижению здесь атмосферного давления. В это время у восточного побережья океана происходит сгон вод, усиление Перуанского апвеллинга, охлаждение поверхностных вод и повышение атмосферного давления в районе экватора (рисунок 3.11, б).

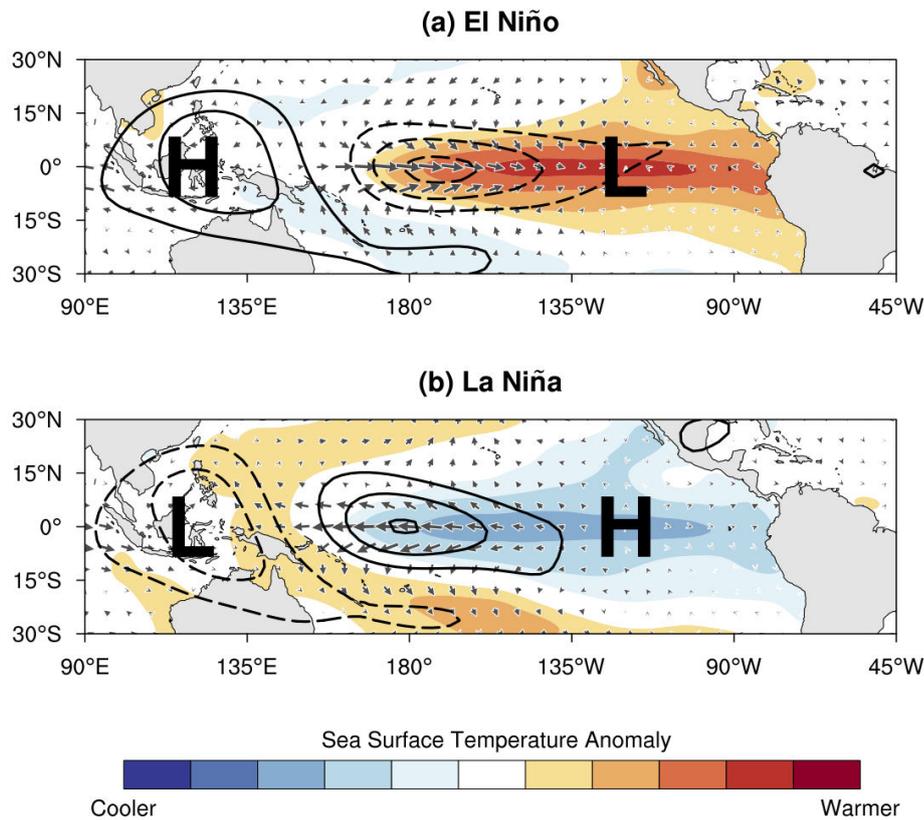


Рисунок 3.11 – Схематическая диаграмма, показывающая физические механизмы формирования явлений Эль-Ниньо (а) и Ла-Нинья (б). Стрелки показывают направление ветра в приводном слое, *H* и *L* – центры высокого и низкого атмосферного давления [143]. <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

При отрицательных значениях *SOI* (явление Эль-Ниньо) наблюдается обратная ситуация. Пассаты резко ослабевают, давление над Индонезией повышается, огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина устремляются на восток. В результате ТПО в центральной и восточной части экваториальной зоны повышается на несколько градусов. У восточного побережья океана большая часть этих вод поворачивает на юг и накрывает область апвеллинга (рисунок 3.11, а). Поэтому поверхностная температура здесь повышается на несколько градусов, что приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц т. п.

Наиболее распространенным показателями ЭНЮК является ТПО в реперных районах, вытянутых вдоль экватора: это индексы *Nino* 1+2, *Nino* 3, *Nino* 3+4 и *Nino* 4 (Рисунок 3.12), а также индекс Южного Колебания *SOI* и ряд индексов, для оценки которых используются дополнительные характеристики (*MEI*, *TNI* и др.). Индекс *Nino* 1+2 примыкает к побережью Южной Америки и

вытянут от экватора до 10° ю.ш. По сути, он находится под воздействием сильного Экваториального подповерхностного течения (EUC), которое достигает шельфа Перу [144] и наиболее четко определяет возникновение и масштабы явления Эль-Ниньо в прибрежном Перу [145].

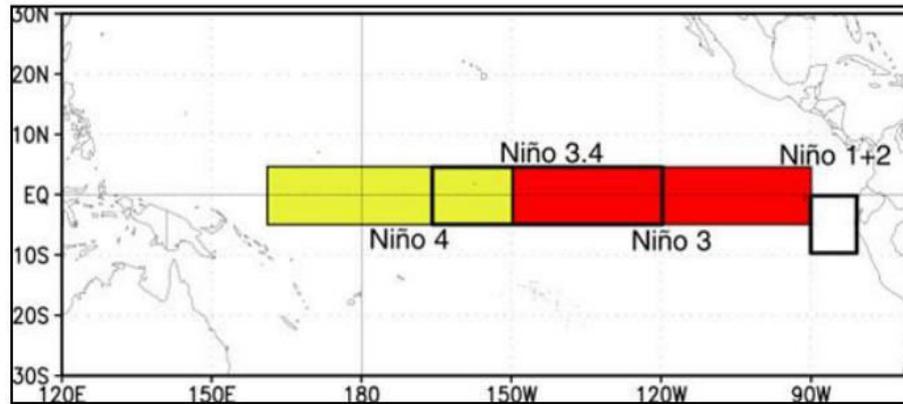


Рисунок 3.12 – Индексы Niño 1+2, Niño 3, Niño 3+4 и Niño 4. [146].

Естественно, температура Niño 1+2 несколько ниже температуры других индексов ЭНЮК. Также ниже и корреляция значений Niño 1+2 с другими индексами. На рисунке 3.13 представлен межгодовой ход годовых значений ТПО в районах N 3+4, который наиболее тесно связан с другими индексами и чаще всего используется в исследованиях, в районе N 1+2 и в центре первого кластера ПА. Как и следовало ожидать, ТПО в районе N 3+4 в среднем заметно выше (на 4,5 °C), чем в центре 1 кластера. Нетрудно видеть, что между этими переменными наблюдается высокая степень идентичности: положительные (феномен Эль-Ниньо) и отрицательные (феномен Ла-Нинья) экстремумы ТПО практически совпадают. Однако степень связи между переменными заметно различается. Так, связь между ТПО в районе N 1+2 и центром 1 кластера почти функциональная ($r=0,92$). Заметно ниже связь между ТПО в районе N 3+4 и центром 1 кластера ($r=0,70$). Отметим, что связь ТПО в N 3+4 и ТПО более южных кластеров резко уменьшается и становится незначимой для кластеров 2 и 3. Таким образом, влияние ЭНЮК, как и ожидалось, распространяется преимущественно на северную зону ПА.

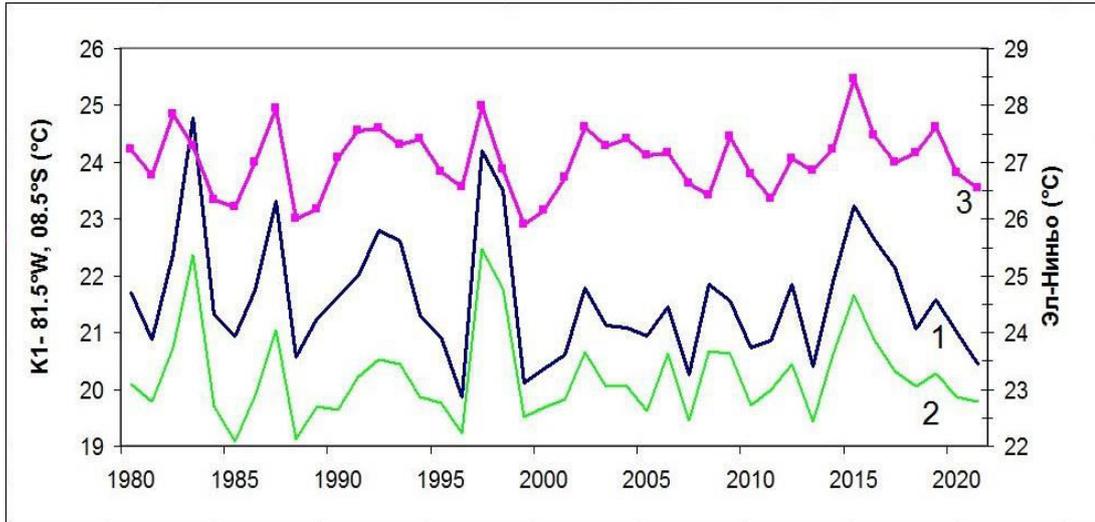


Рисунок 3.13 – Межгодовая изменчивость ТПО в центре 1 кластера области ПА (1), в районах N 1+2 (2) и N 3+4 (3).

Обратимся к рисунку 3.14, на котором 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.

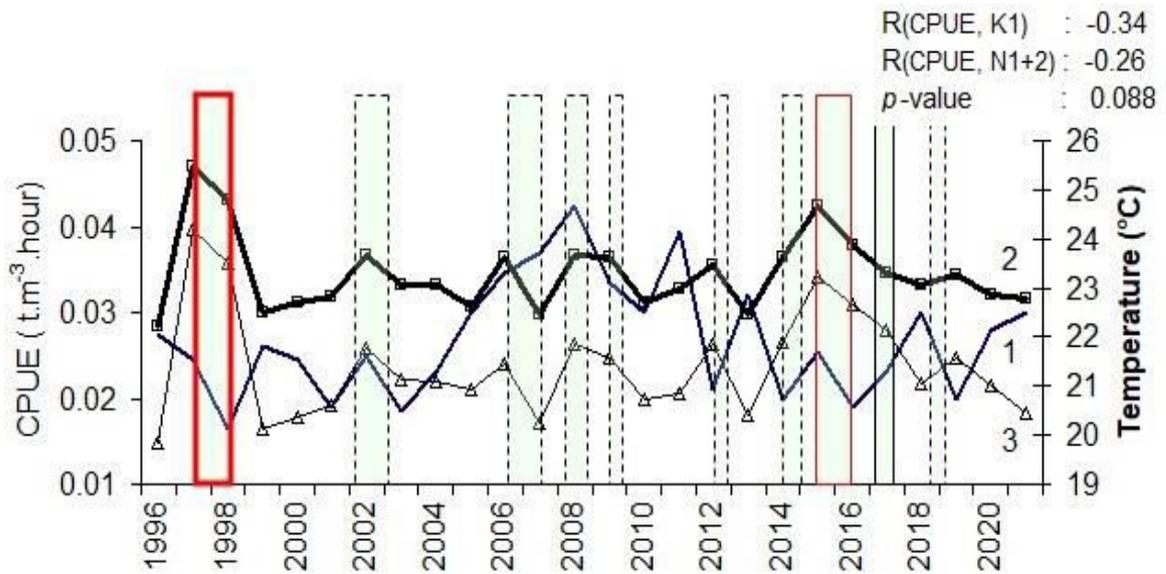


Рисунок 3.14 – Межгодовая изменчивость CPUE (биомассы) анчоусов (1), значений ТПО в районе Niño 1+2 (2) и в центре 1 кластера ПА (3). Вертикальными прямоугольниками показано явление Эль-Ниньо в районе N 1+2. Цвет означает интенсивность явления: черный цвет – слабое или умеренное явление, красный цвет – экстремальное явление.

Отметим существование локального прибрежного феномена Эль-Ниньо (ПФЭН), которое состоит в аномальном потеплении вод экваториальной части Тихого океана около побережья Южной Америки, влияющего на климат в основном Перу и Эквадора. Прибрежное Эль-Ниньо напрямую не связано с «глобальным» явлением ЭНЮК [147—150]. За последние 150 лет произошло около четырех очень сильных глобальных событий ЭНЮК: в 1877—78, 1982—83, 1997—98 и 2014—16 годах; и около четырех прибрежных событий Ниньо: в 1891, 1925, 2017 и 2023 годах. [147, 148, 151].

В отличие от глобального Эль-Ниньо, обусловленного динамикой пассатной циркуляции, прибрежное явление Эль-Ниньо больше связано с миграцией внутритропической зоны конвергенции к югу от экватора около побережья Америки и наличия интенсивной полосы дождей в южноамериканской экваториальной части Тихого океана. В обоих явлениях происходит потепление поверхности океана, но если в глобальном Эль-Ниньо затронутый слой воды составляет около 100 метров, то в прибрежном Эль-Ниньо этот слой составляет около 30 метров, что делает прибрежное Эль-Ниньо гораздо более динамичным и кратковременным [152]. На рисунке 3.15 представлено распределение аномалий

ТПО во время интенсивных явлений ЭНЮК и ПФЕН в различные годы. Площади аномалий ТПО, занятых во время ЭНЮК, в разы больше, чем аномалии ТПО во время ПФЕН.

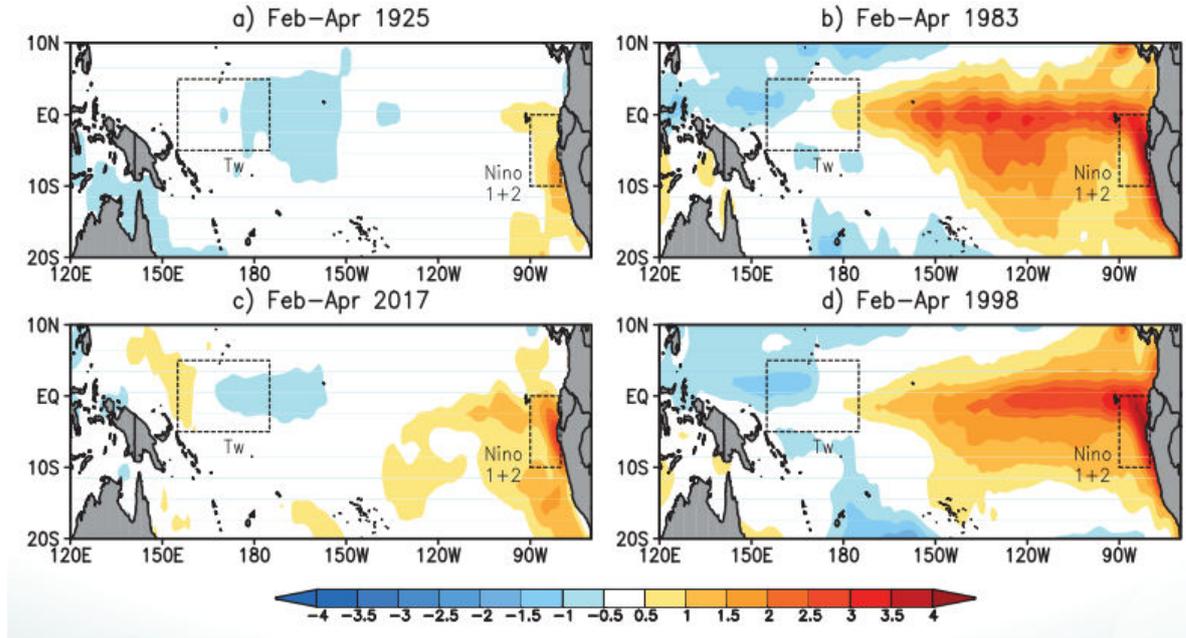


Рисунок 3.15 – Аномалия SST во время прибрежного Эль-Ниньо в марте 2017 г. (слева) и глобального Эль-Ниньо в декабре 1997 г. (справа) [152].

В работе [7] рассматриваются особенности распределения аномалий скорости ветра, хлорофилла и ТПО в области ПА и юго-восточной части океана для периода экстремального Эль-Ниньо в декабре 1997 г. — марте 1998 г. (рисунок 3.16). Нетрудно видеть, что очаг аномалий ТПО более $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ тянется узкой полосой вдоль побережья от 16° ю.ш. до 4° ю.ш., где он расширяется и устремляется в открытый океан. Отрицательные аномалии хлорофилла практически находятся в прибрежной полосе экстремальных значений ТПО. В этой полосе преобладает умеренный ветер северо-западного направления.

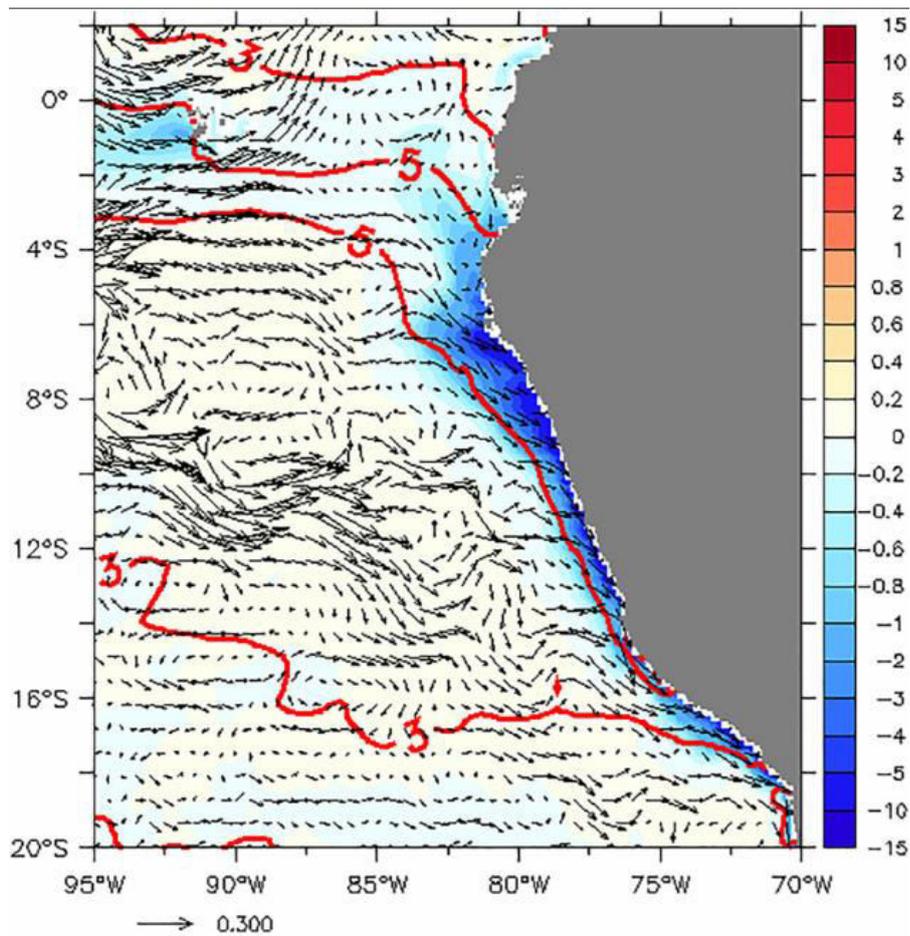


Рисунок 3.16 – Распределение скорости ветра у поверхности океана (стрелки, в м/с), аномалии хлорофилла на поверхности (цветовая шкала, в мг/м^3) и аномалии температуры поверхностного слоя воды (красные линии, обозначающие +3 и +5 °С) в декабре 1997 г. — марте 1998 г. Аномалии рассчитаны относительно периода 1958—2008 гг. [7].

