



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии
и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Океанографические условия у побережья Марокко и их пространственно-
временная изменчивость

Исполнитель Мищенко Анастасия Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

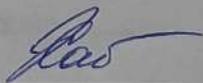
Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Чернышков Павел Петрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025.

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географическая характеристика прибрежной зоны Марокко	5
1.1 Общая физико-географическая характеристика региона	5
1.2 Апвеллинг у побережья Марокко как ключевой океанографический фактор	7
1.3 Сезонная и межгодовая изменчивость апвеллинга	9
1.4 Пространственная структура и интенсивность апвеллинга	12
1.5 Биопродуктивность вод и ее связь с интенсивностью апвеллинга	14
1.5.1 Структура трофических цепей в апвеллинговой зоне	17
1.5.2 Рыбопродуктивность как следствие апвеллинга	20
1.6 Влияние Эль–Ниньо на условия региона	20
1.6.1 Отклик Канарской системы течений на события Эль–Ниньо	22
1.6.2 Изменения интенсивности апвеллинга в годы Эль–Ниньо	24
1.6.3 Влияние на биопродуктивность и рыбные запасы	25
Глава 2. Материалы и методика	28
2.1 Район исследования и исходные данные	28
2.2 Оценка первичных статистик	30
2.3 Метод кластерного анализа	32
2.4 Тренд-анализ временных рядов	38
2.5 Прогнозирование временного ряда с использованием нейросетевого подхода в STATISTICA Neural Networks	40
Глава 3. Пространственно-временная изменчивость океанографических условий у побережья Марокко и возможность прогноза	48

3.1 Межгодовая изменчивость океанографических условий и результаты тренд-анализа	48
3.2 Долгопериодная изменчивость в многолетних рядах и результаты кластерного анализа	55
3.3 Влияние глобальных климатических циклов (ENSO) на океанографические условия акватории.....	71
3.4 Результаты прогнозирования термического режима прибрежных вод Марокко	77
Заключение	89
Список использованных источников	91

Введение

Прибрежные воды Марокко поддерживают одни из наиболее продуктивных промысловых районов Атлантического океана, обеспечивающих значительную часть мирового вылова мелких пелагических рыб. Резкие изменения океанографических условий, связанные с глобальными климатическими процессами, могут приводить к серьезным сдвигам в структуре и продуктивности морских экосистем, что непосредственно отражается на состоянии рыбных запасов. Выявление закономерностей таких изменений и их связи с климатическими циклами являются основой для разработки стратегий устойчивого рыболовства и адаптации рыбохозяйственного комплекса к изменяющимся условиям.

Актуальность работы заключается в выявлении связи между локальными океанографическими условиями у побережья Марокко и глобальными климатическими циклами, в частности Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO). Несмотря на значительную географическую удаленность от очага формирования этого явления (тропическая часть Тихого океана), имеются основания предполагать, что ENSO оказывает существенное влияние на гидрологический режим и биопродуктивность марокканских вод.

Основной целью данной работы является комплексный анализ пространственно – временной изменчивости океанографических условий у побережья Марокко на различных временных масштабах и выявление взаимосвязи между региональными гидрологическими процессами и глобальными климатическими циклами.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать межгодовую и сезонную изменчивость ключевых океанографических параметров (температуры поверхности океана, солености,

содержания растворенного кислорода и концентрации минерального фосфора) в трех секторах прибрежных вод Марокко за период 1993-2021 гг.

2. Выявить долгопериодные тренды в многолетних рядах океанографических параметров и оценить их статистическую значимость.

3. С помощью кластерного анализа идентифицировать характерные режимы термического и гидрохимического состояния вод в различные сезоны года и определить годы – аналоги с аномальными океанографическими условиями.

4. Установить взаимосвязь между океанографическими условиями у побережья Марокко и глобальными климатическими циклами, в частности ENSO, путем сопоставления локальных гидрологических параметров с индексом Южного колебания (SOI).

5. Проанализировать влияние изменчивости океанографических условий на динамику промысловых запасов основных промысловых видов рыб у побережья Марокко.

6. Разработать прогностическую модель для оценки будущих изменений термического режима прибрежных вод Марокко на основе выявленных закономерностей и связей с глобальными климатическими процессами.

Глава 1. Физико-географическая характеристика прибрежной зоны Марокко

1.1 Общая физико-географическая характеристика региона

Прибрежная зона Марокко простирается на протяжении более 3500 км вдоль двух морских бассейнов: Атлантического океана (около 2900 км) и Средиземного моря (около 600 км). Атлантическое побережье тянется от Танжера на севере до границы с Мавританией на юге, включая спорную территорию Западной Сахары (рис. 1). Побережье страны расположено на северо-западе Африканского континента между 21° и 36° северной широты. Такое расположение обеспечивает уникальное сочетание субтропических и тропических условий, что существенно влияет на характер океанических процессов в регионе. Особенно важное значение для океанографии имеет прибрежная зона между мысом Спартель на севере и мысом Бохадор на юге, где наиболее активно проявляется прибрежный апвеллинг [1].

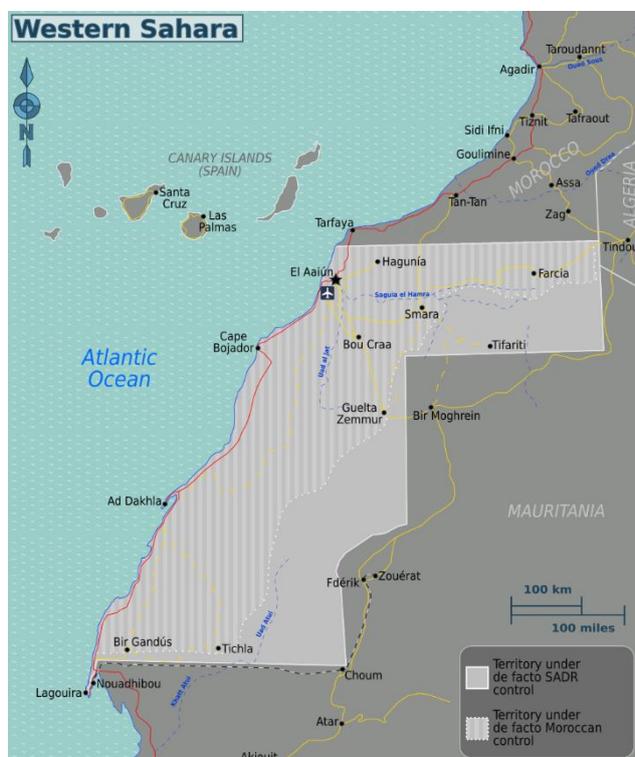


Рисунок 1. Карта Западной Сахары с изображением Марокко и Полисаро [1]

Прибрежный рельеф Марокко отличается значительным разнообразием. Северное атлантическое побережье характеризуется чередованием скалистых участков и песчаных пляжей, с прибрежными равнинами, переходящими во внутренние предгорья Рифа и Среднего Атласа [1]. Центральная часть атлантического побережья (от Рабата до Агадира) представлена обширными низменными равнинами и террасами, с широким континентальным шельфом, достигающим местами 50-80 км. Южнее Агадира побережье становится преимущественно скалистым, с узким шельфом (10-30 км) и крутым континентальным склоном.

Особенности рельефа морского дна существенно влияют на гидродинамику прибрежных вод. Широкий шельф в центральной части побережья создает благоприятные условия для развития апвеллинга, тогда как узкий шельф южной части обуславливает локальные особенности подъема глубинных вод. Батиметрический профиль характеризуется наличием нескольких подводных каньонов, которые также играют значительную роль в интенсификации апвеллинга в определенных районах [2].

Климат прибрежной зоны Марокко сформирован под влиянием нескольких факторов: субтропического положения, воздействия Атлантического океана, близости Сахары и наличия горных барьеров. Северная часть побережья характеризуется средиземноморским климатом с жарким сухим летом и мягкой влажной зимой. Среднегодовая температура здесь составляет около 18 – 20°C [3].

Центральная и южная части побережья имеют более засушливый климат схожий с пустынным на юге. Среднегодовая температура увеличивается к югу до 22 – 24°C [1]. Годовое количество осадков сокращается с севера на юг от 800 – 1000 мм до менее 200 мм. Прибрежная зона находится под постоянным влиянием северо-восточных пассатов и сезонных муссонов, формирующихся под воздействием Азорского максимума. Именно этот ветровой режим является ключевым в формировании прибрежного апвеллинга.

Гидрологический режим прибрежных вод Марокко определяется системой Канарского течения – холодного поверхностного течения, направленного с севера на юг вдоль побережья Северо-Западной Африки. Температура поверхностных вод варьирует от 16 – 18°C в северной части зимой до 22 – 26°C в южной части летом. Однако в зонах активного апвеллинга температура может опускаться до 14 – 16°C даже в летний период [4].

Соленость прибрежных вод колеблется в пределах 35.5 – 36.5‰, увеличиваясь к югу и в периоды интенсивного испарения. На гидрологический режим также влияют сезонные изменения в интенсивности Канарского течения и его взаимодействие с более глубинными водными массами. Особенно важной является сезонная стратификация водных масс, которая нарушается в периоды активного апвеллинга.

1.2 Апвеллинг у побережья Марокко как ключевой океанографический фактор

Апвеллинг у побережья Марокко представляет собой процесс подъема холодных глубинных вод на поверхность, являющийся частью крупной системы апвеллинга в Канарском течении (рис. 2). Основным механизмом его формирования служит экмановский транспорт – процесс, при котором ветровое воздействие на поверхность океана в сочетании с силой Кориолиса вызывает смещение поверхностных вод от берега перпендикулярно направлению ветра [5].

В системе Канарского течения пассатные ветра, дующие параллельно берегу с севера и северо-востока, вызывают отток поверхностных вод в западном направлении (в сторону открытого океана). Этот отток компенсируется подъемом холодных вод с глубины 100-300 метров, богатых питательными веществами [6]. Особенности береговой линии и топографии морского дна создают локальные вариации в интенсивности апвеллинга.

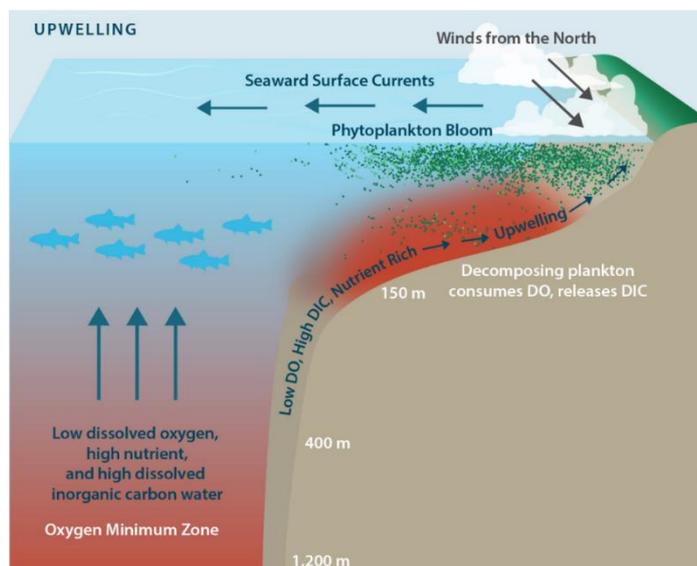


Рисунок 2. Схема формирования прибрежного апвеллинга [5]

Помимо ветрового апвеллинга, у побережья Марокко наблюдаются и другие механизмы подъема глубинных вод: топографический апвеллинг (связанный с особенностями рельефа дна), фронтальный апвеллинг (на границе водных масс) и апвеллинг, связанный с циклоническими вихрями, формирующимися у некоторых мысов побережья [7, 8].

Ветровой режим является решающим фактором в формировании и интенсивности прибрежного апвеллинга у берегов Марокко. Доминирующими являются пассатные ветра северо-восточного направления, формирующиеся в зоне влияния Азорского антициклона. Их интенсивность и устойчивость имеют выраженную сезонную изменчивость.

Максимальная сила и устойчивость пассатов наблюдается летом (июнь-сентябрь) в центральной и южной частях побережья, что соответствует периоду наиболее интенсивного апвеллинга в этих районах. В северной части пик интенсивности ветров и, соответственно, самого апвеллинга смещается на весенний период (апрель-май). Зимой интенсивность пассатов снижается, периодически сменяясь юго-западными ветрами, особенно в северной части

побережья, что в свою очередь приводит к ослаблению или полному прекращению апвеллинга [9].

Взаимодействие Канарского течения с особенностями рельефа шельфа и континентального склона формирует местные вариации в циркуляции вод. Особенно важную роль играют подводные каньоны, такие как Агадир и Кап-Гир, которые действуют как своеобразные "каналы" для подъема глубинных вод, усиливая локальную интенсивность апвеллинга.

Кроме того, выступающие мысы побережья (Кап-Гир, Кап-Бедузза, Кап-Дра) создают эффект "мысового апвеллинга", где из-за их обтекания течениями формируются циклонические вихри, усиливающие подъем глубинных вод [10]. Эти районы характеризуются наиболее стабильным и интенсивным апвеллингом.

1.3 Сезонная и межгодовая изменчивость апвеллинга

Годовой цикл апвеллинга вдоль побережья Марокко характеризуется выраженной пространственно-временной изменчивостью и отражается в изменениях температуры поверхности моря, которая в зонах активного подъема глубинных вод может быть на 4 – 8°C ниже, чем в окружающих водах. Это создает характерный температурный градиент между прибрежной зоной и открытым океаном, который наиболее выражен в периоды максимальной интенсивности апвеллинга.

В прибрежной зоне данного района максимальная интенсивность апвеллинга наблюдается в разные сезоны в зависимости от широты. Эта асинхронность связана с сезонным смещением оси Азорского антициклона и связанных с ним пассатных ветров.

Данная исследуемая область может быть условно разделена на три основных сектора, каждый из которых имеет свои особенности сезонной динамики апвеллинга (рис. 3).

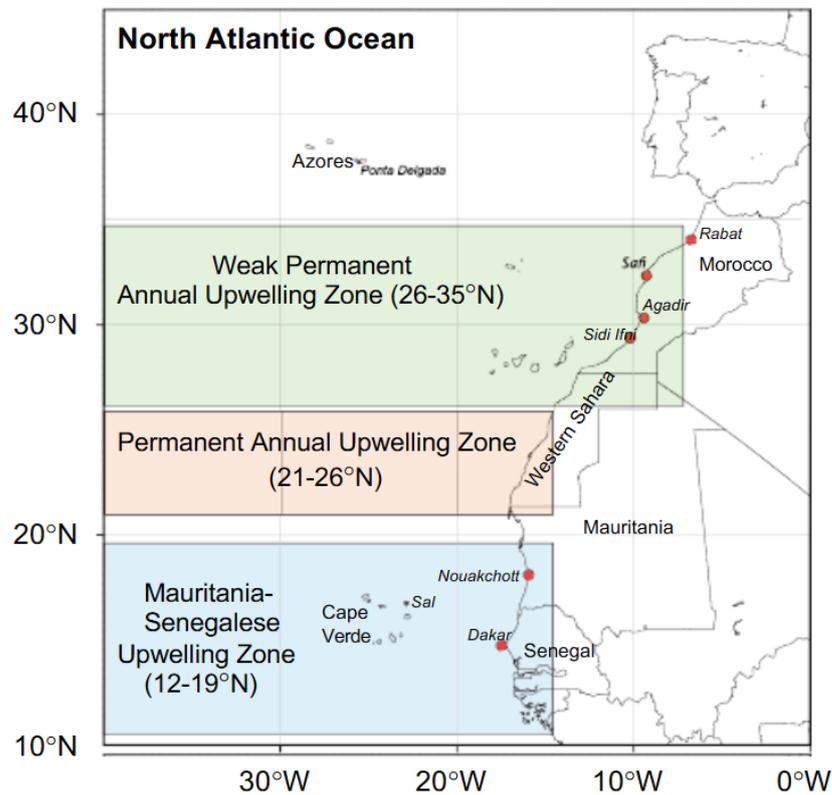


Рисунок 3. Северо-западная Африка регион с тремя зонами апвеллинга [3]

В северной части побережья (севернее 33° с.ш.) наиболее интенсивный апвеллинг наблюдается в период с июня по сентябрь, когда постоянные северо-восточные ветры создают оптимальные условия для экмановского переноса. Скорость подъема глубинных вод в этот период может достигать 10 – 15 м/сутки, что приводит к снижению ТПО до 16 – 18°C при фоновых значениях 22 – 24°C [11].

В центральном секторе побережья (30° – 33° с.ш.) пик интенсивности приходится на период с апреля по август, с максимумом обычно в мае-июне, когда скорость подъема вод может достигать 20 м/сутки.

В южном секторе (южнее 30° с.ш.) максимальная интенсивность апвеллинга наблюдается весной и в начале лета (март – июнь), с последующим ослаблением в осенний период. Но даже в периоды минимальной активности апвеллинг здесь не прекращается полностью.

Периоды минимальной интенсивности в северной части приходятся в основном на зимние месяцы (ноябрь-февраль), когда апвеллинг может

полностью прекращаться или сменяться даунвеллингом (опусканием поверхностных вод) из-за преобладания юго-западных ветров. В центральной и южной частях минимальная интенсивность наблюдается осенью (октябрь-ноябрь), но апвеллинг все равно сохраняется в ослабленном виде.

У побережья Марокко апвеллинг подвержен значительным межгодовым колебаниям как по интенсивности, так и по продолжительности активной фазы. Основными причинами являются: изменения в интенсивности и позиции Азорского антициклона, которые напрямую влияют на силу и направление пассатных ветров; североатлантическое колебание (NAO) – крупномасштабный атмосферный процесс, определяющий разность атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом [12]. Положительная фаза NAO обычно ассоциируется с усилением апвеллинга в северной и центральной частях побережья; атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO) – долгопериодное колебание температуры поверхности Северной Атлантики с циклом около 60 – 70 лет, влияющее на интенсивность апвеллинга через изменения в циркуляции атмосферы и океана и удаленные взаимосвязи с Эль-Ниньо – Южным колебанием (ENSO), которые могут влиять на апвеллинг через атмосферные потоки и изменения в глобальной циркуляции атмосферы.

Наиболее значительные аномалии апвеллинга наблюдались в 1969, 1973, 1984, 1995, 2003 и 2010 годах (усиление) и в 1976, 1989, 1997, 2005 и 2015 годах (ослабление). Некоторые из этих аномалий коррелируют с экстремальными событиями ENSO, что может указывать на их возможную взаимосвязь [13].

Анализ долговременных наблюдений за интенсивностью апвеллинга позволяет выявить определенные климатические тренды. Исследования, основанные на данных ТПО, силе ветра и концентрации хлорофилла за период с 1970-х годов по настоящее время, позволяют выделить несколько ключевых тенденций: в северном и центральном секторах побережья (36°-30° с.ш.) наблюдается тенденция к усилению интенсивности апвеллинга в летний сезон

(июнь-сентябрь) примерно на 15 – 20% за последние 40 лет [13]. Это усиление связывают с интенсификацией пассатных ветров вызванных увеличением контрастов давления между континентом и океаном в условиях глобального потепления. В южном секторе (южнее 30° с.ш.) некоторые исследования указывают на незначительное ослабление интенсивности апвеллинга, особенно в весенний период, но эти данные неоднозначны. Отмечается тенденция к продлению сезона активного апвеллинга в северном секторе, с более ранним началом (на 10 – 15 дней за последние 30 лет) и более поздним окончанием. Наблюдается увеличение пространственной изменчивости апвеллинга с формированием более выраженных локальных максимумов интенсивности, особенно вблизи мысов и подводных каньонов.