Во время экстремальных явлений Эль-Ниньо и значительного роста ТПО и концентрации растворенного кислорода на поверхности океана в зоне ПА происходит заглубление главного термоклина. В результате его углубления происходит сокращение поступления питательных веществ в эвфотическую зону и, как следствие, снижение первичной продуктивности и размножения планктона. Это снижение оказывает негативное влияние на все уровни пищевой цепи. Больше всего повышение температуры в области ПА сказывается на размере популяции анчоуса, которая резко сокращается [68, 153]. Подтверждением этому служит рисунок 3.17, который наглядно демонстрирует, что экстремальные явления Эль-Ниньо оказывают существенное негативное воздействие на вылов анчоусов.

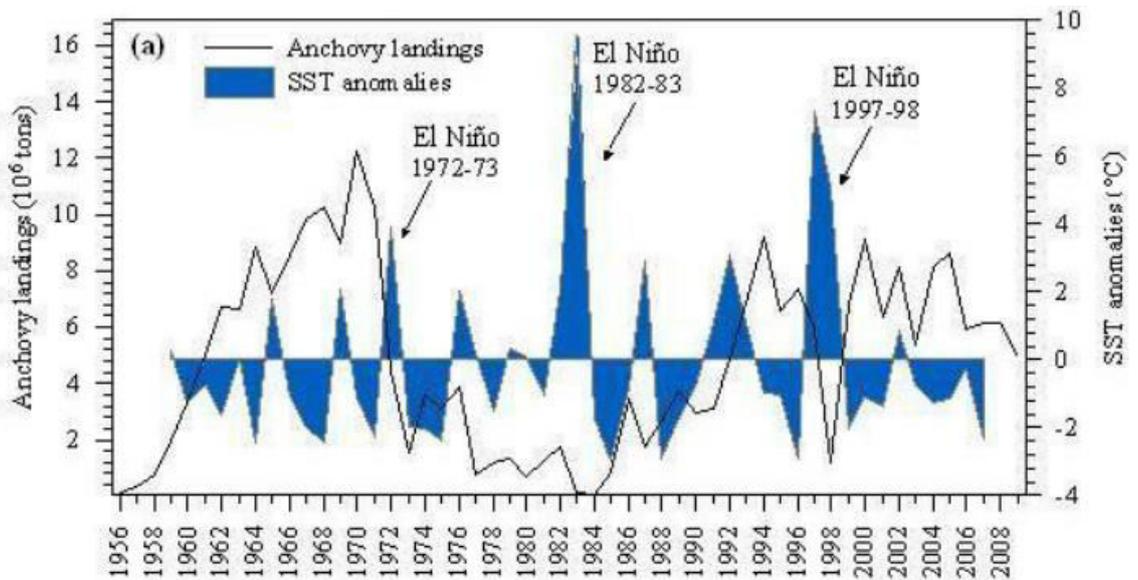


Рисунок 3.17 – Вылов перуанских анчоусов, аномалии температуры поверхности океана (ТПО) и три экстремальных явления Эль-Ниньо с 1956 года [154].

В работах [154—156] было показано, что морское расширение полосы высокой продуктивности уменьшается в годы Эль-Ниньо. Это сопровождается углублением высоко насыщенного кислородом поверхностного слоя воды и зоны минимального содержания кислорода ниже. Виды, которые зависят от насыщенных кислородом условий поверхностных вод, затем расширяют свой диапазон глубин или концентрируются на больших глубинах. При этом некоторые виды, такие как ставрида [157] и анчоус [158, 159] меняют свои миграционные пути и распределение мест нагула.

На рисунке 3.18 приводятся оценочные объёмы зоопланктона и биомассы перуанского анчоуса (*Engraulis ringens*) для перуанской зоны апвеллинга за период 1963—2002 гг. До 1973 г. предполагаемые объёмы зоопланктона были высокими и составляли почти $> 0,8$ мл/м³. Затем эти значения снизились до $< 0,2$ мл/м³ в середине 1970-х годов и медленно увеличивались до уровней почти $0,4$ мл/м³ в течение следующих 20 лет. Из рисунка 3.17 следует, что прямой связи между уровнем зоопланктона и биомассой анчоуса не наблюдалось. Эти данные наблюдений свидетельствуют, что потребление кормовыми рыбами (анчоус и скумбрия) в значительной степени контролирует численность зоопланктона в перуанской системе апвеллинга, что характерно для контроля морской пищевой

сети по типу «осиная талии» [3, 160]. Тогда, очевидно, зоопланктон важен для поддержания популяций кормовых рыб во всей экосистеме Гумбольдта.

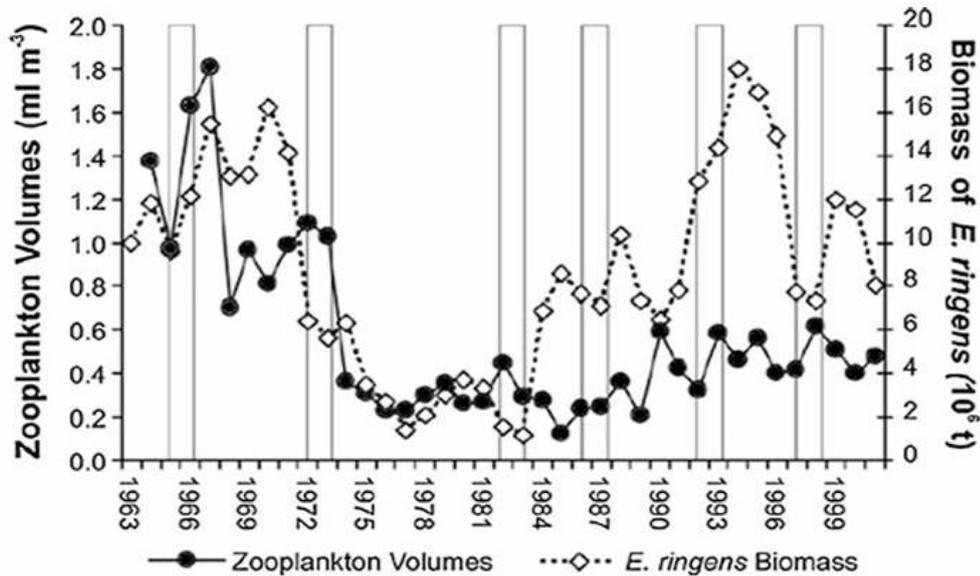


Рисунок 3.18 – Оценочные объёмы зоопланктона и биомасса перуанского анчоуса (*Engraulis ringens*) для перуанской зоны апвеллинга за период 1963–2002 гг. Вертикальные прямоугольники показывают время появления интенсивных явлений Эль-Ниньо [161].

Кроме того, из рисунка 3.18 видно, что Эль-Ниньо оказывало значительное негативное влияние на биомассу анчоуса на протяжении многих лет у берегов Перу. Возможно, что популяция перуанского анчоуса способна выживать благодаря своей способности мигрировать и чередовать два различных режима питания: фильтрация более мелких частиц и поедание более крупных [162], что позволяет анчоусу справляться с его крайне изменчивой средой. Известно, что анчоус всеяден, питается как фитопланктоном, так и зоопланктоном, даже макрозоопланктоном [163—165], однако уровень питания фито- или зоопланктоном все еще обсуждается [166].

Отметим, что Эль-Ниньо приводит к миграции анчоусов и нарушению всей экосистемы, которая адаптируется к новым океанографическим условиям. Например, на первом этапе Эль-Ниньо (апрель 1997 г.) биомасса анчоусов была распространена вдоль всего побережья Перу. Впоследствии, летом 1998 г. (самый высокий пик Эль-Ниньо 1997—1998 гг.), произошло резкое снижение биомассы анчоусов, которая была обнаружена к югу от 13° ю.ш. (рисунок 3.19), а основная часть уловов происходила между 16° и 18° ю.ш.

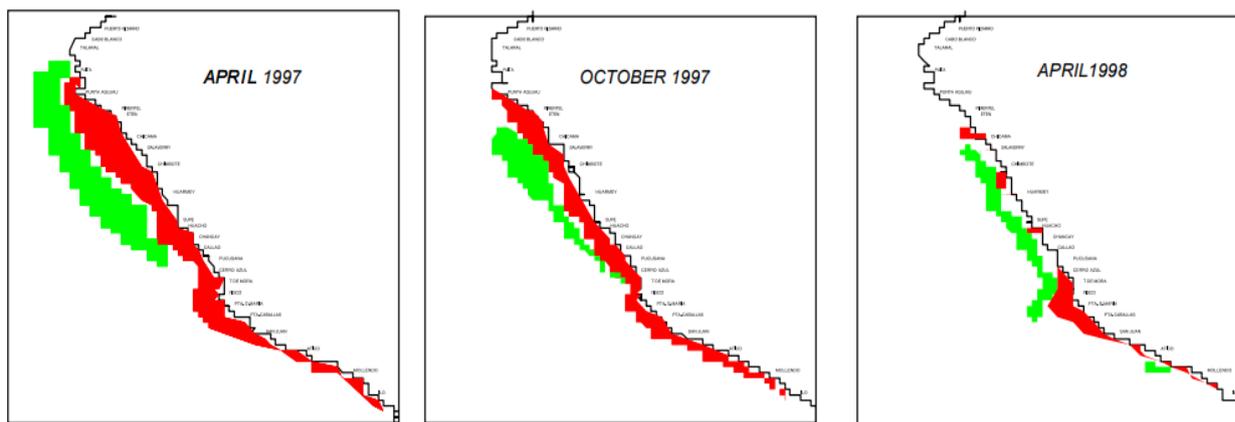


Рисунок 3.19 – Изменения в распределении анчоусов и сардин в период с апреля 1997 г. по июнь 1998 г. Красным цветом отмечена биомасса анчоуса, зеленым – биомасса сардин. [153].

В работе [167] рассмотрены изменения в локализации участков промысла и величине вылова основных промысловых гидробионтов в Перуанском подрайоне в годы с Эль-Ниньо и при его отсутствии. Показана «активная реакция» промысла на изменяющиеся условия среды в периоды Эль-Ниньо, проявляющаяся в смещении участков промысла на меньшие глубины, особенно в пределах исключительной экономической зоны Перу.

В 2023 году из-за 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. При этом в середине 2024 г. цена тонны рыбной муки на мировом рынке достигла \$2 тыс., а жира — \$5,5 тыс. 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 %.

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 [168, 169], 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 [4].

Системы апвеллинга характеризуются высокой концентрацией неорганических питательных веществ, таких как нитраты (NO_3^-), фосфаты (PO_4^{3-}) и силикаты (SiO_2^{4+}), которые обнаруживаются в концентрациях, превышающих необходимые для их усвоения организмами. Концентрация этих питательных веществ является одним из факторов, влияющих на рост морского сообщества, но также важны их распределение и изменчивость. Кроме того, поверхностные воды, подверженные сильному апвеллингу, характеризуются низкими значениями $\text{Si}(\text{OH})_4$ (+2 %) из-за низкого использования Si, но относительно высокими значениями NO_3^- (+13 %) из-за апвеллинга вод, подверженных процессам потери азота [170].

Средние диапазоны содержания питательных веществ на поверхности, зарегистрированные на побережье Перу, составляют: 0,2—4,0 μM PO_4^{2-} ; 0,0—35,0 μM NO_3^- ; 0,0—30,0 μM SiO_2^{4+} [171, 172]. Самые высокие концентрации питательных веществ у берегов Перу наблюдаются вблизи побережья, что

обусловлено поступлением восходящих вод, переносом течениями и биогеохимическими процессами, которые восстанавливают и/или потребляют питательные вещества в эвфотическом слое. Кроме того, этот район характеризуется наличием высоких концентраций питательных веществ в форме «языков» или шлейфов, наблюдаемых у берегов Перу [172, 173]. Эти «языки» холодной воды объясняются океанографической динамикой региона, связывая их с вихреобразными структурами (циклоническими и антициклоническими), ограниченными по горизонтали 50 км и менее [35, 174].

Значения нитратов на расстоянии до 50 миль от берега находятся в диапазоне от 20,0 μM до 0,5 μM , снижаясь почти до нуля в океанских водах. Как и в случае с силикатами, их концентрация высока в водах, недавно вынесенных на поверхность, но цветение фитопланктона может полностью их истощить [36]. Регенерация силикатов в поверхностных слоях минимальна, это первый питательный элемент, который истощается, и может ограничивать возможности фитопланктона [175]. На центральном побережье Перу были обнаружены доказательства того, что силикаты существенно коррелируют с численностью диатомовых водорослей, особенно весной (октябрь— декабрь) [176].

Отметим, что в океанских водах были зарегистрированы условия высокого содержания нитратов и низкого содержания хлорофилла. Исследования, проведенные у берегов Перу, показывают, что вдоль южного побережья и в открытом океане условия характеризуются низким содержанием биодоступного железа, что может ограничивать биопродуктивность, несмотря на высокую концентрацию нитратов [177, 178].

Вертикальное распределение питательных веществ является результатом текущих физических и биологических процессов, таких как циркуляция, наличие различных водных масс, события апвеллинга, биологические процессы (поглощение фитопланктона, выделение) и биогеохимические процессы (снижение нитратов, реминерализация). Изменчивость этих физических, химических и биологических процессов приводит к различиям в их вертикальных профилях (рисунок 4.1). Так, поверхностный слой водной толщи характеризуется

подъемами и спадами, связанными с процессами апвеллинга (богатые питательными веществами восходящие воды) и/или фотосинтетической активностью (поглощение питательных веществ).

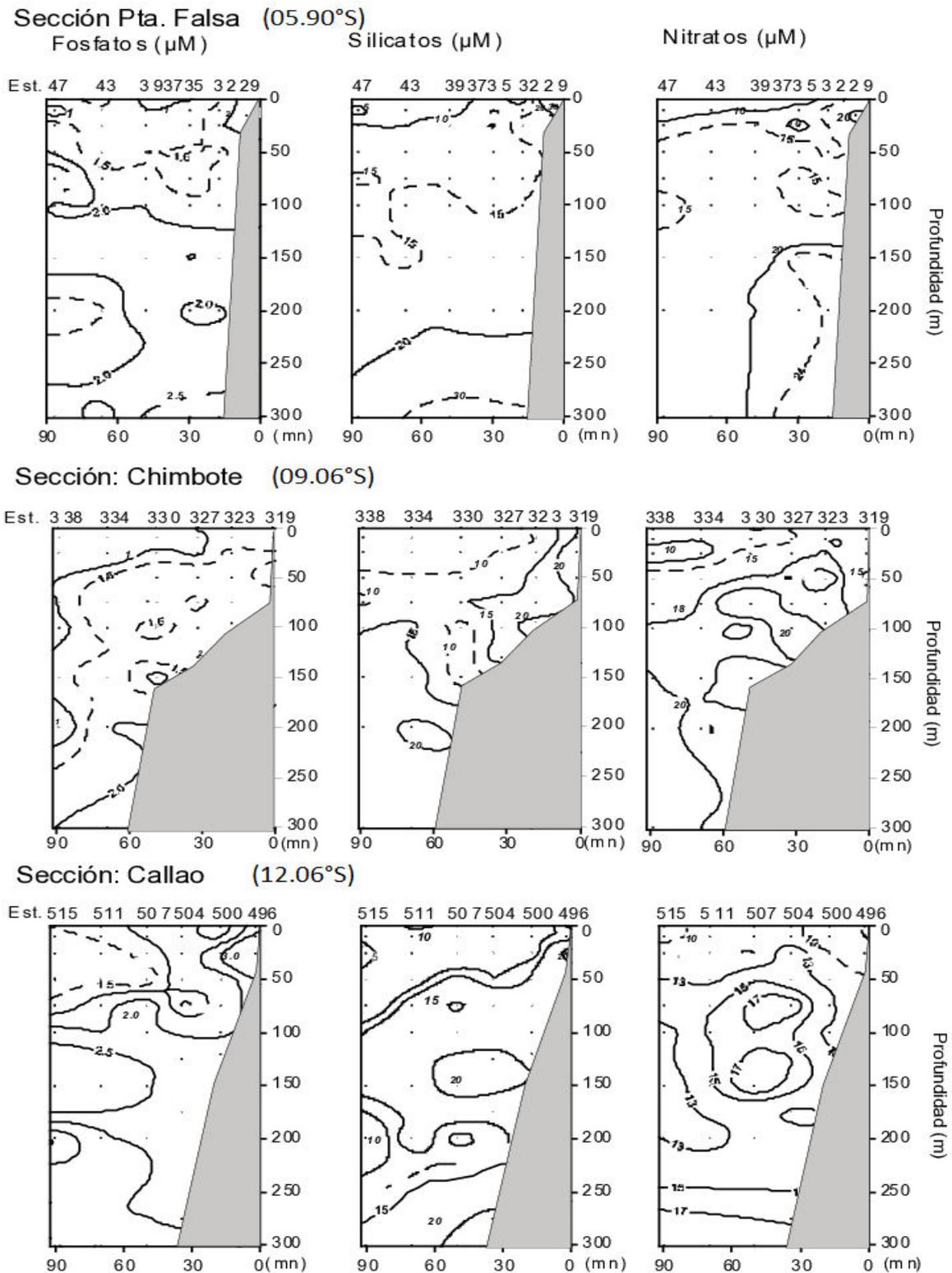


Рисунок 4.1 – Вертикальное распределение питательных веществ (фосфатов, силикатов и нитратов) на разных широтах у побережья Перу [179].