1.4 Пространственная структура и интенсивность апвеллинга

Прибрежный апвеллинг у берегов Марокко характеризуется значительной пространственной неоднородностью, обусловленной как геоморфологическими условиями побережья, так и региональными особенностями ветрового поля. В результате чего можно выделить несколько характерных зон с различающимися режимами апвеллинга: зона Танжер-Ларраш (35.5°-35° с.ш.) характеризуется относительно слабым сезонным апвеллингом, активным преимущественно в летний период. Узкий шельф и влияние вод Гибралтарского пролива ограничивают развитие устойчивого апвеллинга в этом районе. Зона Рабат-Касабланка (34°-33° с.ш.) отличается умеренным по интенсивности летним апвеллингом, с периодическими вспышками весенней активности. Здесь формируются относительно небольшие, но устойчивые локальные апвеллинги. Зона Эс-Сувейра-Сафи (32°-31° с.ш.) является одной из ключевых в районе апвеллинга, т.к. обладает высокой интенсивностью подъема вод практически круглогодично. Широкий шельф и благоприятные ветровые условия способствуют устойчивому апвеллингу. Зона мыса Гир (31°-30° с.ш.) представляет собой наиболее

интенсивный центр апвеллинга у марокканского побережья. Особенности береговой линии и рельефа дна создают здесь идеальные условия для интенсивного подъема глубинных вод. В зоне Агадир-Тарфая (30°-28° с.ш.) наблюдается стабильный апвеллинг средней интенсивности. Зона Кап-Бохадор-Дахла (26°-23° с.ш.) отличается постоянным апвеллингом без выраженной сезонности, но с периодическими изменениями интенсивности [14].

Такая пространственная структура апвеллинга создает «мозаику» условий вдоль побережья, которая отражается на распределении биопродуктивности.

Вертикальная структура вод в зоне апвеллинга обладает сложной стратификацией и динамикой. В условиях его активности типичный вертикальный профиль водного столба условно можно разделить на несколько характерных слоев (рис. 4).

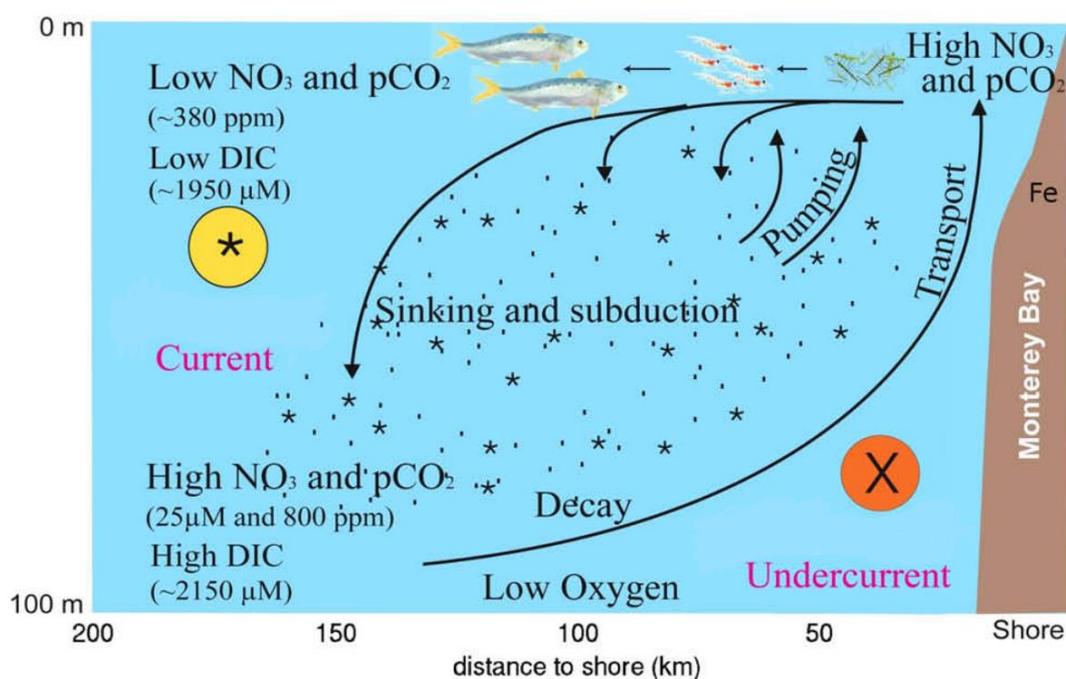


Рисунок 4. Вертикальное распределение шельфа в зоне апвеллинга [15]

Поверхностный слой от 0 до 20 м (зона активного апвеллинга) отличается пониженной температурой (14 – 18°C в зависимости от сезона и локации) и повышенной соленостью (около 36.0 – 36.3‰) по сравнению с окружающими водами. Этот слой обогащен биогенными элементами (нитратами, фосфатами и силикатами), что создает условия для интенсивного роста фитопланктона.

Подповерхностный слой (20 – 100 м) характеризуется формированием термоклина – зоны резкого изменения температуры с глубиной. В периоды интенсивного апвеллинга термоклин может подниматься почти к поверхности или даже временно разрушаться в прибрежной зоне из-за интенсивного перемешивания. На расстоянии 20 – 50 км от берега термоклин обычно выражен более четко и залегает ближе к глубине [16].

Промежуточный слой (100 – 500 м) состоит из вод Южно-Атлантических центральных водных масс (SACW) в южной части побережья и Северо-Атлантических центральных водных масс (NACW) в северной части. Именно эти воды поднимаются к поверхности в процессе апвеллинга, принося с собой высокие концентрации питательных веществ.

Глубинный слой (ниже 500 м) включает более плотные промежуточные и глубинные водные массы Атлантического океана, которые редко участвуют в процессе апвеллинга, но могут влиять на состав подповерхностных вод.

Вертикальная структура значительно варьируется в зависимости от интенсивности поднятия глубинных вод, сезона и конкретного участка побережья. В периоды сильного апвеллинга изотермы и изохалины (линии равной температуры и солености) круто поднимаются к поверхности в прибрежной зоне. В периоды слабого апвеллинга или его отсутствия формируется более выраженная стратификация с теплым поверхностным слоем и четким термоклинном.

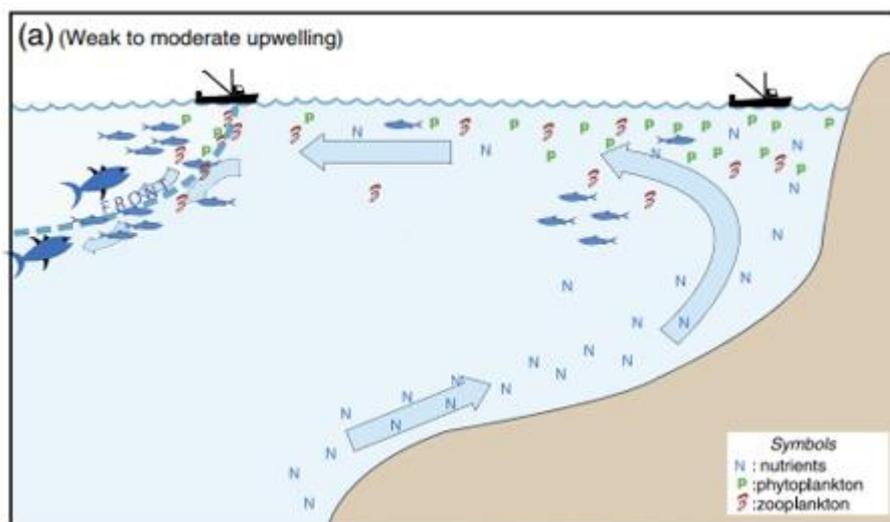
1.5 Биопродуктивность вод и ее связь с интенсивностью апвеллинга

Апвеллинг является ключевым механизмом, обеспечивающим высокую биопродуктивность прибрежных вод через обогащение поверхностного слоя биогенными элементами (рис. 5).

Глубинные воды, поднимающиеся в процессе апвеллинга (преимущественно с глубин 100 – 300 м), содержат высокие концентрации основных биогенных элементов: нитратов (NO_3^-), фосфатов (PO_4^{3-}) и силикатов ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Эти элементы накапливаются на глубине в результате минерализации органического вещества, опускающегося из поверхностных слоев.

Концентрации нитратов в глубинных водах достигают 15 – 25 ммоль/л, фосфатов – 1.5 – 2.5 ммоль/л, силикатов – 10 – 20 ммоль/л, что в 10 – 20 раз превышает их содержание в поверхностных водах открытого океана [17].

При активном апвеллинге глубинные воды богатые биогенами поднимаются в фотический слой, где эти элементы становятся доступными для фитопланктона. Скорость вертикального подъема вод может достигать 10 – 20 м/сутки в периоды интенсивного апвеллинга.