В промежуточных слоях высокие уровни нитратов свидетельствуют о сильном влиянии подповерхностных экваториальных вод или глубоких экваториальных вод, особенно в слое между 100 и 300 м [36]. Подповерхностное снижение нитратов связано с биогеохимическими процессами. В случае силикатов и фосфатов самые высокие уровни, возникающие в придонных водах и контактирующие с шельфом, связаны с латеральным переносом, взаимодействием с бентосом и высокими темпами реминерализации органического вещества, которые там происходят.

Кроме того, в работе [170] приводятся доказательства того, что процессы апвеллинга и наличие вихрей играют важную роль в контроле питательных циклов и, следовательно, также оказывают большое влияние на сообщества фитопланктона в Перуанском апвеллинге.

На рисунке 4.2 приводится вертикальный разрез изменчивости питательных веществ в центральном Перу (12° ю.ш.), который показывает, что во время явления ЭНЮК в 1997—98 гг. концентрации питательных веществ (силикаты и фосфаты) значительно снизились, особенно между весенними и летними месяцами (октябрь 1997 г. — март 1998 г.) по сравнению со значениями, наблюдаемыми в годы, когда явление ЭНЮК не наблюдалось [180—182]. К концу 2001 года наблюдалось наличие относительно низких значений этих питательных веществ, что совпало со слабым событием ЭНЮК [183].

У берегов Перу было идентифицировано 169 видов диатомовых водорослей, что составляет 12 % от общего числа видов, зарегистрированных в мире [184]. Диатомовые водоросли являются важными производителями в пищевой цепи. Информация о хлорофилле-А, предоставленная со спутника, иногда занижает данные *in situ*; однако они предоставляют надежную информацию для понимания и мониторинга системы апвеллинга у побережья Перу [185].

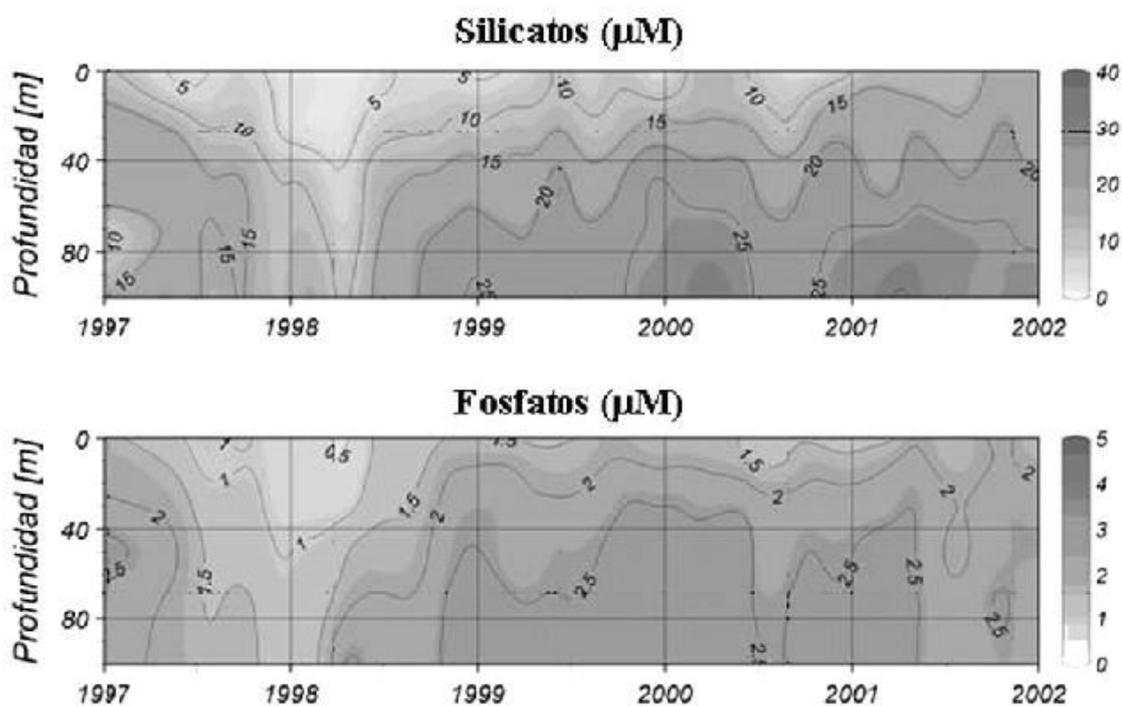


Рисунок 4.2 – Изменчивость силикатов и фосфатов (миллимоляр на литр) у побережья центральной зоны Перу [181].

На рисунке 4.3 показаны пространственные и временные изменения первичной продуктивности в крупной морской экосистеме течения Гумбольдта. По крайней мере, четыре региона можно описать вдоль нее на основе первичной продуктивности морской прибрежной зоны и офшорного расширения. Самая продуктивная область расположена у побережья Перу, в которой офшорное расширение прибрежного продуктивного пояса колеблется от 100 до 200 км, со средней годовой скоростью первичной продукции $1,2 \text{ кг С м}^{-2}\text{г}^{-1}$. Следующая по продуктивности область у побережья Центрального Чили, где средняя годовая скорость первичной продукции также превышает $1 \text{ кг С м}^{-2}\text{г}^{-1}$, но с более сильными сезонными изменениями. Северное чилийское побережье представляет собой самую узкую продуктивную область ($< 50 \text{ км}$), состояние «высокие питательные вещества, низкий уровень хлорофилла-а», с годовой скоростью первичной продукции около $0,66 \text{ кг С м}^{-2}\text{г}^{-1}$ и низкой сезонностью [186]. Магелланов регион, включающий неритические и фьордовые воды, демонстрирует низкую среднегодовую скорость первичной продукции (около $0,58 \text{ кг С м}^{-2}\text{г}^{-1}$) и большую сезонность [187—189].

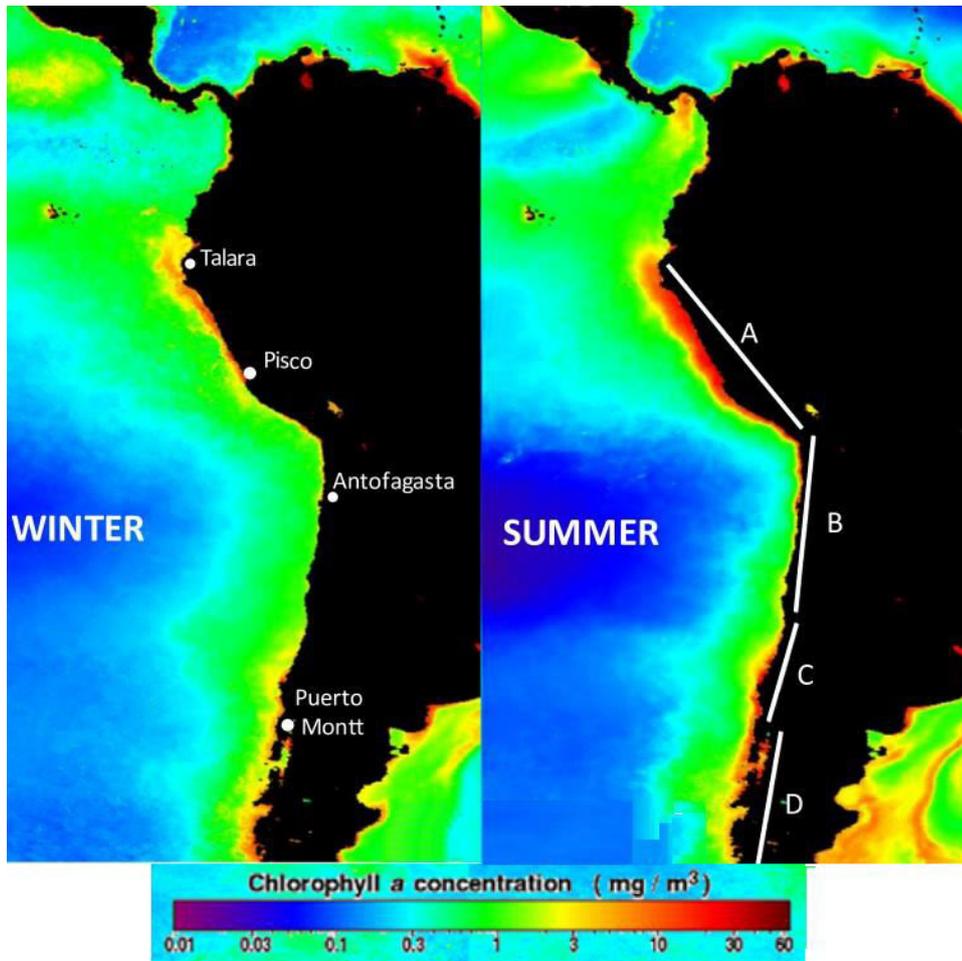


Рисунок 4.3 – Средние концентрации хлорофилла-а на поверхности в течение южного лета (январь—март) и зимы (июнь—август) у западного побережья Южной Америки. Спутниковое изображение из работы [190].

В таблице 4.1 приведены оценки средних годовых показателей первичной продукции в четырех областях прибрежного продуктивного пояса вдоль большой морской экосистемы течения Гумбольдта. Нетрудно видеть, что связь между годовыми циклами прибрежной продуктивности и физическим воздействием различается в этих областях [187]. В самой южной области поверхностный хлорофилл-а достигает пика весной, следуя модели пика весенней продукции, ограниченной питательными веществами, биологического производства, которая применяется в биомах западных ветров, как определено [191]. Дальше на север (область С) хлорофилл-а достигает пика летом, когда направление ветров вдоль берега становится благоприятным для прибрежного апвеллинга и адвекции питательных веществ в поверхностный слой [187, 192].

Таблица 4.1 – Средние годовые показатели первичной продукции в четырех областях прибрежного продуктивного пояса вдоль большой морской экосистемы течения Гумбольдта. Области А—С относятся к системе течения Гумбольдта, а область D к системе Магелланова течения

Область	Широта	Протяженность побережья (км)	Первичная продукция (гС м ⁻² г ⁻¹)	Литература
А	04° S—18° S	150	1235 ± 513	[186]
В	18° S—33° S	40	658 ± 527	[186]
С	33° S—42° S	100	1051 ± 708	[186]
D	42° S—55° S	150	574 ± 484	[187—189]

На рисунке 4.4 показан годовой цикл поверхностного хлорофилла-а (Chl-a), ветров, благоприятных для прибрежного апвеллинга, и ТПО в районе центрального Перу (в районе Писко, 14° ю.ш.), относящихся к области А. Видно, что первичная продукция находится в противофазе с интенсивностью ветров, которые постоянно благоприятны для прибрежного апвеллинга и более интенсивны зимой (июль—сентябрь). Этот очевидный парадокс, вероятно, объясняется ограничением света из-за более глубокого перемешивания ветра, что снижает производительность роста первичных производителей [172, 193]. Летом (январь—март), когда прибрежный апвеллинг все еще происходит, но менее интенсивен, за релаксацией апвеллинга следует термическая стратификация, которая способствует цветению фитопланктона. Наконец, для объяснения постоянного состояния зоны В с высоким содержанием питательных веществ и низким содержанием хлорофилла было высказано предположение, что сильная и быстрая адвекция поднятых вод в море здесь не позволяет фитопланктону воспользоваться высокой концентрацией питательных веществ в прибрежной зоне [194].

Современные знания подтверждают преобладание классической пищевой сети, поддерживаемой цепочечными диатомовыми водорослями, веслоногими ракообразными и эвфаузидами [10, 195, 196].

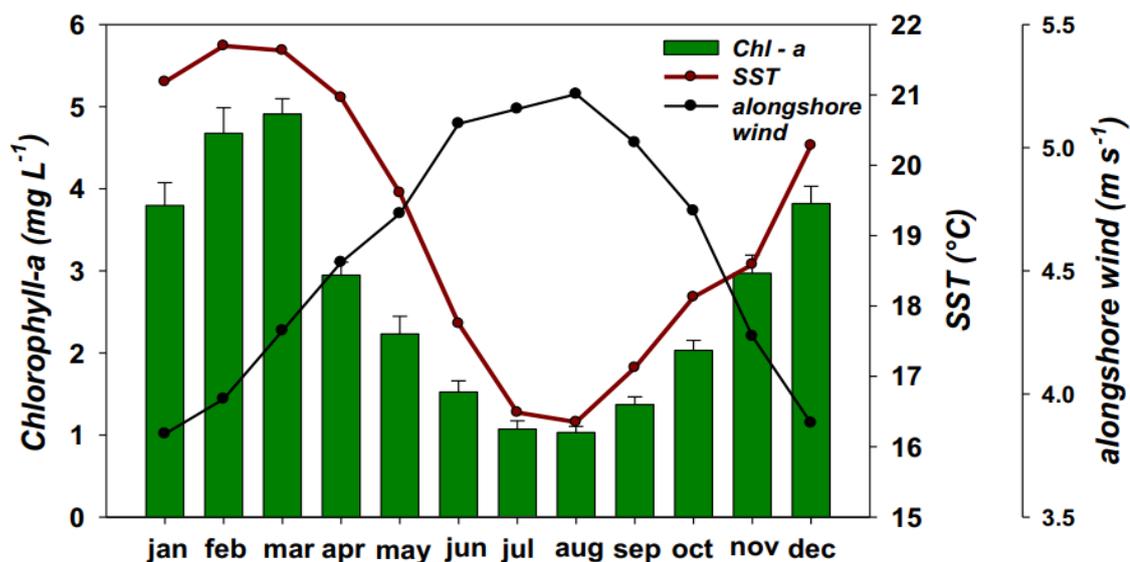


Рисунок 4.4 – Первичная продукция, ветровое воздействие и ТПО у берегов Писко (14° ю.ш.) [18].

Экосистема «снизу вверх» относится к экологической концепции, в которой экосистемы в первую очередь регулируются доступностью питательных веществ, света или воды, которые влияют на первичную продукцию и впоследствии влияют на другие функции экосистемы. Экосистема «осиная талия» похожа на нее в другом отношении; ожидается, что промежуточный трофический уровень будет контролировать численность хищников через взаимодействие «снизу вверх» и численность добычи через взаимодействие «сверху вниз» [160]. Как модели экосистем «снизу вверх», так и модели экосистем «осиная талия» могут использоваться в качестве основных механизмов трофической динамики в системе течения Гумбольдта из-за исключительных биомасс, достигаемых эвфаузидами и мелкими пелагическими рыбами, питающимися кормом [3, 197].

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 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.

В работе [20] использовались наблюдения за ТПО и ветре с торговых судов вдоль восточного побережья Атлантики между 7° и 44° с.ш. Были рассчитаны среднемесячные значения температуры поверхности моря и ее разность со значениями в середине океана, перенос Экмана в открытом океане и поверхностное течение восточного побережья Северной Атлантики. Несмотря на то, что распределение переноса Экмана в открытом море и разницы температур примерно совпадают, анализ относится только к средним условиям на больших территориях, и даже там он недостаточен для объяснения расширения дефицита прибрежной температуры в открытом море. В работе [21] использовались спутниковые данные о ТПО и ветре для северо-западной африканской области апвеллинга. На основании того, что апвеллинг происходит на шельфе, выбирались оценки ТПО для середины шельфа, т. е. примерно между побережьем и контуром глубины 200 м. Затем была выбрана параллельная позиция в зональном направлении от берега произвольно до 500 км. В [22] также использовали спутниковую ТПО северо-западной африканской области апвеллинга, однако индекс апвеллинга трудно определить для широтно-изменяющихся моделей, где встречаются различные водные массы. Проблема состоит в том, что нет четкого понимания как оценить исходную температуру апвеллинга воды до того, как она достигнет поверхности моря.

Однако основным недостатком этих методов является неоднозначность пространственного выбора широтных границ. Более обоснованным является индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г. [23], 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 [15] метод оценки интегрального ИА, позволяющий косвенно учитывать вертикальный поток массы на уровне глубины трения.

Суть его 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 расчета индекса апвеллинга

Теория дрейфового (ветрового) течения была предложена Экманом еще в 1905 году, однако она не потеряла своего значения до настоящего времени. Теория Экмана используется для определения дрейфовых течений под действием силы ветра в открытом океане. Ветер создаёт силу трения на поверхности океана, которая увлекает за собой верхние 10–100 метров водной толщи. Однако из-за влияния силы Кориолиса при движении океанских вод на них действует сила, направленная под углом 90° к направлению движения, из-за чего вода движется под углом к направлению ветра. Направление переноса зависит от полушария:

в Северном полушарии перенос происходит по часовой стрелке от направления ветра, а в Южном полушарии — против часовой стрелки. Перенос Экмана оказывает значительное влияние на биогеохимические свойства Мирового океана. Это связано с тем, что он может приводить к апвеллингу, т.е. подъему водных масс вверх или к даунвеллингу (их опусканию), так как это необходимое условие для соблюдения законов сохранения массы.

Согласно теории Экмана, вектор скорости дрейфового течения на поверхности отклоняется на угол 45° влево (южное полушарие) относительно направления напряжения трения ветра. Однако на практике этот поворот может меняться в диапазоне $10^\circ - 65^\circ$. С увеличением глубины вектор течения по абсолютной величине уменьшается по экспоненциальному закону, а по направлению все больше поворачивает вправо. На некоторой глубине вектор течения оказывается направленным на угол 180° , т.е. в сторону, обратную вектору поверхностного течения. На этой глубине скорость составляет всего $1/23$ скорости поверхностного течения, что составляет примерно $4,3\%$. Она называется «глубиной дрейфового течения», или просто глубиной трения,

В соответствии с работой [15] кратко рассмотрим на основе теории Экмана методику оценки интенсивности процесса апвеллинга. С этой целью воспользуемся уравнением водного баланса верхнего слоя океана, которое запишем следующим образом:

$$\partial V / \partial t + \text{div} F_w = E - P + \xi_z \quad (4.1)$$

где первый член слева означает изменение объема этого слоя, второй член — результирующий отток (приток) горизонтального потока массы. Справа разность $E - P$ (эффективное испарение) означает приток/отток влаги через поверхность океана, а величина ξ_z — поток водной массы через нижнюю границу z выделенного верхнего слоя океана. При этом поток вверх 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 4.5.

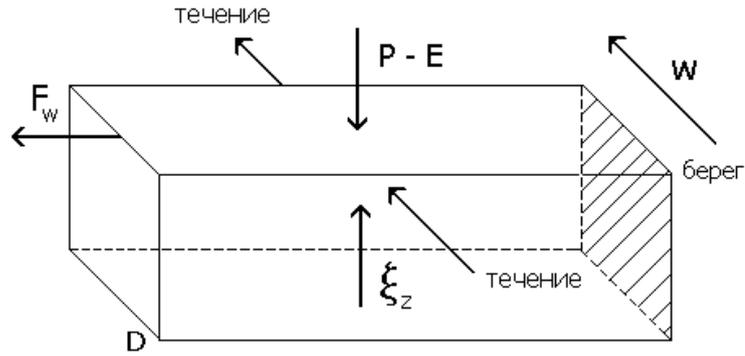


Рисунок 4.5 – Схема водных потоков в верхнем слое океана до глубины трения D в области апвеллинга.

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 уравновешивается ее результирующим горизонтальным потоком, то есть

$$\text{div}F_w = \xi_z, \quad (4.2)$$

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:

$$\text{div}F_w = \frac{1}{A} \int_L F_n dL, \quad (4.3)$$

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, по сути, является индексом апвеллинга. Представим теперь формулу (4.3) в конечных разностях в виде:

$$IA = \text{div}F_w = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n l_j \frac{(F_j + F_{j+1})}{2}, \quad (4.4)$$

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}). Итак, при дивергенции, т.е. расхождении потоков водной массы, для сохранения уравнения водного баланса должен происходить вертикальный поток воды вверх на глубине трения ξ_z .

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:

$$F_{wx} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi} \quad F_{wy} = \frac{V_o D \rho \sqrt{2}}{2\pi} = \frac{\tau_u}{2\Omega \sin \varphi}, \quad (4.5)$$

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. Величина $\tau_{u,v}$ определяется следующим образом:

$$\tau_u = \rho_a C_d u^2 \quad \tau_v = \rho_a C_d v^2 \quad (4.6)$$

где ρ_a – средняя плотность воздуха, u и v – зональная и меридиональная компоненты скорости ветра в приводном слое, C_d – коэффициент трения, для оценки которого при стратификации, близкой к нейтральной, может быть принята линейная зависимость от средней скорости ветра [198]:

$$C_d = (a + b\bar{V}) \cdot 10^{-3}, \quad (4.7)$$

В этой же работе содержится довольно подробный обзор возможных параметризаций C_d . Нами было принято $a = 0,63$, $b = -0,066$. Отметим, что глубина экмановского слоя D определялась по известной формуле:

$$D = \pi \sqrt{\frac{\mu}{\rho \sin \varphi}}, \quad (4.8)$$

где $\mu = 0,43W^2$ – динамический коэффициент турбулентной вязкости (W – модуль скорости приводного ветра).

Итак, зональная компонента дрейфового потока массы рассчитывается по меридиональной компоненте скорости ветра, а величина F_{Wy} – наоборот, по зональной компоненте ветра. Заметим, что в работах [199, 200] в качестве индекса прибрежного апвеллинга предложено использовать величину $\text{ИПА} = \frac{\tau_v}{2\Omega \sin \varphi}$, которая рассчитывается по ветру, параллельному берегу. Нетрудно видеть, что ИПА является частным случаем ИА и позволяет учитывать лишь локальную интенсивность апвеллинга.

4.3. Пространственно-временная изменчивость индекса апвеллинга

Как было указано в главе 2, источником информации по скорости ветра в приводном слое являлся архив Reanalysis-2, имеющий пространственное разрешение $1,8^\circ \times 1,8^\circ$. Было выделено 73 точки, которые использовались для разбиения акватории ПА на 11 прямоугольных районов (рисунок 4.6). Для указанных районов по вертикально-интегрированным горизонтальным потокам водной массы по формуле (4.4) рассчитывались значения $\text{div}F_w$, которые были отнесены к центрам этих районов. Центры районов выделены на рисунке 4.6 красными кружками.

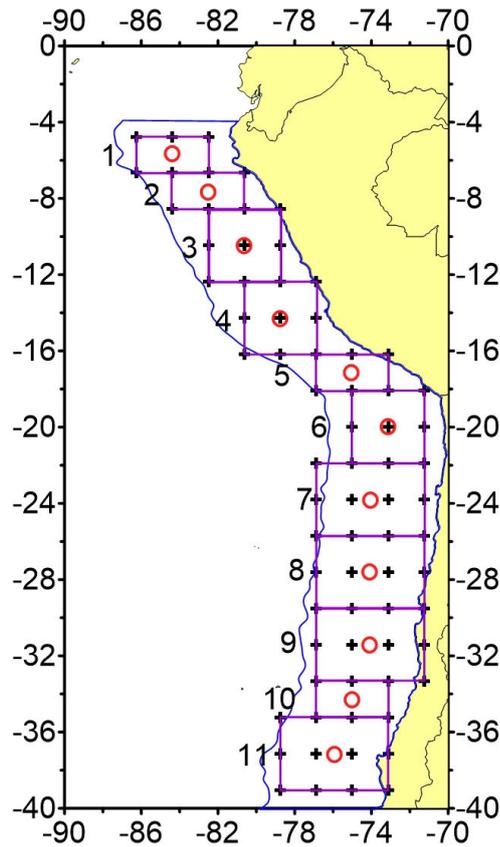


Рисунок 4.6 – Разбиение акватории ПА на 11 прямоугольных районов, для которых выполнялся расчет индекса апвеллинга по зональной и меридиональной компонентам скорости ветра, указанных крестиками [83]. Кружками показаны центры районов, в которых значения ТПО использовались в статистических моделях для выделенных районов.

Прежде всего, оценим особенности пространственного распределения зональной и меридиональной компонент среднегодовых значений скорости ветра на акватории ПА (рисунок 4.7). Как видно из рисунка 4.7 зональный перенос на большей части области ПА направлен с горного побережья в океан, поэтому имеет малые значения. Как и следовало ожидать, меридиональный поток ветра направлен на север вдоль струи Перуанского течения. Поэтому его скорость минимум в 2 раза выше зонального ветра.

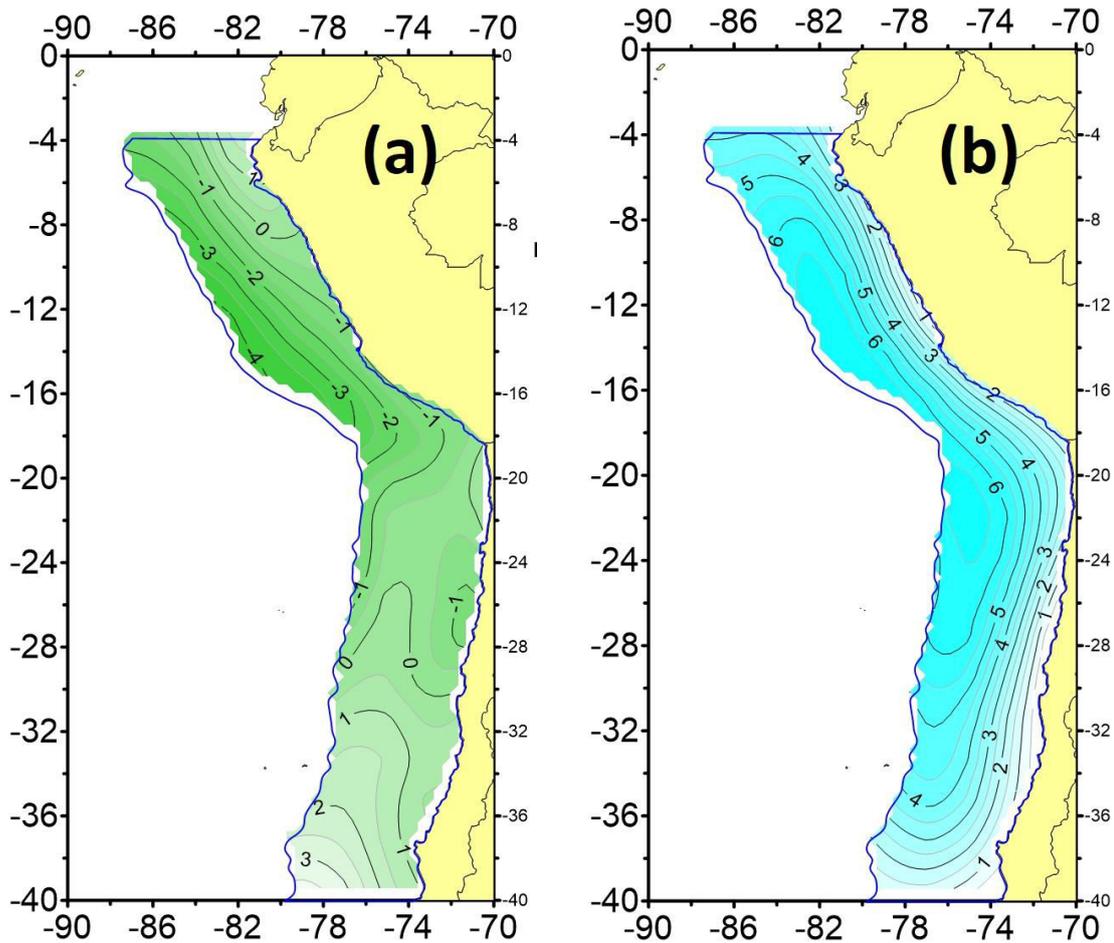


Рисунок 4.7 – Распределение среднемноголетних годовых значений зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости ветра (м/с) за период 1980—2020 гг.

Для 11 выделенных районов в области ПА были рассчитаны среднемесячные значения ИА и D за 1980—2020 гг. На рисунке 4.8 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 (74 мм), а минимум в мае (64 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 280 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 .

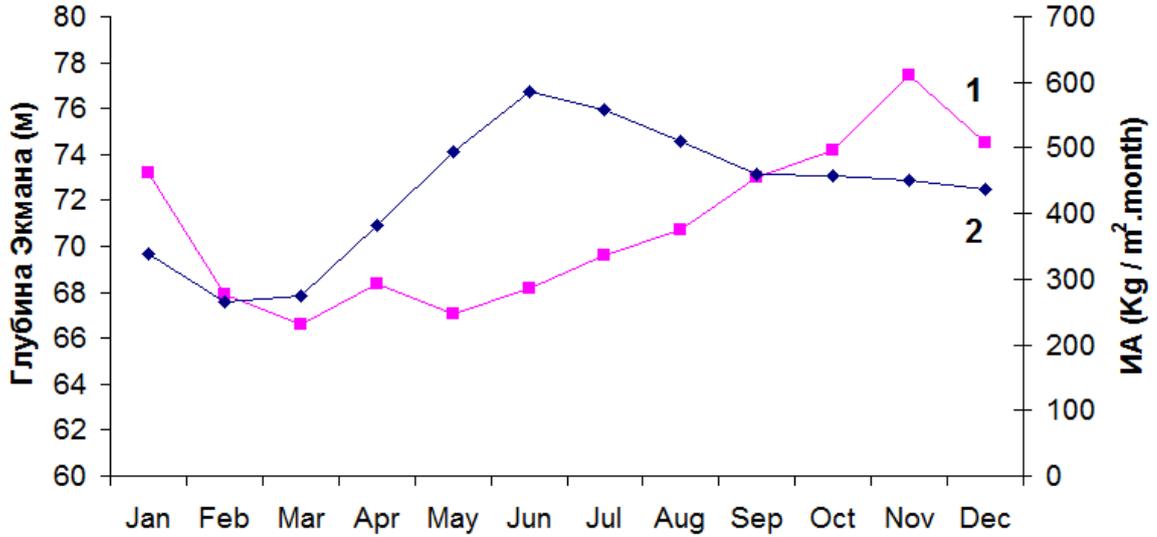


Рисунок 4.8 – Внутригодовая изменчивость глубины трения (1) в м и индекса апвеллинга (2) в (мм/мес) для всей области ПА [83].

Рассмотрим межгодовую изменчивость этих параметров. В таблице 4.2 приводятся первичные статистики ($X_{\text{ср}}$, коэффициент вариации C) и характеристики линейного тренда (угловой коэффициент a_1 и коэффициент тренда R^2). Нетрудно видеть, что глубина трения уменьшается по направлению к Антарктике почти в 4 раза. Причиной этого является значительный рост $\sin\varphi$ в формуле (4.8). 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 4.2 – 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. [83].

Район	Глубина слоя Экмана (м)				Индекс апвеллинга (мм/мес)			
	$X_{\text{ср}}$	C (%)	Тренд, м/год	R^2	$X_{\text{ср}}$	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

В отличие от глубины трения индекс апвеллинга не имеет хорошо выраженной меридиональной изменчивости, которая носит в основном случайный характер. Максимум ИА отмечается в районе 3, о котором также упоминается в работе [201], причем по обе стороны от него в районах 2 и 4 он, наоборот, минимален. Что касается межгодовой изменчивости ИА, то, напротив, она намного выше, чем в D. В большинстве районов коэффициент вариации ИА в разы выше, чем в глубине трения. Максимальная изменчивость его наблюдается в районе 2, где она превышает 100 %. Это связано с аномально низкой величиной $X_{\text{ср}}$ ИА. Исключая 2 северных района, тренд в ИА является положительным, т.е. в целом апвеллинг усиливается. Значимые тренды в основном сосредоточены в южных районах ПА. Максимальный тренд наблюдается в районе 5.

В таблице 4.3 приводится матрица корреляции годовых значений ИА и D для выделенных 11 районов. Незначимые по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ коэффициенты корреляции в таблице 4.3 не представлены. Нетрудно видеть, что наиболее высокая корреляция отмечается только для соседних районов. В среднем корреляция между ИА чуть выше, чем между значениями D. Район 7, находящийся в центре ПА, принципиально отличается от других районов тем, что значения ИА и D имеют отрицательную корреляцию с другими районами. Причины этого пока не до конца понятны.

Таблица 4.3 – Матрица корреляции для 11 районов между глубинами трения D (правый треугольник) и значениями индекса апвеллинга (левый треугольник)

Район	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,00	0,97	0,74	0,42	--	-0,47	-0,35	--	--	--	--
2	0,56	1,00	0,83	0,50	--	-0,47	-0,40	--	-0,33	--	--
3	--	0,79	1,00	0,77	--	-0,38	-0,43	--	0,35	0,37	--
4	--	0,55	0,80	1,00	0,54	--	--	--	--	0,36	0,34
5	--	--	--	0,65	1,00	0,73	0,57	0,33	--	--	--
6	--	--	--	--	0,62	1,00	0,90	0,33	-0,33	--	--
7	--	-0,63	-0,65	-0,50	--	0,36	1,00	0,36	-0,33	--	--
8	0,33	0,33	0,35	0,43	0,50	--	-0,66	1,00	0,64	0,66	0,50
9	--	0,35	0,38	0,56	0,61	--	-0,59	0,80	1,00	0,83	0,31
10	--	--	0,50	0,51	--	--	-0,45	0,55	0,71	1,00	0,72
11	--	--	0,39	0,41	--	--	--	--	--	0,51	1,00

В таблице 4.4 приводится корреляция между индексом апвеллинга и глубиной трения. Нетрудно видеть, что за исключением 8 района, корреляция между этими параметрами оказывается отрицательной: при уменьшении глубины трения происходит увеличение вертикальной скорости воды, что приводит к возрастанию вверх потока водной массы и соответственно ИА. Наиболее ярко связь между этими параметрами проявляется в районе 7, где корреляция достигает $r=-0,85$. Кроме того, в таблице 4.4 представлена корреляция значений D и ИА с ТПО в центре каждого района. Корреляция между ИА и ТПО в большинстве районов отрицательная. Это означает, что при возрастании потока более холодных водных масс вверх к поверхности температура океана понижается.

Более сложный характер связи имеет место между ТПО и D . С понижением ТПО повышается плотность морской воды, в результате чего усиливается конвекция, которая, вероятно, увеличивает глубину трения. Поэтому должна отмечаться преимущественно отрицательная корреляция между ТПО и D , однако вследствие сложности указанного процесса она является значимой лишь в 4 районах южной части ПА. Итак, все виды связи между параметрами ТПО, ИА и D имеют довольно четкую физическую обусловленность, что позволяет считать корреляцию между ними достоверной.