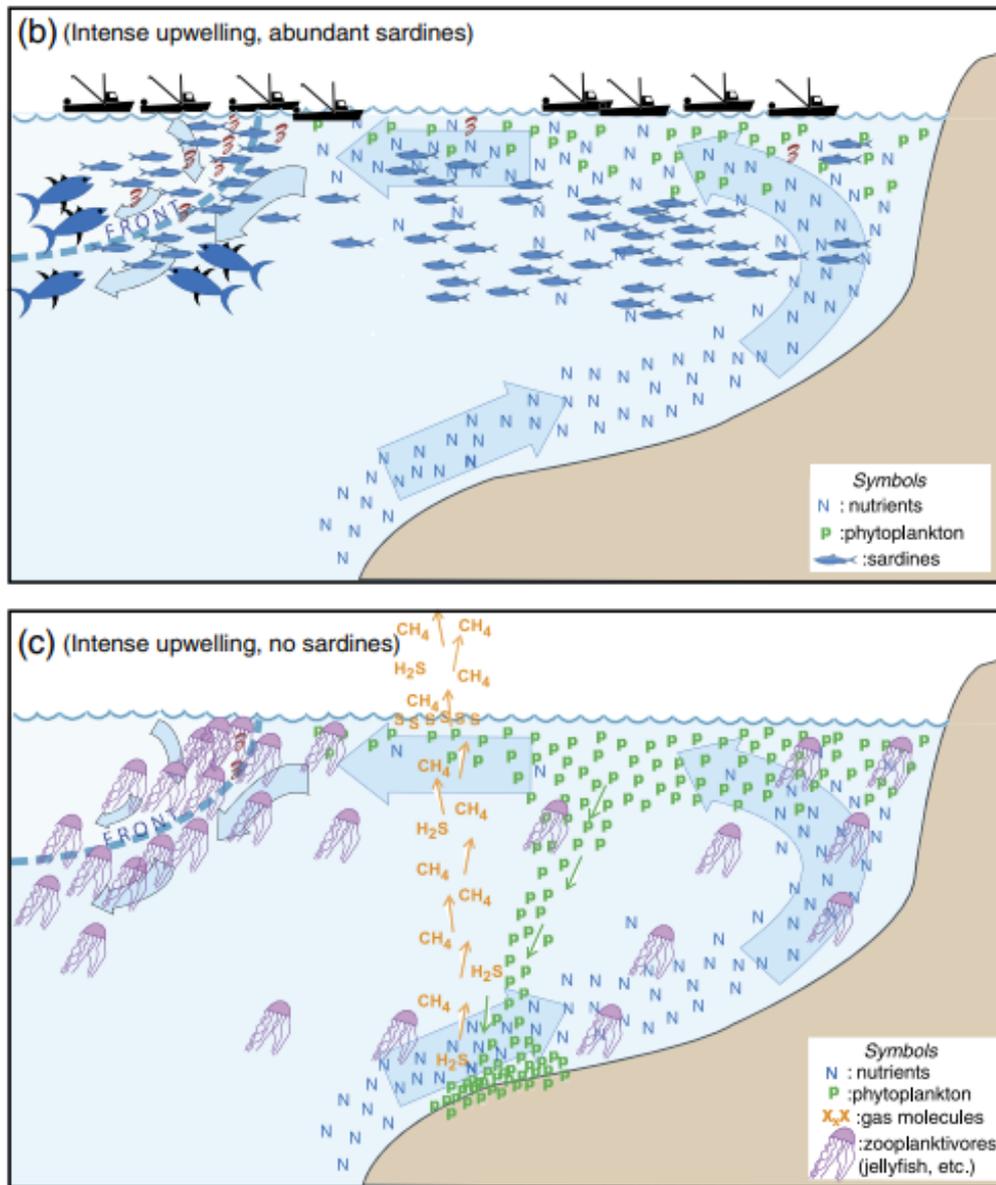


Рисунок 5. Диаграмма, иллюстрирующая разную интенсивность апвеллинга [18]

Помимо вертикального подъема, основным механизмом также является горизонтальный адвективный перенос биогенов с прибрежными течениями на расстояние до 200 – 300 км от берега, в следствие чего значительно расширяется зона повышенной продуктивности.

Концентрация биогенных элементов в поверхностных водах подвержена выраженной сезонной и пространственной изменчивости, тесно коррелирующей с интенсивностью апвеллинга. В периоды активного

поднятия вод концентрация нитратов в поверхностном слое может достигать 10 – 15 ммоль/л, что сопоставимо с содержанием в глубинных водах.

Наибольшие концентрации биогенов в поверхностном слое наблюдаются в ключевых зонах апвеллинга – у мысов Гир и Бохадор, где формируются устойчивые зоны высокопродуктивных вод.

Можно сказать, что апвеллинг создает уникальную гидрохимическую систему, обеспечивающую постоянное обновление запасов питательных веществ в фотическом слое, что поддерживает высокую биологическую продуктивность региона.

Первичная продукция, представляющая собой синтез органического вещества фитопланктоном в процессе фотосинтеза, является основой морской пищевой цепи и индикатором биологической продуктивности экосистемы. Прибрежные воды Марокко, благодаря интенсивному апвеллингу, характеризуются исключительно высокими показателями первичной продукции. Её среднегодовая концентрация в зонах активного апвеллинга составляет 2 – 4 гС/м²/день (граммов углерода на квадратный метр в день), что соответствует 700 – 1500 гС/м²/год. Это приблизительно в 3 – 5 раз выше, чем в окружающих водах открытого океана, и сопоставимо с наиболее продуктивными районами Мирового океана. В периоды максимальной интенсивности апвеллинга первичная продукция может достигать критических значений 5 – 7 гС/м²/день, особенно в районах мыса Гир и Кап-Драа. Годы с экстремально высокими значениями продукции (например, 1996, 2003, 2012) обычно совпадают с периодами усиления апвеллинга, связанного с крупномасштабными климатическими процессами, например, фазы NAO и ENSO [18].

1.5.1 Структура трофических цепей в апвеллинговой зоне

Апвеллинговая экосистема прибрежных вод характеризуется специфической структурой трофических цепей, адаптированной к условиям высокой и переменной биопродуктивности (рис. 6).

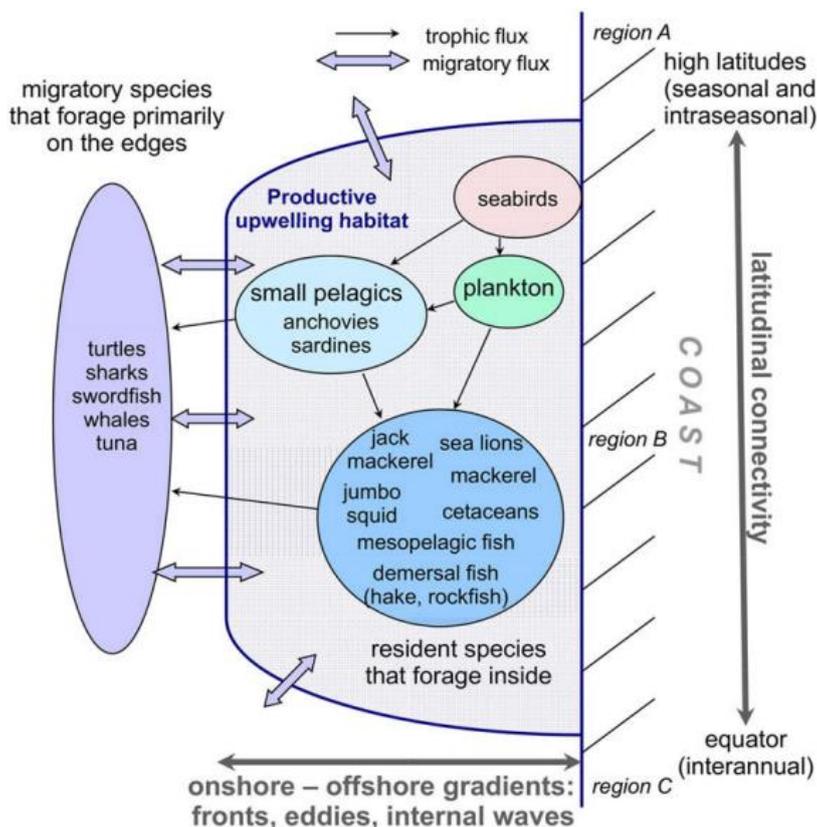


Рисунок 6. Модель трофической структуры экосистемы апвеллинга [13]

Фитопланктон в зонах активного апвеллинга имеет характерный видовой состав с доминированием диатомовых водорослей (родов *Chaetoceros*, *Thalassiosira*, *Rhizosolenia*), способных быстро наращивать биомассу в условиях высоких концентраций биогенных элементов. В периоды максимальной интенсивности апвеллинга диатомовые могут составлять до 70 – 90% общей биомассы фитопланктона.

По мере удаления от центров апвеллинга и стабилизации водного столба происходит сукцессия фитопланктонного сообщества, которая приводит к росту мелкого жгутикового планктона и увеличению доли динофлагеллят,

которые достаточно часто формируются на границах апвеллинга и способны к вертикальным миграциям.

Зоопланктонные сообщества отличаются высокой биомассой в районе апвеллинговых зон и адаптацией к переменным условиям среды. Доминируют копеподы (*Calanus*, *Centropages*, *Acartia*), эвфаузииды и меропланктон (личиночные стадии донных животных). Общая биомасса зоопланктона может достигать 100 – 300 мг/м³, что в 5 – 10 раз выше, чем в окружающих водах.

В прибрежной зоне Марокко формируются специфические структуры высших трофических уровней с доминированием пелагических видов рыб, представленных преимущественно семейством *Clupeidae*:

- Европейская сардина (*Sardina pilchardus*);
- Европейская сардинелла (*Sardinella aurita*);
- Европейский анчоус (*Engraulis encrasicolus*);
- Скумбрии (*Scomber colias*, *S. scombrus*);
- Ставриды (*Trachurus trachurus*, *T. picturatus*).

Данные виды специализируются на питании зоопланктоном, имеют короткий жизненный цикл и высокую плодовитость, что позволяет им быстро наращивать численность при благоприятных условиях.

На вершине трофической пирамиды находятся хищные рыбы (тунцы, пеламиды), морские млекопитающие (дельфины, малые полосатики) и морские птицы (олуши, буревестники), численность которых также значительно выше в апвеллинговой зоне, чем в окружающих водах.

Отличительной особенностью апвеллинговых экосистем является высокая эффективность передачи энергии по трофической цепи. Если в типичных морских экосистемах эффективность передачи между трофическими уровнями составляет около 10%, то в апвеллинговой зоне Марокко она может достигать 15 – 20%, что объясняет исключительно высокую рыбопродуктивность этих вод.

Короткие пищевые цепи (фитопланктон → зоопланктон → пелагические рыбы) способствуют более эффективной передаче энергии. Биомасса

пелагических рыб может составлять до 1% от первичной продукции, что значительно выше среднеокеанических значений (0.1 – 0.3%) [19].

1.5.2 Рыбопродуктивность как следствие апвеллинга

Прибрежная зона Марокко, благодаря интенсивному апвеллингу, является одним из наиболее продуктивных рыболовных регионов мира.

Общий потенциальный вылов в марокканских водах оценивается в 1.5 – 2 млн тонн в год, что составляет около 2 – 3% мирового морского промышленного вылова при том, что прибрежная зона Марокко занимает менее 0.5% площади Мирового океана.

Продуктивность пелагического рыболовства достигает исключительно высоких показателей – до 10 – 15 тонн/км² в год в ключевых районах апвеллинга (мыс Гир, Кап-Бохадор), что в 20 – 30 раз превышает среднемировые показатели для шельфовых зон (0.5 тонн/км² в год).

Распределение промысловых скоплений рыб имеет явную привязку к зонам апвеллинга и его фронтальным границам:

- Основные промысловые скопления сардины формируются в районах постоянного апвеллинга между Сафи и Агадиром, а также в районе Кап-Бохадор;
- Сардинелла более многочисленна в южных районах (южнее 26° с.ш.);
- Анчоус предпочитает фронтальные зоны на границах апвеллинга;
- Демерсальные виды концентрируются на шельфе в зонах, куда поступает органическое вещество из поверхностных продуктивных слоев.

1.6 Влияние Эль–Ниньо на условия региона

Несмотря на географическую удаленность Тихого океана от Атлантики, явление Эль–Ниньо - Южное Колебание (ENSO), формирующееся в экваториальной части Тихого океана, оказывает заметное влияние на

климатические и океанологические условия у побережья Марокко через механизмы атмосферно-океанической телеконнекции.

Основным механизмом далекодействующего влияния ENSO является модификация глобальной атмосферной циркуляции. Аномальный нагрев поверхности экваториальной части Тихого океана во время Эль-Ниньо вызывает усиление конвекции и выделение скрытого тепла в атмосферу, что приводит к возникновению атмосферных волн Россби. Эти волны распространяются в восточном и западном направлениях, изменяя характер атмосферной циркуляции над различными регионами планеты [20].

В Северном полушарии формируется так называемый "атмосферный мост" через Северную Америку, который модифицирует струйные течения и положение центров действия атмосферы над Северной Атлантикой, включая Азорский антициклон – ключевой элемент, определяющий интенсивность пассатных ветров у побережья Марокко.

Исследования показали, что события Эль-Ниньо статистически связаны с негативной фазой Североатлантического колебания (NAO) в последующий зимний сезон [21]. NAO является доминирующим атмосферным режимом над Северной Атлантикой, характеризующим разность давления между Азорским антициклоном и Исландской депрессией.

Во время негативной фазы NAO Азорский антициклон ослабевает и смещается к югу, что приводит к ослаблению северо-восточных пассатных ветров вдоль побережья Марокко и, соответственно, к снижению интенсивности апвеллингам [22].

Помимо атмосферных механизмов, существуют и океанические пути телеконнекции:

1. Экваториально-волновой механизм: волны Кельвина, генерируемые в Тихом океане во время Эль-Ниньо, могут проникать через Панамский перешеек в Карибское море и далее в Атлантику, влияя на циркуляцию Атлантического океана.

2. Изменения в термохалинной циркуляции: крупномасштабные изменения в океанической циркуляции, вызванные ENSO, могут влиять на интенсивность Гольфстрима и Северо-Атлантического течения, что в свою очередь отражается на Канарском течении.

Влияние Эль-Ниньо на условия у побережья Марокко проявляется с определенной временной задержкой:

- Атмосферный отклик наблюдается с шагом в 3-6 месяцев после пика Эль-Ниньо в Тихом океане;
- Океанический отклик более инерционный и может проявляться с задержкой до 12-18 месяцев.

Эта временная задержка создает потенциальную возможность для сезонного прогнозирования условий апвеллинга у побережья Марокко на основе наблюдений за развитием ENSO в Тихом океане [23].

1.6.1 Отклик Канарской системы течений на события Эль-Ниньо

Канарская система течений, являющаяся восточной ветвью Северо-Атлантического субтропического круговорота, демонстрирует заметный отклик на события Эль-Ниньо, что отражается на океанографических условиях у побережья Марокко.

Во время и после сильных событий Эль-Ниньо наблюдается ослабление Канарского течения на 10 – 20% по сравнению с нормальными условиями. Это связано с общим ослаблением системы пассатных ветров и модификацией поля атмосферного давления над Северной Атлантикой [20].

Помимо изменений в интенсивности, наблюдается также структурная перестройка течения: его ось может смещаться на 50 – 100 км в западном направлении (дальше от берега), что влияет на прибрежную циркуляцию и процессы апвеллинга.

События Эль-Ниньо обычно сопровождаются положительными аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) у побережья Марокко,

особенно в зимне-весенний период. Эти аномалии могут достигать $+1.0...+1.5^{\circ}\text{C}$ в северной части побережья и $+0.5...+1.0^{\circ}\text{C}$ в центральной и южной частях [21].

Повышение ТПО связано как с ослаблением апвеллинга, так и с общим перераспределением тепла в Атлантическом бассейне в результате изменений атмосферной циркуляции и океанических течений.

В периоды влияния Эль–Ниньо наблюдается усиление стратификации водного столба у побережья Марокко, особенно в весенний и летний периоды. Верхний квазиоднородный слой углубляется на 10 – 30%, а термоклин становится более резким.

Усиленная стратификация создает дополнительное сопротивление подъему глубинных вод даже при сохранении благоприятного ветрового режима, что еще больше ослабляет интенсивность апвеллинга.

События Эль–Ниньо влияют на положение и интенсивность Азорского максимума, что приводит к изменениям в общей структуре циркуляции субтропической Атлантики:

- Ослабление северного пассатного компонента;
- Усиление зональной (восточно-западной) составляющей циркуляции;
- Модификация положения океанических фронтов, в частности Азорского фронта.

Эти крупномасштабные изменения создают "фоновые условия", определяющие интенсивность и характер региональных процессов у побережья Марокко [22].

Отклик Канарской системы на Эль–Ниньо имеет выраженные региональные особенности: северная часть системы (у побережья Португалии и Северного Марокко) демонстрирует наиболее сильный отклик с явным ослаблением течения и апвеллинга; центральная часть ($30-25^{\circ}$ с.ш.) показывает умеренный отклик с периодическим ослаблением апвеллинга; южная часть (южнее 25° с.ш.) характеризуется меньшей чувствительностью к сигналам ENSO.

Такая пространственная неоднородность отклика объясняется различиями в доминирующих механизмах формирования течений и апвеллинга в разных секторах побережья.

1.6.2 Изменения интенсивности апвеллинга в годы Эль-Ниньо

События Эль-Ниньо оказывают заметное влияние на интенсивность апвеллинга у побережья Марокко, хотя это влияние имеет выраженную пространственно-временную специфику.

Анализ индекса апвеллинга Баккуна (основанного на экмановском транспорте) показывает, что в годы сильных событий Эль-Ниньо (например, 1982–83, 1997–98, 2015–16) интенсивность апвеллинга в северном и центральном секторах побережья Марокко снижается на 20 – 40% по сравнению со среднемноголетними значениями [23].

В южном секторе (южнее 25° с.ш.) влияние менее выражено – снижение составляет около 10–15%, а в некоторые сезоны может даже наблюдаться незначительное усиление апвеллинга из-за региональных особенностей атмосферной циркуляции.

Наиболее сильное влияние Эль-Ниньо на апвеллинг у побережья Марокко наблюдается в зимне-весенний период (январь-май), следующий за пиком развития Эль-Ниньо в Тихом океане (который обычно приходится на декабрь-январь).

Летом влияние Эль-Ниньо ослабевает, и в некоторых районах (особенно в центральном секторе) интенсивность апвеллинга может восстанавливаться до близких к норме значений [24].

Снижение интенсивности апвеллинга в годы Эль-Ниньо связано с несколькими факторами:

1. Ослабление пассатных ветров вдоль побережья из-за модификации положения и интенсивности Азорского антициклона. Средняя скорость ветра может снижаться на 15 – 25%, что напрямую влияет на экмановский перенос.

2. Изменение направления преобладающих ветров с более выраженной зональной компонентой, менее благоприятной для формирования апвеллинга.

3. Усиление стратификации водного столба из-за общего повышения температуры поверхности Атлантики, что создает дополнительное сопротивление подъему глубинных вод.

4. Изменения в крупномасштабной циркуляции Атлантики, влияющие на структуру и положение Канарского течения.

Исследования последних десятилетий показали, что различные типы Эль–Ниньо могут по-разному влиять на условия у побережья Марокко:

- "Канонический" Эль-Ниньо (с максимальным нагревом в восточной части Тихого океана) обычно оказывает более сильное влияние на апвеллинг у побережья Марокко;

- Эль-Ниньо "Модоки" (с максимальным нагревом в центральной части Тихого океана) демонстрирует более слабую телеконнекцию с Северной Атлантикой.

В годы Эль-Ниньо наблюдается не только общее ослабление апвеллинга, но и изменения в его пространственной структуре: зоны апвеллинга могут смещаться на 20 – 50 км к югу от их типичного положения; уменьшается пространственная протяженность апвеллинговых зон; снижается выраженность апвеллинговых границ и их протяженность в океан; усиливается пятнистость распределения зон апвеллинга вдоль побережья.

1.6.3 Влияние на биопродуктивность и рыбные запасы

Изменения в интенсивности апвеллинга, связанные с событиями Эль-Ниньо, оказывают значительное влияние на биопродуктивность прибрежных вод Марокко и состояние рыбных запасов.

В годы сильных событий Эль-Ниньо наблюдается снижение первичной продукции в прибрежных водах Марокко на 15 – 30% по сравнению со среднегодовыми значениями [25]. Это снижение напрямую связано с

уменьшением поступления биогенных элементов из глубинных слоев в результате ослабления апвеллинга.

Спутниковые данные по концентрации хлорофилла показывают, что наиболее значительное снижение биопродуктивности наблюдается в северной и центральной частях побережья в зимне-весенний период, следующий за пиком Эль–Ниньо в Тихом океане [26].

Помимо общего снижения, происходят изменения в сезонной динамике первичной продукции: весенний пик биопродуктивности может задерживаться на 2 – 4 недели, а его интенсивность снижается на 20 – 40% [27].

В условиях ослабленного апвеллинга и усиленной стратификации водного столба происходят изменения в видовом составе фитопланктона: снижается доминирование диатомовых водорослей, характерных для интенсивного апвеллинга; увеличивается доля динофлагеллят и мелких жгутиковых форм, более адаптированных к стратифицированным условиям; в некоторых случаях повышается риск формирования вредоносных водорослевых цветений.

Влияние событий Эль–Ниньо на запасы пелагических рыб проявляется с временной задержкой и имеет комплексный характер: [28]

1. Краткосрочные эффекты (в течение года после события): изменения в распределении промысловых скоплений из-за смещения зон апвеллинга; миграция рыбных скоплений в более южные районы или на большую глубину; снижение доступности рыбы для промысла, особенно в северных районах; возможное снижение уловов на 10 – 20% от среднемноголетних значений.