Таблица 4.4 – Оценки коэффициентов корреляции между индексом апвеллинга, глубиной трения и ТПО для 11 районов Перуанского апвеллинга за период 1980—2020 гг. Значимые коэффициенты корреляции выделены полужирным шрифтом [83].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r(D, ИА)$	-0,05	-0,29	-0,69	-0,22	-0,34	-0,60	-0,85	0,45	-0,25	-0,70	-0,22
$r(ТПО, ИА)$	-0,07	-0,41	-0,39	-0,50	-0,38	-0,03	0,48	-0,41	-0,13	0,21	-0,04
$r(D, ТПО)$	-0,12	0,02	0,23	-0,16	-0,14	-0,34	-0,66	-0,69	-0,43	-0,31	-0,20

Матрицы годовых значений ИА и D размером 11×41 были подвергнуты разложению методом ГК. Первые собственные числа этих полей описывают 43 и 38 % дисперсии исходных матриц. Вторые собственные числа дают существенно меньший вклад (16 и 27 %) в дисперсию полей ИА и D. На рисунке 4.9 приводится межгодовой ход 1 ГК ИА и D, которые характеризуют наиболее крупномасштабные особенности изменчивости параметров ИА и D всей области ПА. Для обеих ГК характерно наличие ярко выраженных нелинейных трендов. Значения ИА возрастают до 2006 г, а затем резко убывают. Глубина трения, наоборот, вначале уменьшается до 2002 г. затем растет, причем наиболее сильно в последние годы. Корреляция исходных временных рядов составляет -0,70, но даже после исключения трендов она остается отрицательной и значимой. Максимальный вклад в 1 ГК ИА имеет ИА в 4 районе ($r=-0,83$), отсутствует корреляция только для ИА в 6 районе. Максимальная корреляция глубины трения с 1 ГК отмечается для 2 и 3 районов ($r=-0,86$), её отсутствие — для 5 района.

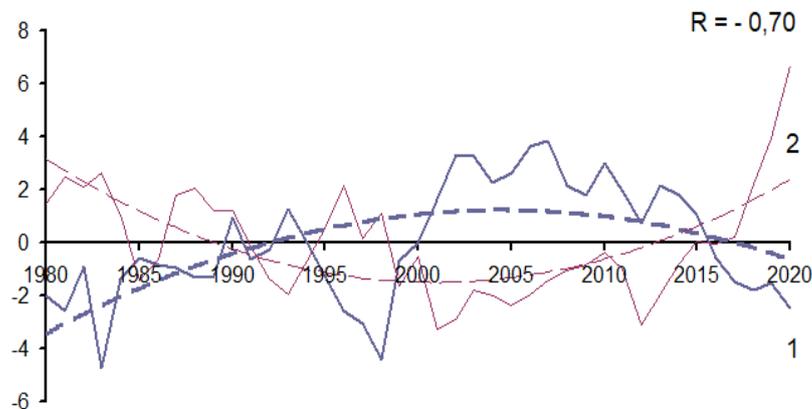


Рисунок 4.9 – Межгодовой ход 1 ГК индекса апвеллинга (1) и глубины трения D (2). Прерывистыми линиями показаны нелинейные тренды.

5. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса

5.1. Классификация морских прогнозов

В общем случае *прогноз* – это в той или иной мере обоснованное заключение о предстоящем развитии (изменении) рассматриваемого процесса или явления. Очевидно, излишне говорить о важности прогнозов вообще и, гидрометеорологических прогнозов, в частности. Действительно, именно гидрометеорологические прогнозы, в том числе и морские прогнозы, являются важнейшим конечным практическим итогом гидрометеорологии как науки. В настоящее время трудно представить себе какую-либо отрасль экономики, связанную с океаном, которая бы не использовала те или иные виды морских прогнозов. Разработка методов долгосрочного (с заблаговременностью месяц, сезон, год и более) прогноза биологической и промысловой продуктивности вод и факторов их обуславливающих относится к числу важнейших проблем промысловой океанологии.

Рассмотрим классификацию морских прогнозов по наиболее важным таксономическим признакам, к которым, относятся заблаговременность прогноза и методы их составления [89]. По заблаговременности морские прогнозы целесообразно разделить следующим образом (рисунок 5.1):

- сверхкраткосрочные прогнозы заблаговременностью не более 3 ч;
- краткосрочные прогнозы заблаговременностью от нескольких часов до нескольких суток;
- среднесрочные прогнозы заблаговременностью в диапазоне 5–15 сут;
- долгосрочные прогнозы заблаговременностью от нескольких недель до года;
- сверхдолгосрочные прогнозы заблаговременностью в диапазоне от года до нескольких десятилетий;
- климатические прогнозы, заблаговременностью 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 (рисунок 5.1). Естественно, такое разделение в определенной степени условно, поскольку некоторые методы трудно отнести к конкретной группе. Особенно это касается разграничения физико-статистических и статистических методов. Действительно, почти все работы, в которых дается хотя бы качественное объяснение предикторам, включаемым в прогностическую модель, часто выдаются за физико-статистический метод. Так, в прогностической практике широкое распространение получили методы, основанные на учете атмосферной циркуляции, характер которой определяет одновременно динамическое и тепловое состояние атмосферы, а также интенсивность переноса воздушных и водных масс [202].



Рисунок 5.1 – Классификация морских прогнозов по заблаговременности и методам составления [89].

Отметим, что именно статистические, а также вероятностные методы получили наиболее широкое распространение при долгосрочном прогнозировании тепловых характеристик океана применительно к условиям рыбного промысла [203—208].

Применительно к долгосрочному прогнозу температуры воды, являющейся важнейшим абиотическим фактором формирования биопродуктивности морских вод, основой физико-статистического метода, очевидно, должно быть уравнение теплового баланса океана [89]. В этом случае основными факторами, непосредственно влияющими на колебания ТПО, служат компоненты теплового баланса верхнего слоя океана, которые можно назвать *первичными предикторами*, в то время как факторы, определяющие формирование самих компонент теплового баланса и, следовательно, опосредованно воздействующие на ТПО, являются *вторичными предикторами*. К последним относятся перепад температуры в приводном слое атмосферы и скорость ветра, определяющие колебания потоков явного и скрытого тепла, а также облачность, влагосодержание, прозрачность, температура и ряд других атмосферных характеристик, формирующих радиационный баланс.

Кроме того, помимо атмосферных предикторов чрезвычайно важно учитывать океанические факторы, определяющие адвекцию тепла течениями, а в районах интенсивной конвекции и апвеллинга – и вертикальный перенос тепла. К сожалению, прямая оценка этих компонент теплового баланса, особенно за длительный период, в настоящее время вряд ли возможна, причем в большинстве случаев из-за отсутствия глубоководных данных. В связи с этим их использование в прогностических моделях возможно только косвенным путем, когда выявлены крупномасштабные и доступные параметры, адекватно описывающие процессы горизонтального и вертикального переноса тепла.

Таким образом, круг потенциальных предикторов при долгосрочном прогнозе ТПО физико-статистическим методом можно считать установленным.

Другие характеристики системы «океан-атмосфера», в том числе различные индексы атмосферной циркуляции, влияние которой на океан исключительно

разнообразно и противоречиво, следует, очевидно, отнести к кругу потенциальных предикторов, необходимых для построения статистических моделей и имеющих точно такое же право на существование, как физико-статистический метод.

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 натуральных 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 [89].

5.2. Статистические модели вылова анчоуса по абиотическим характеристикам и возможности их использования в прогностических целях

С точки зрения планирования рыбного промысла наиболее важным представляется долгосрочный прогноз среднегодовых и среднемесячных значений ТПО. Достаточно подробно задача долгосрочного прогноза ТПО на основе физико-статистического метода применительно к юго-восточной части Тихого океана обсуждается в монографии [16]. В данной работе рассмотрим физико-статистический метод долгосрочного прогноза вылова анчоуса в области ПА [209]. Как было показано в гл. 3 и 4 основными абиотическими факторами

формирования биомассы анчоуса являются ТПО и индекс апвеллинга, характеризующий подъем в верхний эвфотический слой океана биогенных элементов, служащих кормовой базой фитопланктона. Поэтому можно записать:

$$CPUE = F(T_i; U_i) \quad (5.1)$$

где $CPUE$ – оценки улова анчоуса на единицу рыболовного усилия, косвенно характеризующие его биомассу, T_i и U_i – соответственно ТПО и ИА в центрах выделенных 11 районов (см. рисунок 4.4). Исходными данными по ТПО послужила база GODAS, а данными по ИП – результаты его оценки на основе теории Экмана по скорости ветра в приводном слое по архиву Reanalysis-2. Для этой цели использовались две многомерные статистические модели: множественная линейная регрессия (МЛР) и метод деревьев решений, описание которых дается в главе 2.

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:

$$CPUE = 0,910 U_9 - 0,628 U_3 - 0,478 T_3 + 0,550 T_{11} - 0,376 T_8 \quad (5.2)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен $R^2 = 0,88$, а относительная ошибка (δ) в долях СКО $CPUE$ 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 таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Статистические оценки моделей МЛР для $CPUE$ по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана [209].

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. Далее в модель входит ТПО в перуанской и чилийской зонах ПА (T_3, T_{11}, T_8).

Для оценки прогностических возможностей уравнения (5.2) исходная выборка была разделена на зависимую (1996—2016 гг.) и условно независимую (2017—2020 гг.). Для зависимой выборки был выполнен новый расчет статистической модели $CPUE$. Результаты показали, что она совпадает с основной моделью (таблица 5.1). Это означает почти полное совпадение коэффициентов регрессии, их высокую устойчивость во времени. Отсюда следует, что поверочный прогноз $CPUE$ за 2017—2020 гг. также должен быть очень близок к его фактическим значениям. Действительно, как видно из рисунка 5.2, фактические и прогностические (поверочные) значения $CPUE$ имеют минимальные различия.

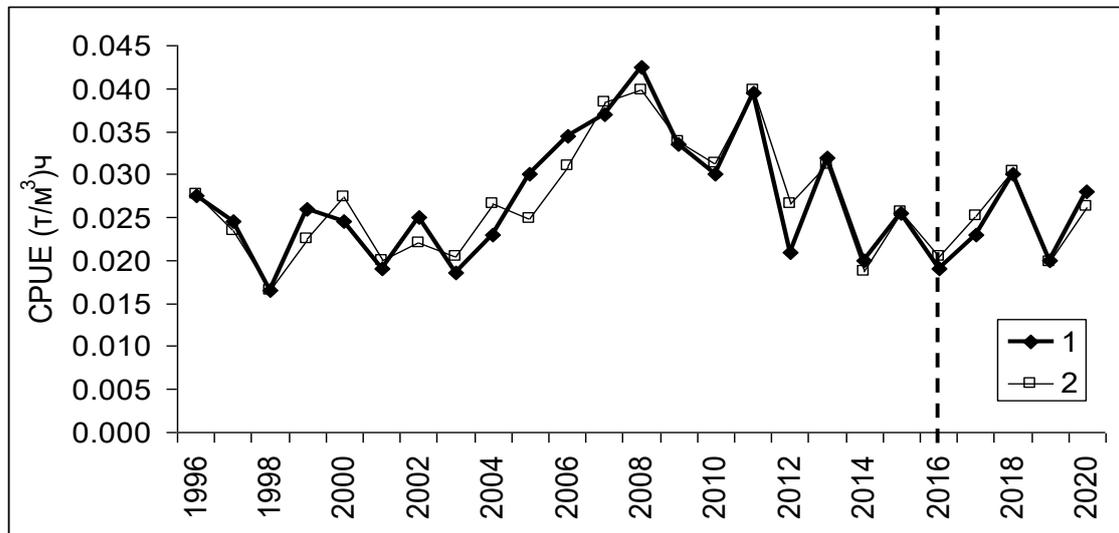


Рисунок 5.2 – Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели МЛР (2) значений $CPUE$. Прогностические (поверочные) оценки $CPUE$ рассчитаны для периода 2017—2020 гг. [209].

Однако реальные прогностические возможности данного метода можно выявить при сопоставлении расчетов с полностью независимыми данными *CPUE*. Поэтому был выполнен расчет *CPUE* по модели (5.2) на 2021—2024 гг. и осуществлено сравнение с фактическими данными *CPUE*, полученными за указанный период из IMARPE [210] уже после публикации статьи [209]. Сравнение представлено на рисунке 5.3. Нетрудно видеть, что только для 2022 года расхождения между фактическими и прогностическими значениями *CPUE* являются допустимыми. Для других лет они превышают СКО.

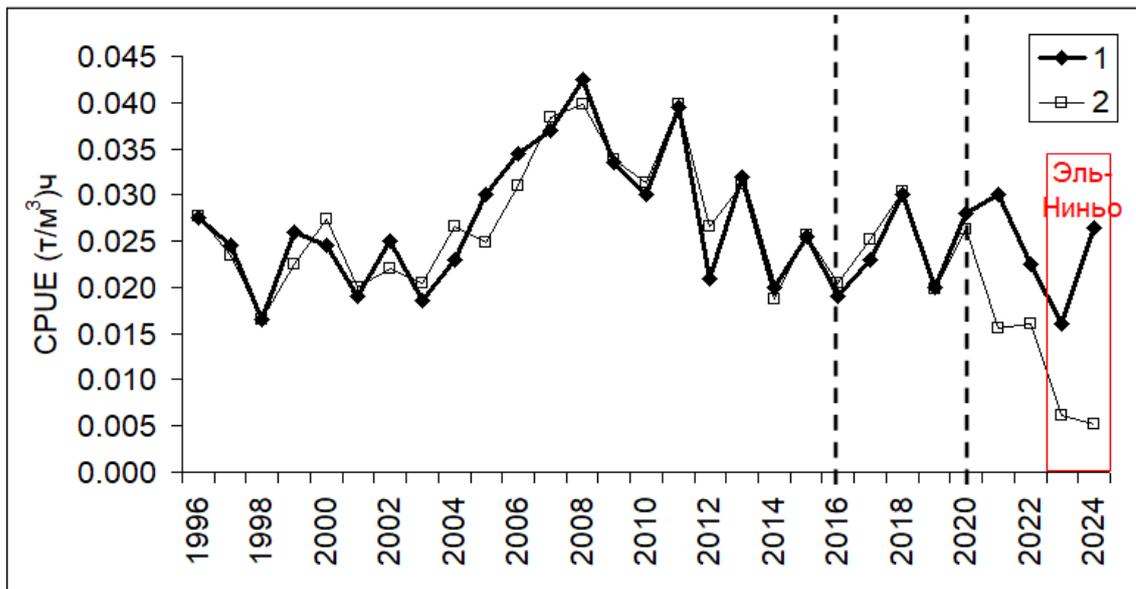


Рисунок 5.3 Сопоставление фактических (1) и вычисленных (2) по модели МЛР (5.2) значений *CPUE*. Период 2021—2024 – независимый прогноз.

Статистическая модель *CPUE* методом деревьев решений.

На рисунке 5.4 представлены результаты измерения стоимости ошибок проверки на независимой выборке (*CV-cost*) и стоимости тестирования на обучающем наборе (*Resubstitution cost*) в зависимости от количества узлов дерева (числа ветвлений). Оценка стоимости обучения (*Resubstitution cost*) зависит от толщины дерева. Чем оно толще, тем оно точнее будет описывать зависимую переменную. Поэтому в общем случае эта оценка обратно пропорциональна коэффициенту детерминации, полученному из обучающейся выборки. Распределение ошибок кроссвалидации (*CV-cost*) показывает, что дерево номер 5 имеет наименьшую ошибку независимых оценок, поэтому его можно считать оптимальным. Для рассмотренной модели ДР рассчитаны статистические

характеристики: коэффициент детерминации и относительная ошибка для за период 1996–2020 гг. оценки которых представлены в таблице 5.2.

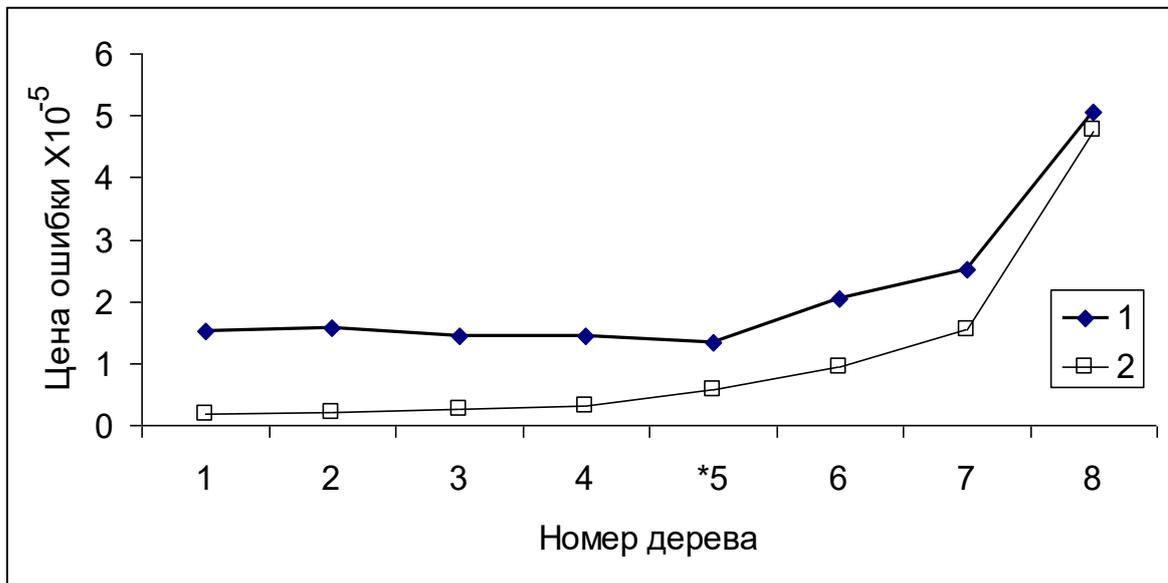


Рисунок 5.4 – Распределение значений цены ошибки кросс-проверки (CV-cost) (1) и цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (Resubstitution cost) (2) в зависимости от числа узлов дерева для модели *CPUE* за период 1996–2020 гг.

Как видно из таблицы 5.2 уже при 3 ветвлениях точность модели ДР совпадает с моделью МЛР, а для 5 ветвлений ($R^2 = 0,94$, $\delta = 0,23$) она заметно ее точнее. Уже на первом ветвлении индекс U_9 описывает 67 % дисперсии *CPUE*, а с учётом 3 ветвления — 75 % дисперсии. Дело в том, что он входит в модель дважды (на 1 и 3 ветвлениях). В этом особенность моделей ДР, которые допускают использование исходных переменных неограниченное число раз и при этом они строят непараметрические модели, т.е. исходные данные свободны от теоретического распределения.

Таблица 5.2 – Статистические оценки моделей деревьев решений для *CPUE* по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана [209]

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

Далее по аналогии с моделью МЛР для зависимой выборки (1996—2016 гг.) строилась модель ДР, статистические характеристики которой также приводятся в таблице 5.2. Как и в случае с моделью МЛР, мы видим почти полное соответствие рассчитанных характеристик. Учитывая скорость нарастания коэффициента детерминации, можно ограничиться 3 ветвлением, при котором $R^2 = 0,88$, т.е модель ДР соответствует модели МЛР на 5 шаге. Несмотря на это следует отметить принципиальное отличие моделей между собой. Оно состоит в том, что совпадает только первый предиктор U_9 . На других шагах (ветвлениях) они отличаются друг от друга.

На рисунке 5.5 приводится модель ДР для трех ветвлений. Дерево 3 имеет достаточно простой вид. На первом ветвлении разделителем является ИА в районе 9. Если он меньше 622,46 мм/мес, то в 14 случаях из 21 отмечались низкие значения $CPUE$ со средним значением 0,0231 (т/м³)ч. Если ИА больше 622,46 мм/мес, то, наоборот, в 7 случаях $CPUE$ становится высоким (в среднем 0,0356 (т/м³)ч). На втором ветвлении уточняется формирование 14 значений низких оценок $CPUE$ под влиянием ТПО в районе 1. Если T_1 становится ниже $< 21,6$ °С, то отмечается 4 оценки $CPUE$ около нормы, если больше $> 21,6$ °С, то 10 аномально низких оценок $CPUE$. На третьем ветвлении разделителем является опять индекс U_9 . При аномально высоких значениях $U_9 > 667,7$ мм/мес имеем 3 аномально высоких оценок $CPUE$. Если U_9 находится в диапазоне от 667,7 до 662,4 мм/мес., то определяются 4 оценки $CPUE$ чуть выше нормы. Очевидно, что ИА в районе 9 можно считать наиболее важным фактором для оценки $CPUE$ анчоуса в пределах шельфа ПА, поскольку он одновременно является первым предиктором в модели МЛР. Визуализация модели ДР позволила наглядно показать как происходит отбор оценок $CPUE$ в зависимости от реперных значений переменных U_9 и T_1 на 3 ветвлении.

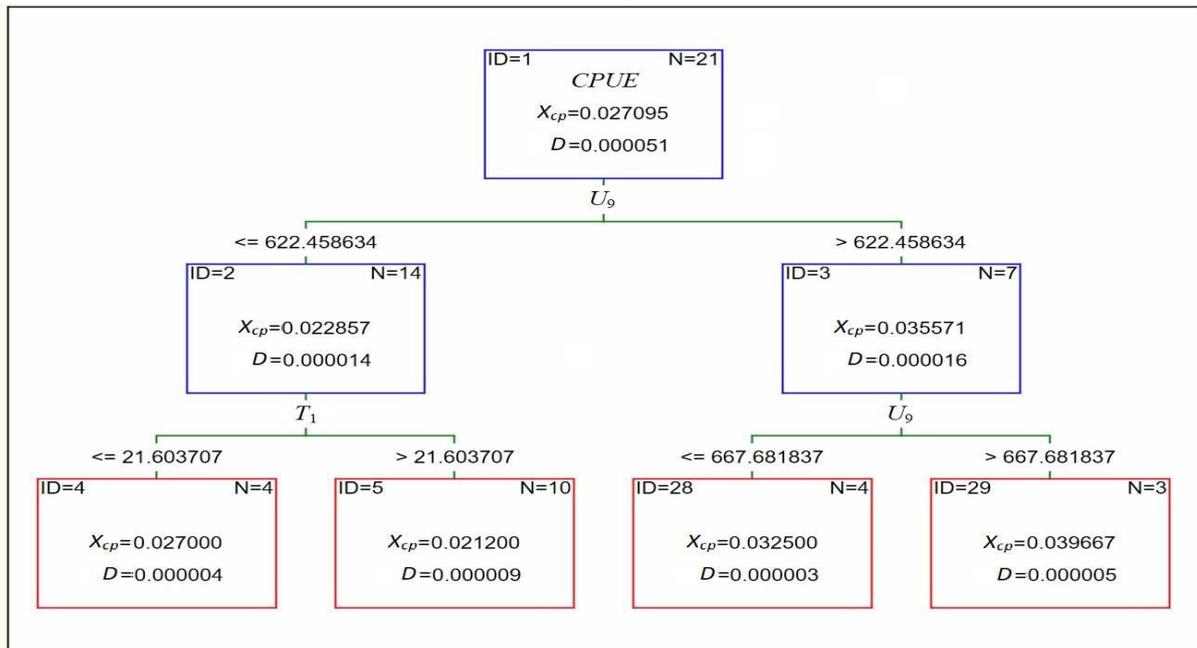


Рисунок 5.5. Модель дерева решений, состоящего трех ветвлений, описывающих 88 % дисперсии годовых значений *CPUE* (X_{cp} — среднее значение, D — дисперсия) [209]

На рисунке 5.6 представлено сопоставление вычисленных по модели ДР и фактических значений *CPUE*. Нетрудно видеть их хорошее соответствие, в том числе и прогностических оценок *CPUE*. Период 2017—2020 гг. – поверочные прогнозы, 2021—2024 гг. истинные прогнозы. Поверочные прогнозы для всех лет имеют минимальные расхождения и соответствуют критерию СКО. Что касается прогноза на 2021—2024 гг., то для 3 лет (2022—2024 гг.) прогностические оценки *CPUE* соответствуют критерию СКО и только для 2021 г. прогноз не является удачным.

Следует отметить разные способы подбора вычисленных оценок *CPUE* по моделям ДР и МЛР к фактическим значениям. В первом случае используется принцип нахождения минимального геометрического расстояния, во втором принцип сравнения по изменчивости, т.е. выбирается такая переменная, которая дает максимальный вклад в описание дисперсии исходного ряда. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии *CPUE* методом МЛР и более двух третей методом ДР. Однако причины столь высокой корреляционной связи U_9 с *CPUE* не совсем понятны. Возможно, она обусловлена

наличием между подрайонами 1-5 (Перу) и 9 (Чили) (см. рисунок 2.2) так называемой дальней связи — тесной зависимости параметров среды и промысла, обусловленной единым регулирующим механизмом — переносом теплозапаса и вихревой динамики вод в северном направлении в пределах Перуанского течения ЮВТО. Этот вопрос выходит за рамки данной работы и требует дополнительного исследования.

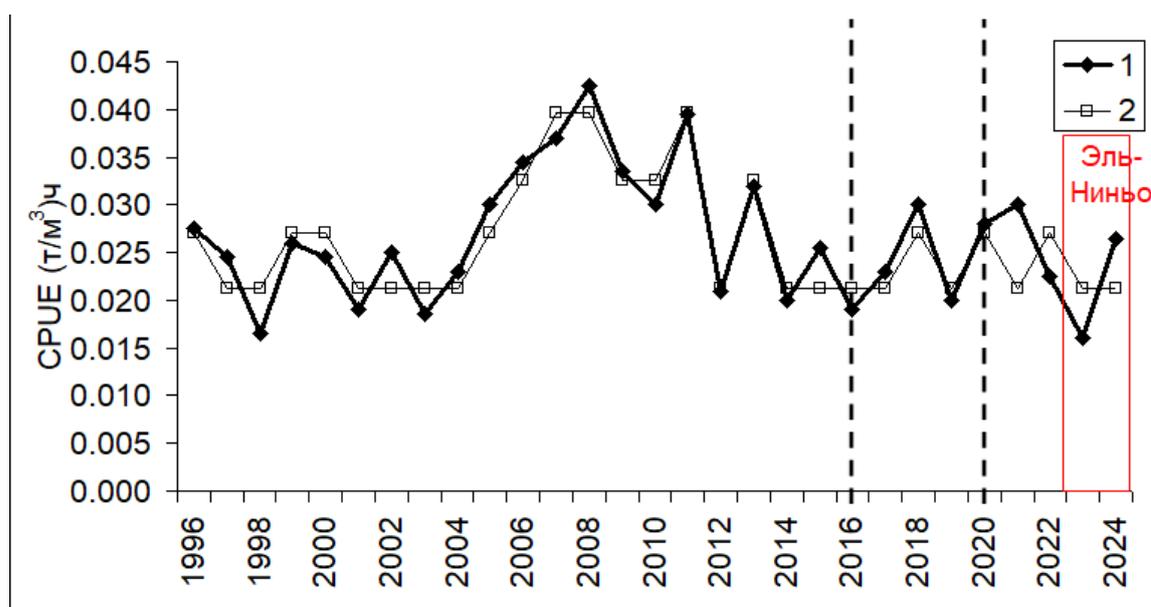


Рисунок 5.6 – Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели ДР (2) значений $CPUE$. Прогностические оценки $CPUE$ рассчитаны для периода 2021—2024 гг.

Полученные результаты подтверждают, что метод ДР имеет некоторые преимущества перед МЛР в точности описания $CPUE$, в визуализации получаемых результатов и более понятной их интерпретации. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии $CPUE$ методом МЛР и три четверти методом ДР.

Как было показано в главе 3, явление Эль-Ниньо играет отрицательную роль в $CPUE$ анчоуса. Существует теория согласно которой популяция перуанского анчоуса способна выживать в этих событиях благодаря своей способности мигрировать и чередовать различные виды питания. 2023 год прошёл в контексте неблагоприятных океанографических условий для биомассы, показывая только прибрежное пространственное распределение в течение всего года [211], затем

IMARPE выпустил отрицательный прогноз для промысла перуанского анчоуса (*Engraulis ringens*) из-за воздействия условий Эль-Ниньо. Наличие теплых вод и углубляющаяся зона кислородного минимума привели к тому, что анчоус был обнаружен ближе к берегу и в более глубоких водах, с высокой частотой молоди. Это привело к отмене первого сезона промысла анчоуса в северо-центральной зоне и значительному сокращению общей квоты на год [212]. Важно отметить, что обе модели, разработанные в данной работе, демонстрируют различную чувствительность к явлению ЭНЮК в прогнозируемом периоде 2021—2024 гг. Модель МЛР демонстрирует более сильное влияние явления ЭНЮК из-за более выраженного снижения CPUE анчоуса. Модель ДР показывает более реалистичный сценарий, поскольку, как уже упоминалось, анчоус может адаптироваться к чрезвычайно изменчивой среде обитания [153].

Заключение

На основании выполненных исследований получены следующие результаты:

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 прогнозирования 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 районами выполнено с помощью метода 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. 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. Это означает, что 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 °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 значительное 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 (проверочный) 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.

Список литературы

1. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America // Ecological Studies. Springer, 2001. Vol. 144. P. 229—244. DOI: 10.1007/978-3-662-04482-7_17
2. Bakun A., Weeks S. J., The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? // Progress in Oceanography. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 290—299. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.027
3. Gutiérrez D., Akester M. Naranjo L. Productivity and Sustainable Management of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem under climate change // Environmental Development. Elsevier, 2016. Vol. 17, № 1. P. 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004
4. Духова Л.А., Сапожников В.В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // Труды ВНИРО. 2014. Том 152, С. 85—100
5. Сапожников В.В., Чернышков П.П., Шнар В.Н. и др. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ "Атлантида" в июле-августе 2006 г. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 473—476
6. Bakun A., Black B., Bograd S. et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. // Current Climate Change Reports, Springer Nature 2015. Vol. 1, P. 85—93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4
7. Espinoza-Morriberón D., Echevin V., Colas F. et al. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. Journal of Geophysical Research Oceans. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2017. Vol. 122, № 7. P. 5423—5444. DOI: 10.1002/2016jc012439

8. Castillo R., Dalla L., García W. et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017 // Fisheries Oceanography. Wiley, 2019. Vol. 28. P. 389—401. DOI: 10.1111/fog.12419
9. FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation // FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022. 266 p. ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate
10. Espinoza, P., Bertrand, A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) tropho-dynamics provides a new vision of the Humboldt Current system // Progress in Oceanography. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 215–227. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.022
11. Bakun A., Broad K. (eds). Climate and Fisheries: Interacting Paradigms, Scales and Policy Approaches. The IRI-IPRC Pacific Climate-Fisheries Workshop, Honolulu, 14–17 November, 2001. Columbia Earth Institute, Palisades, New York, 10964, USA: The International Research Institute for Climate Prediction (IRI), IRI Publication IRI-CW/02/1. 2002. 70 pp.
12. Massing J. C. et al. Toward a Solution of the “Peruvian Puzzle”: Pelagic Food-Web Structure and Trophic Interactions in the Northern Humboldt Current Upwelling System Off Peru // Frontiers in Marine Science. Frontiers, 2022. Vol. 8, Article 759603. DOI: 10.3389/fmars.2021.759603
13. Di Dario F., Hüne M., Pérez-Matus A. et al. *Engraulis ringens*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T183775A102904317. DOI: 10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T183775A102904317.en. Accessed on 12 May 2025
14. PRODUCE^a. Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2023. Observatorio PRODUCEmpresarial (September 12, 2024) / [Electronic resource]. — URL: <https://www.produceempresarial.pe/anuario-estadistico-pesquero-y-acuicola-2023/>
15. Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб: Гидрометеоиздат. 2002. 156 с.

- 16.Малинин В.Н., Гордеева С.М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб: РГГМУ. 2009. 278 с.
- 17.Bakun, A., Field D., Redondo-Rodriguez A., Weeks S. J. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. Wiley, 2010. Vol. 16, № 4. P. 1213—1228, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x
- 18.Gutiérrez D., Bouloubassi I., Sifeddine A. et al. Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century // *Geophysical Research Letters*. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2011. Vol. 38, № 7. DOI: 10.1029/2010gl046324
- 19.Ganguly D., Raman M. Coastal Upwelling During Normal and EL Nino Years: Case Study of Peru and Oman Upwelling // *IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)*, Ahmedabad, India, 2021. P. 107—110. DOI: 10.1109/InGARSS51564.2021.9792080
- 20.Wooster W.S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic // *Journal of Marine Research*. 1976. Vol. 34. N°2. P. 131—141
- 21.Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991 // *Journal of Geophysical Research*. American Geophysical Union (AGU) Journal, 1994. Vol. 99. C7. P. 14197—14207
- 22.Demarçq, H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to *Octopus vulgaris* recruitment // *Oceanologica Acta*. Elsevier, 2000. Vol. 23. № 4. P. 391—408. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0
- 23.Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671. 1973. 103 p.

24. Rostworowski de Diez Canseco M. Coastal fishermen, merchants, and artisans in prehispanic Peru in the sea in the Pre-Columbian World, E P BENSON, editor, Dunbarton Oaks Research Library and Collections, Washington, D C. 1977, P. 167—168
25. Brink, K. et al. The physical environment of the Peruvian upwelling system // Progress in Oceanography. Elsevier, 1983. Vol. 12, № 3. P. 285—305. DOI: 10.1016/0079-6611(83)90011-3
26. Nixon S., Thomas A. On the size of the Peru upwelling ecosystem // Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers. Elsevier, 2001. Vol. 48, № 11. P. 2521—2528. DOI: 10.1016/s0967-0637(01)00023-1
27. Agüero M., Claveri M. Capacidad de pesca y manejo pesquero en América Latina y el Caribe: Una síntesis de casos // Capacidad de Pesca y Manejo Pesquero en América y el Caribe (Documento Técnico de Pesca), vol. 461, pp. 61—71, Food and Agriculture Organization (FAO). 2007
28. Bakun, A. Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics. California Sea Grant, San Diego (CA), 1996. 346 pp.
29. Bertrand A. et al. From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru // Fish and Fisheries. Wiley, 2004. Vol. 5, № 4. P. 296—316. DOI: 10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x
30. Chavez F. P. et al. The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future // Progress in Oceanography. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 95—105. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.012
31. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Food & Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2024. 232 pp. DOI: 10.4060/cd0683en
32. Santoso A., Mcphaden M. J., Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño // Reviews of Geophysics. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2017. Vol. 55, № 4. P. 1079—1129. DOI: 10.1002/2017RG000560

- 33.FAO. Efectos de la pandemia de COVID-19 en el sector de la pesca y la acuicultura en la región y respuestas para la recuperación. COPACO/XVIII/2022/18. 2022 / [Electronic resource]. — URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/00932203-ebd5-465f-bed1-695c3dd0076d/content#:~:text=La%20exportaci%C3%B3n%20de%20pescado%20y,FAO%20y%20CEPAL%2C%202020a>)
- 34.PRODUCE^b. Sector pesquero creció 329.2% en mayo de 2024. Noticias - Ministerio de la Producción - Plataforma del Estado Peruano (July 2, 2024) / [Electronic resource]. — URL: <https://www.gob.pe/institucion/produce/noticias/982353-produce-sector-pesquero-crecio-329-2-en-mayo-de-2024>
- 35.Kämpf J., Chapman P. Upwelling Systems of the World: A Scientific Journey to the Most Productive Marine Ecosystems. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-42524-5
- 36.Zuta S., Guillen O. Oceanografía de las aguas costeras del Perú // Boletín del Instituto del Mar del Perú, 1970. Vol. 2, № 5. P. 157—180
- 37.Penven P. et al. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach // Journal of Geophysical Research: Oceans. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2005. Vol. 110, № C10. P. 67—87. DOI: 10.1029/2005JC002945
- 38.Chaigneau, A. et al. Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data // Journal of Geophysical Research Oceans. Wiley, 2013. Vol. 118, № 10. P. 5251—5266. DOI: 10.1002/jgrc.20328
- 39.Fiedler, P. C. Seasonal interannual variability of coastal zone color scanner phytoplankton pigments and winds in the eastern tropical Pacific // Journal of Geophysical Research. American Geophysical Union, 1994. Vol. 99, № C9. P. 18371—18384