2. Среднесрочные эффекты (1 – 2 года после события): снижение эффективности нереста и выживаемости личинок из-за менее благоприятных условий питания; уменьшение пополнения запасов молодью, что ведет к снижению общей биомассы промысловых популяций; наиболее заметное снижение запасов сардины и анчоуса (до 20 – 30%), как наиболее чувствительных к изменениям в апвеллинге видов; возможное повышение

доли запасов более южных видов (сардинелла) в общей биомассе пелагических рыб.

Разные промысловые виды демонстрируют различную чувствительность к изменениям, связанным с Эль–Ниньо: [29]

Европейская сардина (*Sardina pilchardus*) наиболее чувствительна к снижению интенсивности апвеллинга. В годы сильных событий Эль–Ниньо и последующие 1 – 2 года наблюдается снижение биомассы и уловов на 20 – 30%.

Европейский анчоус (*Engraulis encrasicolus*) также демонстрирует негативный отклик, но с возможной временной задержкой и более сложной пространственной динамикой.

Круглая сардинелла (*Sardinella aurita*) может демонстрировать противоположную реакцию, увеличивая численность и расширяя ареал к северу во время и после событий Эль–Ниньо, что связано с общим потеплением вод и смещением термических фронтов.

Скумбрии и ставриды, как более мобильные хищные виды, показывают меньшую прямую зависимость от изменений апвеллинга, но косвенно реагируют через изменения в доступности кормовых объектов.

Глава 2. Материалы и методика

2.1 Район исследования и исходные данные

В рамках ранее проведенного собственного исследования [30] была выявлена нетипичная пространственная структура в распределении гидрохимических параметров в пределах двух идентифицированных очаговых зон Канарского апвеллинга.

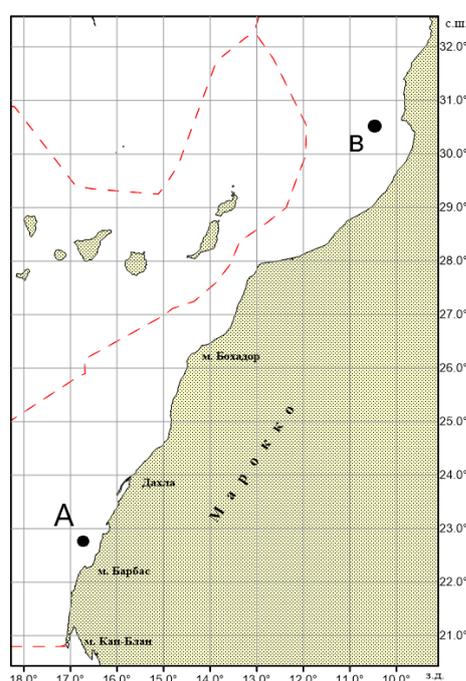


Рисунок 2.1 – Схема расположений точек очагов апвеллинга у побережья Марокко (2016-2021 гг.) [30]

Последующее изучение данного района позволило сделать вывод о целесообразности разделения акватории на три сектора. Данный подход согласуется с методологическими принципами, обоснованными в работах П.П. Чернышкова (Чернышков, 2006), который дифференцировал апвеллинговую систему на основании специфики внутригодовой динамики, а также с концепцией В.Н. Малинина (Малинин и др., 2002), предложившего

разделение Канарского апвеллинга на три квазиоднородных района по комплексу океанологических характеристик.

В результате, пространственные границы секторов определены следующим образом:

- сектор А: ограничен координатами $21.5^{\circ} - 23.5^{\circ}$ с.ш. и $16.0^{\circ} - 18.5^{\circ}$ з.д.;
- сектор С: ограничен координатами $25.0^{\circ} - 27.0^{\circ}$ с.ш. и $13.5^{\circ} - 16.0^{\circ}$ з.д.;
- сектор В: ограничен координатами $29.5^{\circ} - 31.5^{\circ}$ с.ш. и $10.0^{\circ} - 11.5^{\circ}$ з.д.;

Схематическое представление расположения секторов представлено на рисунке 2.2.

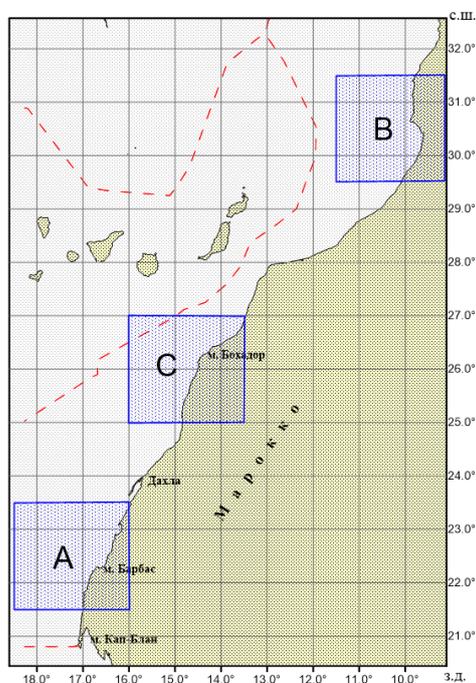


Рисунок 2.2. – Район исследования и его деление на секторы

Исследования для данного района проводятся регулярно [1 – 5, 9, 10, 31], однако особенностью представленной работы является то, что в анализируемый массив вошли данные за 2019 год, который по результатам натуральных наблюдений и данных реанализа был идентифицирован как аномальный. Данная особенность также отмечена в исследовании О.Ю. Краснобородько [31] и может быть обусловлена воздействием

глобальных климатических процессов, в частности, явления Эль-Ниньо. Выявленные аномалии, вероятно, оказывают существенное влияние на гидрохимический режим акватории, что в дальнейшем может значительно повлиять на промышленный потенциал региона.

В качестве основы для исследования использовались следующие временные ряды: данные по температуре и солености на поверхности воды за период 1993-2021 гг. [32]; данные гидрохимических показателей (содержание растворенного кислорода и концентрация минерального фосфора) за период 1993-2021 гг. [33]; данные температуры поверхности воды за период 1965-2021 гг. [34]; данные об уловах Российской Федерации и СССР в зоне промысла у побережья Марокко за период 1958-2021 гг. [35];

В работе был применен комплекс статистических методов, позволяющих всесторонне проанализировать имеющиеся данные и получить обоснованные результаты. Основными методами статистического анализа выступили: оценка первичных статистик, классификация данных с помощью кластерного анализа, а также анализ трендов временных рядов. На заключительном этапе для прогноза ГПО применялся нейросетевой подход.

2.2 Оценка первичных статистик

Первичный статистический анализ является одним из основных этапов обработки данных и предусматривает расчет совокупности описательных статистических характеристик, позволяющих оценить основные свойства распределения изучаемых переменных. В рамках данного исследования этот этап включал вычисление следующих статистических показателей:

Меры центральной тенденции. Среднее арифметическое (\bar{X}) – наиболее распространенная мера центральной тенденции, характеризующая типичное, или центральное, значение изучаемой совокупности данных. Для выборки объема n среднее арифметическое вычислялось по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}, \quad (1)$$

где $\sum x$ – значение i -го наблюдения, n – объем выборки.

Медиана (M_e) – значение, которое делит ранжированную совокупность наблюдений на две равные части. В отличие от среднего арифметического, медиана устойчива к выбросам и экстремальным значениям

$$\sum_{i=1}^n |x_i - M_e| = \min, \quad (2)$$

Мода (M_0) – значение признака, которое встречается в выборке наиболее часто. Для дискретных данных мода определялась как:

$$M_0 = x_i, \quad (3)$$

Для непрерывных данных мода оценивалась с использованием формулы Чишева:

$$M_0 = x_0 + h \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2}, \quad (4)$$

где x_0 – нижняя граница модального интервала, h – ширина интервала, Δ_1 – разность между частотой модального интервала и предшествующего ему, Δ_2 – разность между частотой модального интервала и последующего за ним.

Меры вариации. Размах вариации (R) – разность между максимальным и минимальным значениями выборки:

$$R = X_{max} - X_{min}, \quad (5)$$

Дисперсия (σ^2) – мера разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Для выборки объема n несмещенная оценка дисперсии рассчитывалась по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{l=1}^n (x_l - \bar{x})^2, \quad (6)$$

Стандартное отклонение (σ) – квадратный корень из дисперсии, выраженный в тех же единицах измерения, что и исходный признак:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (7)$$

2.3 Метод кластерного анализа

Кластерный анализ представляет собой многомерный статистический метод, направленный на выявление внутренних структур данных путем разбиения исследуемой совокупности объектов на относительно однородные группы (кластеры). Основная цель кластерного анализа заключается в классификации объектов таким образом, чтобы объекты внутри одного кластера были максимально схожи между собой, а объекты из разных кластеров – максимально различались.

Учитывая разнородность единиц измерения анализируемых показателей, была проведена процедура стандартизации, приводящая все переменные к единому масштабу. Это позволило избежать доминирования переменных с большими абсолютными значениями и обеспечить равный вклад всех показателей в результаты кластеризации. Стандартизация осуществлялась путем преобразования исходных значений в Z -оценки, что предусматривает вычитание среднего значения и деление на стандартное отклонение:

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma t}, \quad (8)$$

Для классификации и группировки объектов были последовательно применены два дополняющих друг друга алгоритма кластерного анализа: иерархический агломеративный метод Уорда и метод К-средних. Такой комбинированный подход позволил объединить преимущества обоих методов: способность иерархического метода определить оптимальное число кластеров и эффективность метода К-средних для окончательной классификации объектов.

Иерархический агломеративный метод Уорда. Метод Уорда (Ward's method) относится к группе иерархических агломеративных алгоритмов кластеризации и отличается особым подходом к объединению кластеров, основанным на минимизации внутригрупповой дисперсии.

В отличие от других иерархических методов, использующих непосредственно расстояния между объектами или кластерами, метод Уорда основан на дисперсионном анализе и направлен на минимизацию суммы квадратов отклонений внутри кластеров. На каждом шаге алгоритма объединяются те два кластера, слияние которых приводит к минимальному увеличению внутригрупповой дисперсии.

Данный подход можно формализовать следующим образом: для каждой пары кластеров рассчитывается прирост внутригрупповой суммы квадратов отклонений, который возникнет при их объединении. Объединяются те кластеры, для которых этот прирост минимален. Сумма квадратов отклонений в кластере определяется как сумма квадратов евклидовых расстояний между каждым объектом кластера и центроидом этого кластера.

Пошаговое описание алгоритма Уорда.

1) Инициализация: На начальном этапе каждый объект рассматривается как отдельный кластер. Таким образом, для n объектов исследования имеется n одноэлементных кластеров. Для каждого кластера определяется центроид,

который в случае одноэлементного кластера совпадает с координатами соответствующего объекта в многомерном пространстве признаков.

2) Расчет матрицы расстояний: Для всех возможных пар кластеров вычисляется прирост внутригрупповой суммы квадратов отклонений, который возник бы при их объединении.

3) Объединение кластеров: Среди всех возможных пар кластеров находится пара с минимальным приростом внутригрупповой суммы квадратов отклонений. Эти два кластера объединяются в один новый кластер.

4) Пересчет центроидов: Для нового кластера, образованного путем объединения, рассчитывается центроид как средневзвешенное центроидов объединяемых кластеров, где весами служит количество объектов в каждом из них.

Повторение шагов 2-4: Процесс продолжается до тех пор, пока все объекты не окажутся объединены в один кластер или не будет достигнуто заданное количество кластеров.



Рисунок 2.3. Краткая схема процедуры иерархической классификации Уорда

Метод Уорда обладает рядом характерных особенностей, делающих его привлекательным для практического применения:

- Формирование компактных кластеров: метод имеет тенденцию создавать кластеры примерно равного размера и сферической формы, что облегчает интерпретацию результатов.

- Устойчивость к шуму: по сравнению с другими иерархическими методами, алгоритм Уорда менее чувствителен к шуму и выбросам в данных.
- Монотонность: дендрограмма, построенная методом Уорда, обладает свойством монотонности – высота связей в дендрограмме не убывает с каждым шагом объединения, что отражает последовательное увеличение разнородности объединяемых кластеров.
- Применимость к количественным данным: метод наиболее эффективен для анализа количественных переменных, измеренных в метрических шкалах.
- Интерпретируемость результатов: метод обеспечивает хорошую интерпретируемость результатов, особенно в сочетании с визуализацией в виде дендрограммы.

Основным инструментом визуализации результатов иерархической кластеризации является дендрограмма – древовидная диаграмма, отображающая последовательность объединения кластеров и относительные расстояния между ними. Высота горизонтальных линий на дендрограмме пропорциональна приросту внутригрупповой суммы квадратов при объединении соответствующих кластеров.

Анализ дендрограммы позволяет определить оптимальное число кластеров на основе относительных расстояний объединения. Существенные скачки в высоте ветвления указывают на объединение разнородных кластеров и, следовательно, определяют естественные точки разделения данных.

Метод К-средних. Метод К-средних (K-means) является одним из наиболее популярных и эффективных алгоритмов неиерархической кластеризации, направленным на разбиение множества объектов на заранее известное количество кластеров k .

Основная идея метода заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластеров от центроидов этих кластеров. Алгоритм стремится создать такие кластеры, чтобы объекты внутри одного кластера были максимально похожи друг на друга (минимизация

внутрикластерной вариации), а объекты из разных кластеров – максимально различались (максимизация межкластерной вариации).

Пошаговое описание алгоритма К-средних.

1) Инициализация центроидов: на начальном этапе определяются k начальных точек, которые будут служить первоначальными центроидами кластеров. В данной случае начальными центроидами выступали центроиды кластеров, полученных на предварительном этапе с помощью метода Уорда. Такой подход обеспечивал более стабильные результаты по сравнению со случайной инициализацией и снижал зависимость итогового разбиения от выбора начальных условий.

2) Распределение объектов по кластерам: каждый объект относится к тому кластеру, расстояние до центроида которого минимально.

3) Пересчет центроидов: после распределения всех объектов по кластерам для каждого кластера рассчитывается новый центроид как среднее арифметическое всех объектов, входящих в этот кластер. Пересчет центроидов минимизирует сумму квадратов расстояний от объектов до центра соответствующего кластера.

4) Повторение шагов 2-3: процесс распределения объектов и пересчета центроидов повторяется итеративно до достижения сходимости.



Рисунок 2.4. Краткая схема итерационной классификации К-средних

Метод К-средних обладает рядом особенностей, сделавших его одним из наиболее популярных алгоритмов кластеризации:

- Высокая скорость работы: алгоритм отличается высокой вычислительной эффективностью и может применяться для больших наборов данных.
- Простота реализации и интерпретации: алгоритм интуитивно понятен и легко интерпретируем, что делает его доступным для широкого круга исследователей.
- Хорошая масштабируемость: метод может эффективно работать с большими наборами данных и относительно большим числом кластеров.
- Адаптивность: алгоритм адаптивно настраивает центроиды кластеров в процессе обучения, что позволяет ему приспосабливаться к структуре данных.

В данном исследовании метод К-средних применялся для финальной классификации объектов после определения оптимального числа кластеров с помощью иерархического метода Уорда. Такой комбинированный подход позволил объединить преимущества обоих методов и получить устойчивое разбиение объектов на группы.

Для реализации кластерного анализа была использована программная среда «STATISTICA» [36]. Аналитический процесс состоял из нескольких последовательных этапов. На подготовительном этапе выполнялась стандартизация показателей температуры и солености, после чего формировался единый массив данных, охватывающий весь исследуемый период. В качестве методологической основы применялись различные алгоритмы классификации: иерархический метод Уорда с применением евклидовых расстояний. Результаты иерархической кластеризации были представлены в виде горизонтальных дендрограмм, анализ которых позволил определить оптимальное число кластеров для дальнейшей классификации.

2.4 Тренд-анализ временных рядов

Анализ трендов временных рядов — это процесс изучения динамики показателей, расположенных в хронологическом порядке, с целью выявления устойчивых тенденций их развития. По сути, мы пытаемся понять, в каком направлении меняются данные с течением времени, и определить, является ли это изменение случайным или представляет собой устойчивую закономерность.

Линейный тренд — это самый простой и часто используемый вид тренда при анализе временных рядов. Он предполагает, что изучаемый показатель меняется с постоянной скоростью на протяжении всего рассматриваемого периода. Математически линейный тренд описывается уравнением прямой линии:

$$y = a + b * x, \tag{9}$$

где y — значение временного ряда, x — время (номер периода), a — начальный уровень ряда (пересечение с осью Y), b — скорость изменения (наклон линии тренда).

Наиболее распространенный метод нахождения параметров линейного тренда — метод наименьших квадратов. Суть метода заключается в нахождении таких значений параметров a и b , при которых сумма квадратов отклонений фактических значений ряда от расчетных (по уравнению тренда) минимальна.

Итогом регрессионного анализа выступает математическая формула линейной зависимости, представленная через параметры наклона линии и её начальной точки. Полученное уравнение тренда позволяет количественно описать взаимосвязь между исследуемыми переменными. Коэффициент b в этом уравнении демонстрирует величину, на которую произойдет сдвиг результирующего показателя при единичном изменении фактора воздействия.

Фактически, этот параметр отражает “силу реакции” зависимой переменной на изменения в независимой. Свободный член a — представляет собой расчетное значение исследуемого показателя в гипотетической ситуации, когда влияющая переменная принимает нулевое значение. Этот коэффициент определяет начальную позицию линии тренда в системе координат.

При анализе значимости тренда в исследуемом временном ряду первым шагом становится формирование гипотез: нулевой ($H_0: r=0$), предполагающей отсутствие линейной зависимости, и альтернативной ($H_1: r \neq 0$), указывающей на наличие линейной связи.

Для статистического тестирования этих предположений используется t -критерий Стьюдента, позволяющий объективно оценить достоверность выявленной тенденции.

Процедура проверки включает расчет критического порога $t_{кр}$ на основе двух параметров:

- принятого уровня значимости (стандартно 5%)
- количества степеней свободы, вычисляемого как разность между объемом анализируемого ряда и числом 2 ($df = N-2$)

Ключевой этап анализа – сопоставление абсолютного значения расчетной статистики t^* с полученным критическим значением $t_{кр}$:

В случае превышения расчетной величиной критического порога ($|t^*| > t_{кр}$), нулевая гипотеза отклоняется, что подтверждает существенное влияние линейного тренда на формирование исследуемого временного ряда.

При обратном соотношении ($|t^*| < t_{кр}$), отсутствуют достаточные основания для отклонения нулевой гипотезы, следовательно, линейная составляющая не оказывает значимого воздействия на динамику анализируемого показателя.

2.5 Расчет индекса Южного колебания (SOI)

$$SOI = \frac{(sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin})}{\sigma_{monthly}}, \quad (10)$$

$$sSLP = \frac{(aSLP - mSLP)}{\sigma}, \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum(aSLP - mSLP)^2 / N}, \quad (12)$$

$$\sigma_{monthly} = \sqrt{\sum(sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin})^2 / N}, \quad (13)$$

где SLP – давление на уровне моря, sSLP – стандартизированное SLP, aSLP – фактическое SLP, mSLP – среднее SLP, σ – стандартное отклонение, N – количество месяцев.

2.5 Прогнозирование временного ряда с использованием нейросетевого подхода в STATISTICA Neural Networks

В процессе исследования был применен аналитический комплекс STATISTICA Neural Networks — специализированное программное решение, созданное корпорацией StatSoft [36] (впоследствии перешедшее под управление Dell, а затем TIBCO) в качестве дополнительного модуля к базовой системе STATISTICA. Данный инструмент был разработан с целью объединения возможностей нейронного моделирования с классическими методами статистического анализа. Теоретическую основу комплекса составляют ключевые концепции нейросетевой теории, функциональной аппроксимации и алгоритмов оптимизации.

При прогнозировании временных последовательностей основная функция нейросетевых структур заключается в воспроизведении неизвестной функциональной зависимости. Ключевое достоинство таких методов проявляется в их способности эффективно моделировать сложные

нелинейные взаимосвязи без предварительного определения их математической формулировки.