40. Domínguez-Obregón N., Quispe-Sánchez J., Vásquez-Espinoza L. Principales corrientes marinas frente a la costa peruana durante el 2008-2009 // Boletín Instituto Del Mar Del Perú, 2011. Vol. 26, № 1—2. P. 39—48
41. Garreaud, R. D. The Andes climate and weather // Advances in Geosciences, European Geosciences Union, 2009. Vol. 22. P. 3—11. DOI: 10.5194/adgeo-22-3-2009
42. Espinoza J. C. et al. Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features // Frontiers in Earth Science. Frontiers, 2020. Vol. 8, Article 64. DOI: 10.3389/feart.2020.00064
43. Arias P.A. et al. Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns // Frontiers in Earth Science. Frontiers, 2021. Vol. 8, Article 505467. DOI: 10.3389/feart.2020.505467
44. Sadler J. et al. Reconstructing past upwelling intensity and the seasonal dynamics of primary productivity along the Peruvian coastline from mollusk shell stable isotopes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2012. Vol. 13, № 1, article Q01015. DOI: 10.1029/2011GC003595
45. Xue T. et al. Mixed layer depth dominates over upwelling in regulating the seasonality of ecosystem functioning in the Peruvian upwelling system // Biogeosciences. European Geosciences Union, 2022. Vol. 19, № 2. P. 455—475. DOI: 10.5194/bg-19-455-2022
46. Ramos J. E. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System // Scientific Reports. Nature, 2022. Vol. 12, № 1, Article 4800. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5
47. Gutiérrez D. et al. Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas. Revista Peruana Geo-Atmosférica. IRD, 2011. Vol. 3. P. 1—24. ISSN 2078-1199
48. Gu, Y. et al. Spatial and temporal variations in the micronutrient Fe across the Peruvian shelf from 1984 to 2017 // Progress in Oceanography. Elsevier, 2024. Vol. 221, Article 103208. DOI: 10.1016/j.pocean.2024.103208

49. Baumann, M. et al. Drivers of particle sinking velocities in the Peruvian upwelling system // *Biogeosciences*. European Geosciences Union, 2023. Vol. 20, № 13. P. 2595—2612. DOI: 10.5194/bg-20-2595-2023
50. Hunt H. et al. Distinguishing the influence of sediments, the Congo River, and water-mass mixing on the distribution of iron and its isotopes in the Southeast Atlantic Ocean // *Marine Chemistry*. Elsevier, 2022. Vol. 247, Article 104181. DOI: 10.1016/j.marchem.2022.104181
51. Severmann S. et al. The continental shelf benthic iron flux and its isotope composition // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Elsevier, 2010. Vol. 74, № 14. P. 3984—4004. DOI: 10.1016/j.gca.2010.04.022
52. Bohle-Carbonell, M. On the variability of the Peruvian upwelling system // *The Peruvian upwelling ecosystem: dynamics and interactions*, D. Pauly, P. Muck, J. Mendo and I. Tsukayama, eds. ICLARM Conference Proceedings, 1989. P. 14—32. 438 p.
53. Zavala R. et al. Avances del Perú en la adaptación al cambio climático del sector pesquero y del ecosistema marino-costero // Ministerio de la Producción; Ministerio del Ambiente. Lima: BID; IMARPE. 2019
54. Aguirre E. A Numerical Study of Oceanic Circulation in San Juan, Peru. Calibration of Princeton Ocean Model During 1991—2000 // *The Open Oceanography Journal*. Bentham Open Archives, 2015. Vol. 8, P. 33—38.
55. Wang L. et al. A Numerical Study on the Impact of High-Frequency Winds on the Peru Upwelling System during 2014–2016 // *Journal of Marine Science and Engineering*. MDPI Journal, 2019. Vol. 7, № 5, article 161. DOI: 10.3390/jmse7050161
56. Huaranga E. The Peruvian upwelling system. A numerical study of the spatial and time variabilities // *Revista de Investigación de Física*. UNMSM, 2020. Vol. 23, № 3. P. 31—36
57. Negrete M. Peru, the best fishing performance country in South America. WEAREAQUACULTURE (August 13, 2024) / [Electronic resource]. — URL:

<https://weareaquaculture.com/news/fisheries/peru-the-best-fishing-performance-country-in-south-america>

58. Giannoulaki M. et al. Habitat Characterization and Migrations. In: Ganias K, editor. *Biology and Ecology of Sardines and Anchovies*. CRC Press; 2014. P. 190—241. DOI: 10.1201/b16682
59. Bouchon, M. et al. Biología de la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*, Jenyns). Boletín IMARPE, 2010. Vol. 25, № 1—2. P. 23—30.
60. De la Cruz K. et al. BIOLOGICAL SYNOPSIS OF *Engraulis ringens* (Jenyns, 1842) Anchovy // REBIOL. UNT, 2021. Vol. 40, № 2. P. 298—317. DOI: 10.17268/rebiol.2020.40.02.15
61. Chirinos de Vildoso A., Chumán, E. Validez de la lectura de otolitos para determinar la edad de las anchoveta (*Engraulis ringens*). Informe IMARPE, 1968, № 22
62. Vigo K. Cambios físico-químicos, microbiológicos y sensoriales de la anchoveta (*Engraulis ringens*) fresca en corte Hgt a diferentes condiciones de envasado. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú. 2016
63. Murua H., Saborido–Rey F. Female Reproductive Strategies of Marine Fish Species of the North Atlantic // *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*. Northwest Atlantic Fisheries Organization (NAFO), 2003. Vol. 33. P. 23—31. DOI: 10.2960/J.v33.a2
64. Claramunt, G. et al. Variation in the spawning periods of *Engraulis ringens* and *Strangomera bentincki* off the coasts of Chile: A quantitative analysis // *Fisheries Research*. Elsevier, 2013. Vol. 160. P. 96—102. DOI: 10.1016/j.fishres.2013.09.010
65. Cubillos L. et al. Cambios espaciales y temporales en la fecundidad parcial de la sardina común y anchoveta frente al centro y sur de Chile (2002—2007) // *Ciencias Marinas*. SciELO, 2011. Vol. 37, № 4b. P. 547—564. doi: 10
66. Cubillos L. A., Serra R., Fréon P. Synchronous pattern of fluctuation in three anchovy fisheries in the Humboldt Current System // *Aquatic Living Resources*. EDP Sciences, 2007. Vol. 20, №1. P. 69—75. DOI: 10.1051/alr:2007017

67. Serra R. Changes in the abundance of pelagic resources along Chilean coast // G.D. Sharp & J. Csirke (eds). Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources, San Jose, Costa Rica, 18–19 April 1983. FAO Fisheries Report. 1983, Vol. 291, № 2. P. 255—284
68. Alheit J., Ñiquen M. Regime shift in the Humboldt Current ecosystem // Progress in Oceanography. Elsevier, 2004. Vol. 60, № 2—4. P. 201—222
69. Gutierrez, M. Estimados de biomasa hidroacústica de los cuatro principales recursos pelágicos en el mar peruano durante 1983—2000. Boletín IMARPE, 2000. Vol. 19, № 1—2. P. 139—156
70. Simmonds E. J. et al. Optimizing the design of acoustic surveys of Peruvian anchoveta // ICES Journal of Marine Science. Oxford Academic, 2009. Vol. 66, № 6. P. 1341—1348. DOI: 10.1093/icesjms/fsp118
71. Schreiber M. A., Ñiquen M., Bouchon M. Coping strategies to deal with environmental variability and extreme climatic events the Peruvian anchovy fishery // Sustainability. MDPI Journal, 2011. Vol. 3, № 6. P. 823—846. DOI: 10.3390/su3060823
72. Green R.E. Relationship of the thermocline to success of purse seining for tuna // Transactions of the American Fisheries Society, Oxford Academic, 1967. Vol. 96, № 2. P. 126—130
73. Maury O. et al. Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environment in the Atlantic Ocean // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. Canadian Science Publishing, 2001. Vol. 58, № 3. P. 458—469. DOI: 10.1139/f00-261
74. Prince E. D., Goodyear C. P. Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes // Fisheries Oceanography. Wiley Online Library, 2006. Vol. 15, № 6. P. 451—464. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2005.00393.x
75. Santander H, Sandoval de Castillo O. El desove de la anchoveta *Engraulis ringens* J. en los periodos reproductivos de 1961 a 1968 // Informe Especial Instituto del Mar del Perú (IMARPE), 1969. № 40

76. Santander H, Flores R. Los desoves y distribución larval de cuatro especies pelágicas y sus relaciones con las variaciones del ambiente marino frente al Perú // FAO Fisheries Report. 1983. Vol. 3, № 291. P. 835—867
77. IFOP, IMARPE, ONUDI. Manejo Integrado del Gran Ecosistema Marino de la Corriente de Humboldt: Módulo II - Recursos y Pesquerías, 2002
78. IMARPE. Informe ejecutivo del crucero 2202-04 de “Evaluación Hidroacústica de Anchoqueta y Otros Recursos Pelágicos”, realizado entre el 15 de febrero al 09 de abril del 2022 // Informe interno IMARPE. 2022. 57 p.
79. IMARPE. Situación del Stock Norte-Centro de la Anchoqueta Peruana (*Engraulis ringens*) al 10 de Octubre y Perspectiva de Explotación para la Segunda Temporada de Pesca de 2024. (October 22, 2024). Informes y Publicaciones - Instituto del Mar del Perú (IMARPE) - Plataforma del Estado Peruano / [Electronic resource]. — URL: <https://www.gob.pe/institucion/imarpe/informes-publicaciones/6115272-situacion-del-stock-norte-centro-de-la-anchoqueta-peruana-engraulis-ringens-al-10-de-octubre-y-perspectiva-de-explotacion-para-la-segunda-temporada-de-pesca-de-2024>
80. Behringer D.W., Ji M., Leetmaa A. An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system // Monthly Weather Review. 1998, № 126. P. 1013—1021. DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<1013:AICMFE>2.0.CO;2
81. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. Vol. 83, № 11. P. 1631—1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631
82. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al., The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. March 1996. Vol. 77. P. 437—472. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
83. 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. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292

84. Skalski J., Elaine K. Millspaugh J. Analysis of population indices. In book *Wildlife Demography: Analysis of Sex, Age, and Count Data*. Elsevier, 2005. 359—434. ISBN 978-0-12-088773-6
85. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
86. Малинин В.Н. 2020. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. Том 1. Первичный анализ и построение эмпирических зависимостей. – Издание 2, испр. и доп. Учебное пособие. — СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020. — 256 с.
87. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987.
88. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1, 2. – М.: Финансы и статистика, 1986.
89. Малинин В.Н., С.М. Гордеева. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2003. – 164 с.
90. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1980. – 456 с.
91. Смирнов Н.П., Вайновский П.А., Титов Ю.Э. Статистический анализ и прогноз океано-логических процессов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 198 с.
92. Уланова Е.С. Забелин В.И. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.
93. Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н., Уэбе Г., Шефер М. Многомерный статистический анализ в экономике. — Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 598 с.
94. Иберла К. Факторный анализ. – М., Статистика, 1980. – 398 с.
95. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики, – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.

96. Благуш П. Факторный анализ с обобщениями. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 247 с.
97. Ким Д. О., Клекка У. Р., Мьюллер Ч. Х. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1989.
98. Харман Г. Современный факторный анализ. – М.: Статистика, 1972. – 486 с.
99. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика. 1998.
100. Jain, A.K.; Murty, M.N.; Flynn, P.J. Data clustering: A review. *ACM Comput. Surv.* 1999, 31, 264—323
101. Härdle W.K., Simar L. *Applied Multivariate Statistical Analysis* (4^a ed.). Springer, 2015. — 580 p.
102. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Ч. 2. Многомерный анализ. – СПб., Изд. РГМИ, 1992.
103. Николаев Ю.В. Классификация гидрометеорологических процессов с помощью ЭВМ. – Л., Гидрометеиздат, 1976. – 36 с.
104. Чернышков П.П., Андрианов Г.Н., Зимин А.В. и др. Методы многомерного статистического анализа в промыслово-океанологических исследованиях. Калининград : АтлантНИРО, 2003. - 164 с. : ил. - 200 экз. - ISBN 5-900678-31-8
105. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium On Mathematical Statistics and Probabilities*. Vol. 1: Statistics, University of California Press, Berkeley, 281—296.
106. Fayyad U.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., Uthurusamy R. *Advances in knowledge discovery & data mining*. —Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
107. Андреев И. Деревья решений — CART: математический аппарат // *Base Group Labs: технологии анализа данных*. [Электронный ресурс]. —URL: Часть 1: <https://basegroup.ru/community/articles/math-cart-part1>; Часть 2:

- <https://basegroup.ru/community/articles/math-cart-part2>. (дата обращения: 02.05.2025)
108. Шампандар А.Е. Деревья классификации и регрессии // Искусственный интеллект в компьютерных играх. М.: ИД «Вильямс», 2007. С. 385—401.
109. Bramer M. Principles of Data Mining. Springer, 2007.
110. Carnegie Mellon University. Statistics Department. Classification and Regression Trees: textbook [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/22/lecture-22.pdf> (дата обращения: 02.05.2025)
111. Hand D.J., Mannila H., Smith P. Principles of Data Mining. — The MIT Press, 2001. — 546 p.
112. Murthy S. Automatic construction of decision trees from data: A multidisciplinary survey // Data Mining and Knowledge Discovery, 1998. Vol. 2, № 4. P. 345—389. DOI:10.1023/A:1009744630224
113. DELL. Popular Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT) / DELL Software [Электронный ресурс]. —URL: <http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Classification-and-Regression-Trees> (дата обращения: 02.05.2025)
114. Pregibon D. Data Mining // Statistical Computing and Graphics, 1997. Vol. 7. P. 8.
115. Чубукова И.А. Data Mining. — М.: Интернет-университет информационных технологий; Бинум, лаборатория знаний, 2008. 384 с.
116. Гордеева С.М., Малинин В.Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 30—44.
117. Малинин В.Н., Шмакова В. Ю. Изменчивость энергоактивных зон океана в Северной Атлантике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. №4. С.55—70.
118. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение Европейской части России и годовой сток Волги // Водные

- ресурсы, 2019, том 46, № 3, С. 318—332. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332
119. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе океан-атмосфера-суша // Труды Карельского научного центра РАН. № 4. 2020. С. 1–15
120. Hunt E.B., Marin J., Stone P.J. Experiments in induction. — N.Y., Academic Press, 1966.
121. StatSoft inc. Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help / [Electronic resource]. — URL: <https://docs.tibco.com/pub/stat/14.0.0/doc/html/UsersGuide/GUID-21D10BEA-0234-4A43-81A2-0781C663DFFB.html> (дата обращения: 02.05.2025)
122. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA, 1984.
123. Rees W.G. Physical Principles of Remote Sensing. 3rd ed. Cambridge University Press, 2012
124. Костяной А.Г., Лебедев С.А., Терзиев Ф.С. и др. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Науч. ред. С.М. Семенов. — М // Росгидромет, 2012. — С. 430—478.
125. 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. Nature, 2019. Vol. 6, Article #223. DOI: 10.1038/s41597-019-0236-x
126. Костяной А.Г. Satellite Monitoring of the Ocean Climate Parameters. Part 1 // Fundamental and Applied Climatology, 2017. № 2, P. 63—85. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-63-85 (in Russian). EDN: <https://elibrary.ru/ZELKBD>
127. 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

128. Copernicus. Sea surface temperature: climate indicators / [Electronic resource]. — URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-surface-temperature> (Accessed on 23.12.2024)
129. Aiken C. M., Navarrete S. A., Pelegrí J. L. Potential changes in larval dispersal and alongshore connectivity on the central Chilean coast due to an altered wind climate // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2011. Vol. 116, № G4. DOI: 10.1029/2011JG001731
130. Jebri B., Khodri M., Gastineau G. et al. Intensification of Chile-Peru upwelling under climate change: diagnosing the impact of natural and anthropogenic forcing from the IPSL-CM5 model // AGU Fall Meeting Abstracts, American Geophysical Union (AGU), December 2017. Bibcode: 2017AGUFMGC41B1021J
131. Jebri B., Khodri M., Echevin V. et al. Contributions of Internal Variability and External Forcing to the Recent Trends in the Southeastern Pacific and Peru-Chile Upwelling System // *Journal of Climate*. American Meteorological Society (AMS), 2020. Vol. 33, № 24. P. 10555—10578. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0304.1
132. Falvey M., Garreaud R. D. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006) // *Journal of Geophysical Research*. Atmospheres American Geophysical Union (AGU) Journal, 2009. Vol. 114, № D4. DOI: 10.1029/2008JD010519
133. Abrahams, A., Schlegel R. W., Smit A. J. Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems // *Frontiers in Marine Science*. Frontiers, 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmars.2021.626411
134. Lamont T., García-Reyes M., Bograd S. J. et al. Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // *Journal of Marine Systems*. Elsevier, 2018. Vol. 188. P. 3—16. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.05.007
135. Rousseaux C. S., Lowe R., Feng M. et al. The role of the Leeuwin Current and mixed layer depth on the autumn phytoplankton bloom off Ningaloo Reef, Western

- Australia // *Continental Shelf Research*. Elsevier, 2012. Vol. 32. P. 22—35. DOI: 10.1016/j.csr.2011.10.010
136. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Interannual variability in sea ice area of the Antarctic regions // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020. Vol. 17, № 3. P. 187—201. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-187-201 (in Russian).
137. Malinin V. N., Smirnov M. A. Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean // *Hydrometeorology and Ecology*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2022. № 68. P. 463—477. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477 (in Russian).
138. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data // *Hydrometeorology and Ecology*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2022. № 66. P. 51—70. DOI: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477 (in Russian)
139. Осипов А. М., Гущина Д. Ю. Эль-Ниньо 2015—2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 3. С. 54—81. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81
140. Yeh S. W., Cai W., Min S. K. et al., ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing // *Reviews of Geophysics*. American Geophysical Union (AGU) Journal, 2018. Vol. 56, № 1. P. 185—206. DOI: 10.1002/2017RG000568
141. Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol.* 2001. Vol. 21. P. 1845—1862.
142. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society (AMS), 1969. Vol. 97, № 3. P. 163—172.
143. NOAA^a. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) / [Electronic resource]. — URL: <https://psl.noaa.gov/enso/mei>

144. Rosales G. M., Marsh R., Icochea L. A. Interannual variability in contributions of the Equatorial Undercurrent (EUC) to Peruvian upwelling // *Ocean Science*. European Geosciences Union (EGU), 2021. Vol. 17, № 5. P. 1385—1402. DOI: 10.5194/os-2021-13
145. SENAMHI. El fenómeno EL NIÑO en el Perú. 2014 / [Electronic resource]. — URL: http://issuu.com/senamhi_peru/docs/el_nino
146. NOAA^b. Graphical depiction of the four Niño regions / [Electronic resource]. — URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml
147. Takahashi K., Martínez A. G. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific // *Climate Dynamics*. Springer, 2017. Vol. 52. P. 7389—7415. DOI: 10.1007/s00382-017-3702-1
148. Peng Q., Xie S., Wang D. et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics of the 2017 extreme coastal El Niño // *Nature Communications*. Nature, 2019. Vol. 10, Article #298. DOI: 10.1038/s41467-018-08258-8
149. ENFEN^a. Comisión multisectorial encargada del estudio nacional del fenómeno “El Niño” (ENFEN). Informe Técnico Extraordinario N°001—2017/ENFEN El Niño costero 2017, July 2017, 31 p. In Decreto Supremo N° 007—2017-PRODUCE / [Electronic resource]. — URL: https://www.dhn.mil.pe/archivos/oceanografia/enfen/nota_tecnica/01-2017.pdf
150. ENFEN^b. Comisión Multisectorial Encargada del Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño” (ENFEN). Informe Técnico ENFEN. Año 10, N° 11, 14 agosto de 2024, 81 p. / [Electronic resource]. — URL: <https://www.dhn.mil.pe/Archivos/oceanografia/enfen/informe-tecnico/11-2024.pdf>
151. Peng Q., Xie S., Passalacqua G. A. et al. The 2023 extreme coastal El Niño: Atmospheric and air-sea coupling mechanisms // *Science Advances*. Science, 2024. Vol. 10, № 12. DOI: 10.1126/sciadv.adk8646

152. Takahashi K. 2017: Fenómeno El Niño: “Global” vs “Costero” // Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú – IGP. Vol. 4, Nº 4. P. 4—7
153. Ñiquen M, Bouchón M. Impact of El Niño event on pelagic fisheries in Peruvian waters // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. Elsevier, 2004. Vol. 51, Nº 6—9. P. 563—574. DOI: 10.1016/j.dsr2.2004.03.001
154. Arias S., Ñiquen M., Bouchon, M. Coping Strategies to Deal with Environmental Variability and Extreme Climatic Events in the Peruvian Anchovy Fishery // Sustainability. MDPI Journal, 2011. Vol. 3, Nº 6. P. 823—846. DOI: 10.3390/su3060823
155. Yáñez E., Barbieri M. A., Silva C. Fluctuaciones Ambientales de Baja Frecuencia y Principales Pesquerías Pelágicas Chilenas // Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2003. P. 109-121. DOI: 10.13140/2.1.3721.5685
156. Hernández-Santoro C., Landaeta M. F., Castillo J. Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile // Fisheries Oceanography. Wiley Online Library, 2018. Vol. 28, Nº 3. P. 241—255. DOI: 10.1111/fog.12405
157. Dioses T. Patrones de distribución y abundancia del jurel *Trachurus murphyi* en el Perú // Revista Peruana De Biología. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2013. Vol. 20, Nº 1. P. 067—074. DOI: 10.15381/rpb.v20i1.2621
158. Chavez F. P., Ryan J., Lluch-Cota S. E., Ñiquen M. From Anchovies to Sardines and Back: Multidecadal Change in the Pacific Ocean // Science, 2003. Vol. 299, Nº 5604. P. 217—221. DOI: 10.1126/science.1075880
159. Castillo P. R., Ñiquen M., La Cruz L. et al. Migration behavior of anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Northern Humboldt Current System between September 2019 and September 2020 // Latin American Journal Of Aquatic Research, 2021. Vol. 49, Nº 5. P. 702—716. DOI: 10.3856/vol49-issue5-fulltext-2669

160. Weathers K. C., Ewing H. A., Jones C. G., Strayer D. L. Controls on Ecosystem Structure and Function // *Fundamentals of Ecosystem Science*, Elsevier, 2012. P. 215—230. DOI: 10.1016/b978-0-08-091680-4.00011-1
161. Ayón P., Criales-Hernandez M. I., Schwamborn R., & Hirche H. Zooplankton research off Peru: A review // *Progress in Oceanography*. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 238—255. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.020
162. Louw G. G., van der Lingen C. D., Gibbons M. J. Differential feeding by sardine *Sardinops sagax* and anchovy *Engraulis capensis* in mixed shoals // *South African Journal of Marine Science*, 1998. Vol. 19, № 1, P. 227—232. DOI: 10.2989/025776198784126647
163. Espinoza P., Blaskovic V. Cambios en la dieta de la anchoveta *Engraulis ringens* y su influencia en la dinamica de alimentacion // *Boletin Instituto del Mar del Perú-Callao*. IMARPE, 2000. Vol. 19. P. 21—27
164. Ayón P., Swartzman G., Espinoza P., Bertrand A. (2011). Long-term changes in zooplankton size distribution in the Peruvian Humboldt Current System: conditions favouring sardine or anchovy // *Marine Ecology Progress Series (MEPS)*. Inter-Research Science Publisher 2011. Vol. 422. P. 211—222. DOI: 10.3354/meps08918
165. Espinoza P., Bertrand A. Ontogenetic and spatiotemporal variability in anchoveta *Engraulis ringens* diet off Peru // *Journal of Fish Biology*. Wiley Online Library, 2014. Vol. 84, № 2. P. 422—435. DOI: 10.1111/jfb.12293
166. Van der Lingen C. D. Diet of sardine *Sardinops sagax* in the southern Benguela upwelling ecosystem // *South African Journal of Marine Science*, 2002. Vol. 24, № 1. P. 301—316
167. Краснобородько О. Ю. О повторяемости очень сильных и катастрофических Эль-Ниньо и их влиянии на промысел в Перуанском подрайоне Юго-Восточной Пацифики // *Труды АтлантНИРО*. 2018. Том 2. № 2. Калининград: АтлантНИРО. С. 66—83.

168. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973 // Cah. O.R.ST.OM., Sér. Océanogr. 1974. Vol. 12. № 3. P. 187—201. 8.
169. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa // Rapports et Proces-verbaux des Réunions. Conseil International pour l'É exploration de la Mer. 1982. Vol. 180. P. 148—183
170. Grasse, P., Ryabenko, E., Ehlert, C., Altabet, M. A., & Frank, M. (2016). Silicon and nitrogen cycling in the upwelling area off Peru: A dual isotope approach. *Limnology and Oceanography*, 61(5), 1661–1676. <https://doi.org/10.1002/lno.10324>
171. Guillén O., Izaguirre De Rondán R. Nutrients in the Peru coastal current // *Oceanography of the South Pacific 1973*. Edited by: Fraser, R. National commission for UNESCO, P. 397—418.
172. Calienes R., Guillén O., Lostaunau N. Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frente a la costa peruana // *Boletín del Instituto del Mar del Perú – IMARPE*, 1985. Vol. 10. P. 6—12
173. Oliveros-Ramos R., Shin Y. Future climate change impacts on anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Northern Peru Current Ecosystem // *bioRxiv* (Cold Spring Harbor Laboratory), 2023. DOI: 10.1101/2023.02.14.528548
174. Strub P., Mesías J., Montecino V. et al. Coastal ocean circulation off western South America. Coastal Segment (6, E) / A. R. Robinson & K. H. Brink [eds.], *The Sea*. Wiley. New York, 1998. P. 273—313
175. Nelson D.M., Goering J.J., Boisseau D.W. Consumption and regeneration of Silicic Acid in three coastal upwelling systems // F. A. Richards [ed.], *Coastal Upwelling. Coastal and estuarine Science 1*. American Geophysical Union. Washington, 1981. P. 242-256.
176. Sánchez N., Jacobo N., Bernales N. et al. Seasonal variability in the distribution of phytoplankton in Paracas Bay/Peru, as a response to environmental conditions // *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2019. Vol. 13, № 5. DOI: 10.17265/2162-5263/2019.01.002

177. Hutchins D.A., Hare C.E., Weaver R.S. et al. Phytoplankton iron limitation in the Humboldt Current and Perú upwelling // *Limnology and Oceanography*. Association for the sciences of limnology and oceanography (ASLO), 2002. Vol. 47, № 4. P. 997—1011. DOI: 10.4319/lo.2002.47.4.0997
178. Bruland K.W., Rue E.L., Smith G.J., Ditullio G.R. Iron, macronutrients and diatom blooms in the Perú upwelling regime: brown and blue waters of Peru // *Marine Chemistry*. Elsevier, 2005. Vol. 93, № 2—4. P. 81—103. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.06.011
179. Morón O., Ledesma J. Aspectos químicos del mar peruano en agosto y setiembre 2000 // *Informe del Instituto del Mar del Perú – IMARPE*, 2001. Vol. 162. P. 43—50.
180. Purca, S. 2005. Variabilidad temporal de baja frecuencia en el Ecosistema de la Corriente Humboldt frente a Perú. Tesis de Doctorado. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 37pp.
181. Flores G., Graco M., Bouchon M. et al. Impact of the oceanographic variability in the phytoplankton community and the anchovy vertical distribution in front of Callao (12°S) Peru during 1997-2000 // *Extended Abstracts of the International Conference The Humboldt Current System Conference: Climate, ocean dynamics ecosystem processes and fisheries*. Lima, Peru. November 27-December 1, 2006. P. 135—136.
182. Graco M., Flores G., Ledesma J. et al. Biogeochemical variability in the oxygen minimum zone of the upwelling Humboldt system off central Peru // *Extended Abstracts of the International Conference The Humboldt Current System Conference: Climate, ocean dynamics ecosystem processes and fisheries*. Lima, Peru. November 27-December 1, 2006. P. 32—33.
183. ENFEN^c. Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú [Nota Técnica, 3p], 09 abril del 2012. Comité Técnico del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño / [Electronic resource]. — URL: <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-abril-2012->

definicion-operacional-de-loseventos-el-nino-y-la-nina-y-sus-magnitudes-en-la-costa-delperu/?wpdmdl=770&refresh=67530eb0e312b1733496496

184. Ochoa N., Caballero O., Sanchez S. et al. Diversidad de diatomeas y dinoflagelados marinos del Perú // Instituto del Mar del Perú - Callao. IMARPE, 1999. Vol. 18, № 1—2 / [Electronic resource]. — URL: <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/173>
185. Espinoza-Morriberón D., Chocña M., Jara H., Demarcq J. et al. Evaluating MODIS sea surface temperature data and chlorophyll-a data from both MODIS and SeaWiFS in the Peruvian Coastal Upwelling System // Journal of Applied Remote Sensing, 2024. Vol. 19, № 1. Article #014505. DOI: 10.1117/1.jrs.19.014505
186. Quiñones R., Gutiérrez G., Daneri D. et al. Pelagic carbon fluxes in the Humboldt Current System / Liu, K.-K., Atkinson, L., Quiñones, R., Talaue-McManus, L. (Eds.), Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: a Global Synthesis, Springer-Verlag, 2009, Weinheim. P. 44—64. Chapter 2.3. Series: Global Change-The IGBP Series.
187. Montecino V., Pizarro G. Productividad primaria, biomasa y tamaño del fitoplancton en canales y fiordos australes: patrones primavera-verano. In: Silva, N., Palma, S. (Eds.) / Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos., Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2006. Valparaíso. P. 93—97.
188. Iriarte J.L., González H., Liu K.K. et al. Spatial and temporal variability of chlorophyll and primary productivity in surface waters of southern Chile (41.5—43°S) // Estuarine, Coastal and Shelf Science. Elsevier, 2007. Vol. 74, № 3. P. 471—480. DOI: 10.1016/j.ecss.2007.05.015
189. Daneri G., Montero P., Lizarraga L. et al. Primary productivity and heterotrophic activity in an enclosed marine area of central Patagonia (Puyuhuapi channel; 44°S, 73°W) // Biogeosciences. European Geosciences Union (EGU), 2012. Vol. 9, № 5. P. 5929—5968. DOI: 10.5194/bgd-9-5929-2012

190. Miloslavich P., Klein E., Díaz J.M. et al. Marine Biodiversity in the Atlantic and Pacific Coasts of South America: Knowledge and Gaps // PLoS ONE, 2011. Vol 6, № 1: e14631. DOI: 10.1371/journal.pone.0014631
191. Longhurst A.R. Ecological Geography of the Sea. 2nd. Edition. Amsterdam; Boston, MA Elsevier Academic Press, 2007. 542 p.
192. Farías L., Besoain V., García-Loyola S. Presence of nitrous oxide hotspots in the coastal upwelling area off central Chile: an analysis of temporal variability based on ten years of a biogeochemical time series // Environmental Research Letters. Institute of Physics (IOP), 2015. Vol. 10, № 4. DOI: 10.1088/1748-9326/10/4/044017
193. Echevin V., Aumont O., Ledesma J., Flores, G. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peru upwelling system: a modelling study // Progress in Oceanography. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 167—176. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.026
194. Torres R. Condiciones oceanográficas y baja concentración de clorofila frente a Coquimbo-Chile (Lat. 30°S) durante 1992–1994 (M.Sc. thesis). Universidad de Concepcion 1995, Chile. 123 pp.
195. Escribano R., Morales C. Spatial and temporal scales of variability in the coastal upwelling and coastal transition zones off central-southern Chile (35–40°S) // Progress in Oceanography. Elsevier, 2012. Vol. 92—95. P. 1—7. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.07.019
196. Ayón P., Swartzman G., Bertrand A. et al. Zooplankton and forage fish species off Peru: large-scale bottom-up forcing and local-scale depletion // Progress in Oceanography. Elsevier, 2008. Vol. 79, № 2—4. P. 208–214. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.023
197. Cury P., Bakun A., Crawford R.J.M. et al. Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems // ICES Journal of Marine Science, 2000. Vol. 57, № 3. P. 603—618. DOI: 10.1006/jmsc.2000.0712

198. Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу: Теория, история, приложения. Л., Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
199. Richards F. A. Coastal Upwelling. Coastal and Estuarine Science, American Geophysical Union, Washington DC, Vol. 1. 1981. 215 p. DOI: 10.1029/CO001
200. Rebert J.P. Aperçu sur l'hydrologie du plateau continental ouest-africain de la Mauritanie a la Guinee / Report Ad Hoc Work Group West African Coastal Pelagic Fish from Mauritania to Liberia (26°N to 5°N). Series 78 / 10 (Fr.): 92-97 (annexe 9), 1979. ORSTOM, FAO, United Nations, Rome, Italy.
201. Elipot S., Gille S. Ekman layers in the Southern ocean: spectral models and observations, vertical viscosity and boundary layer depth // Ocean Science. European Geosciences Union (EGU), 2009. Vol. 5, № 2. P. 115—139. DOI: 10.5194/osd-6-277-2009
202. Скриптунова Л. И. Методы морских гидрологических прогнозов. – Л.; Гидрометеиздат, 1984. – 279 с.
203. Ижевский Г.К. Системная основа прогнозирования океанологических условий воспроизводства промысловых рыб. – М.: Пищепромиздат, 1961.– 215 с.
204. Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 295 с.
205. Яковлев В. Н. Гидрометеорологическое обеспечение океанического рыболовства. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 229 с.
206. Бочков Ю.А. Методические рекомендации по прогнозированию температуры воды в северном рыбопромысловом бассейне / Ю. Бочков. – Мурманск, ПИНРО, 1979. — 173 с.
207. Яковлев В. Н., Альтман Ю. С. Методические рекомендации по прогнозированию промыслово-океанологических характеристик некоторыми статистико-вероятностными методами. – Калининград: 1985. – 94 с.
208. Аверкиев А. С. и др. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов и программного комплекса «Призма» // Мурманск: ПИНРО. - 1997. - 39 С.

209. 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.
210. IMARPE, 2025. Situación del stock norte-centro de la Informe de la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) al 05 de abril y perspectiva de exploración para la primera temporada de pesca de 2025. Informes y Publicaciones - Instituto del Mar del Perú (IMARPE) - Plataforma del Estado Peruano / [Electronic resource]. — URL: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7923602/6668595-situacion-del-stock-norte-centro-de-la-anchoveta-peruana-engraulis-ringens.pdf?v=1744661475>.
211. Castillo P, Bouchón M., Vásquez, L. et al. Behaviour and size distribution of anchoveta (*Engraulis ringens*) under El Niño 2023 in the Northern Humboldt Current System // Scientia Marina, 2025. Vol. 89, № 1. DOI: 10.3989/scimar.05547.097
212. IMARPE. 2023. Informe de la pesca exploratoria de la anchoveta en la región norte-centro (del 03 al 07 de junio del 2023). Informes y Publicaciones - Instituto del Mar del Perú (IMARPE) - Plataforma del Estado Peruano / [Electronic resource]. — URL: <https://www.gob.pe/institucion/imarpe/informes-publicaciones/4317845-informe-de-la-pesca-exploratoria-de-la-anchovyen-la-region-norte-centro>