С точки зрения теоретического обоснования, эффективность нейронных сетей в предсказании временных последовательностей подтверждается фундаментальной теоремой об универсальной аппроксимации [36]. Согласно этому положению, многослойный персептрон, имеющий единственный скрытый слой с ограниченным количеством нейронов, оснащенных нелинейными активационными функциями, обладает потенциалом приближения любой непрерывной функции множества переменных на ограниченном множестве с произвольно заданной точностью. Следовательно, при достаточном объеме обучающей выборки и правильно подобранной архитектуре, нейронная сеть теоретически способна обнаружить и смоделировать практически любую связь между историческими и прогнозируемыми значениями анализируемого временного ряда.



Рисунок 2.5. Схема пошагового использования SNN

В контексте прогнозирования временных рядов STATISTICA Neural Networks предлагает несколько типов нейросетевых архитектур, каждая из которых имеет свои особенности и области применения. В данном случае применялся Многослойный персептрон (MLP) — наиболее распространенный тип нейронной сети, представляющий собой сеть прямого распространения с одним или несколькими скрытыми слоями. Каждый нейрон суммирует взвешенные входные сигналы и преобразует их с помощью нелинейной функции активации.

Математически слой MLP можно описать как:

$$y = \varphi(Wx + b), \quad (14)$$

где x - вектор входных сигналов, W - матрица весовых коэффициентов, b - вектор смещений, φ - нелинейная функция активации.

MLP особенно эффективен при моделировании временных рядов с нелинейными зависимостями и хорошо подходит для большинства задач прогнозирования при адекватном предварительном анализе данных.

STATISTICA Neural Networks предлагает как автоматизированные средства конструирования сети, так и возможности для ручной настройки всех аспектов архитектуры и процесса обучения. Для этого в разделе «Стратегия для создания модели» необходимо выбрать базовый вариант – автоматизированная нейронная сеть (рис. 2.6а). Также необходимо задать условие, что не будут использоваться последние несколько лет, благодаря которым можно будет оценить качество модели (рис. 2.6б).

При настройке автоматизированного алгоритма обучения нейросетевой модели необходима спецификация базового комплекса параметров. Интерфейс “Quick” применительно к последовательностям с выраженной направленной динамикой задействует архитектуру многоуровневого персептрона (МУП). Данный интерфейсный модуль предоставляет возможность автоматического определения оптимальной конфигурации

скрытого слоя в указанных пользователем границах, а также позволяет контролировать количество параллельно обучаемых нейросетевых структур (рис. 2.6г).

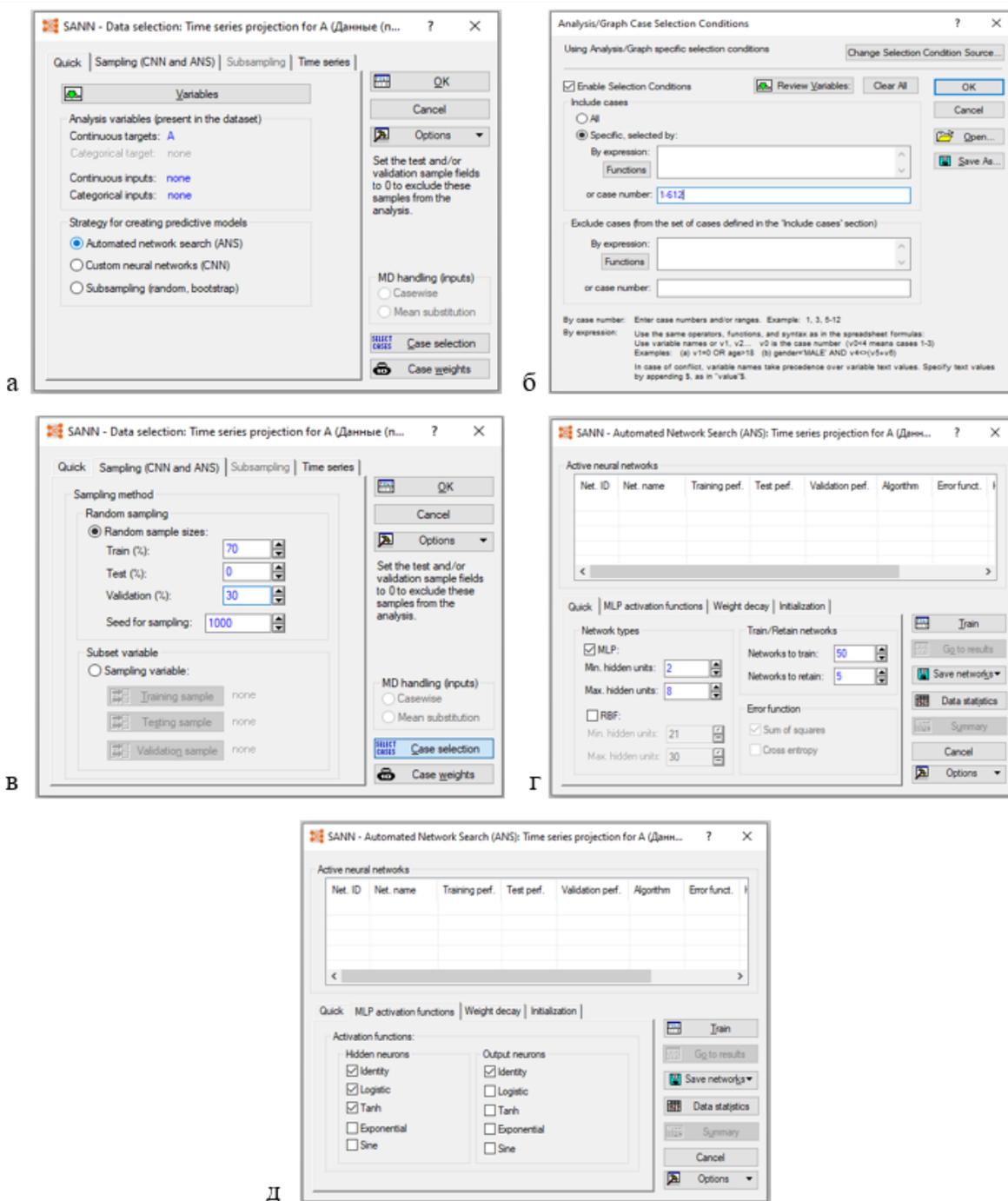


Рисунок 2.6. Интерфейс программы STATISTICA Neural Networks: а – выбор стратегии для создания модели; б – задание условия; в – определение оптимального соотношения выборок; г – выбор типа сети; д - выбор функции активации.

Целевой функцией оптимизации во всех экспериментальных настройках выступает квадратичное отклонение, что соответствует интерпретации прогнозирования временных последовательностей как регрессионной задачи. В процедуре обучения промежуточные слои могут использовать линейную, сигмоидальную или тангенциальную функции трансформации сигнала, тогда как выходной уровень неизменно применяет линейное преобразование (рис. 2.6д).

После завершения этапа параметрической настройки и запуска процедуры обучения активацией команды “Train”, производится комплексная оценка полученных результатов (Рис. 2.7б). Селекция оптимальной конфигурации основывается на многокритериальном подходе: приоритизируются модели с максимальными показателями эффективности, проводится статистический анализ остаточных значений с предпочтением структур, демонстрирующих гауссово распределение ошибок, а также выполняется экспертная визуальная оценка согласованности прогностических значений с фактической траекторией исследуемого процесса.

При рассмотрении результатов нейросетевого моделирования первоочередного внимания требует детальная характеристика полученных сетевых структур, представленная на рисунке 2.7а. Основными показателями качества разработанных моделей являются метрики производительности, выраженные через коэффициенты корреляции между фактическими значениями временного ряда и прогнозными значениями, рассчитанными для каждого сегмента исследуемой выборки. Научно обоснованным критерием оптимальности считается максимальное приближение данного показателя к единице, что указывает на высокую степень соответствия между реальной динамикой процесса и её математическим отображением в структуре нейронной сети.

В разделе «Graphs» можно построить диаграмму распределения остатков для каждой сети (рис. 2.7в). Показателем хорошего качества построенных моделей является нормальное распределение остатков. В этом

же разделе можно оценить качество модели, посмотрев на диаграмму рассеивания целевых и выходных переменных (рис. 2.7г).

Проведем графический анализ, чтобы оценить, насколько точно построенные нами нейросетевые модели прогнозируют исследуемый временной ряд. Для этого необходимо перейти в раздел «Weight decay» и нажать на функцию «Time series graph».

В данном режиме отображения каждая точка прогноза рассчитывается на основе предыдущих фактических значений исходного ряда. Для оценки способности модели прогнозировать будущие значения применяется метод проекции временного ряда, при котором каждое новое прогнозное значение вычисляется исходя из ранее спрогнозированных точек, а не оригинальных данных. Этот подход позволяет проверить, насколько устойчива модель и способна ли она самостоятельно продолжать выявленные закономерности за пределами обучающих данных.

После формирования комплекса моделей необходимо определить наиболее результативную конфигурацию, которой в текущем исследовании является первая модель. Данная архитектура становится объектом детального анализа и верификации качественных характеристик.

Для объективной оценки прогностического потенциала построенной нейронной сети проведем сопоставление генерируемых ею предсказаний с данными контрольной выборки. Первым этапом аналитической процедуры является графическая визуализация с включением кросс-проверочного массива данных (рис. 2.7д).

Следующим шагом выполняется количественная оценка погрешности на кросс-проверочном сегменте. Для реализации данной задачи формируется вспомогательная расчетная таблица с интеграцией исходного массива и применением соответствующей формулы (рис. 2.8). Произведенные вычисления демонстрируют величину относительной погрешности, составляющую 0.037 (рис. 2.9).

Summary of active networks (Данные (прогноз))
 Include cases: 1:612

Index	Net. name	Training perf.	Validation perf.	Training error	Validation error
1	MLP 12-3-1	0.967694	0.959714	0.068731	0.092303
2	MLP 12-3-1	0.961424	0.958550	0.081813	0.093240
3	MLP 12-2-1	0.961424	0.958550	0.081813	0.093240
4	MLP 12-7-1	0.961424	0.958550	0.081813	0.093240
5	MLP 12-5-1	0.961424	0.958550	0.081813	0.093240

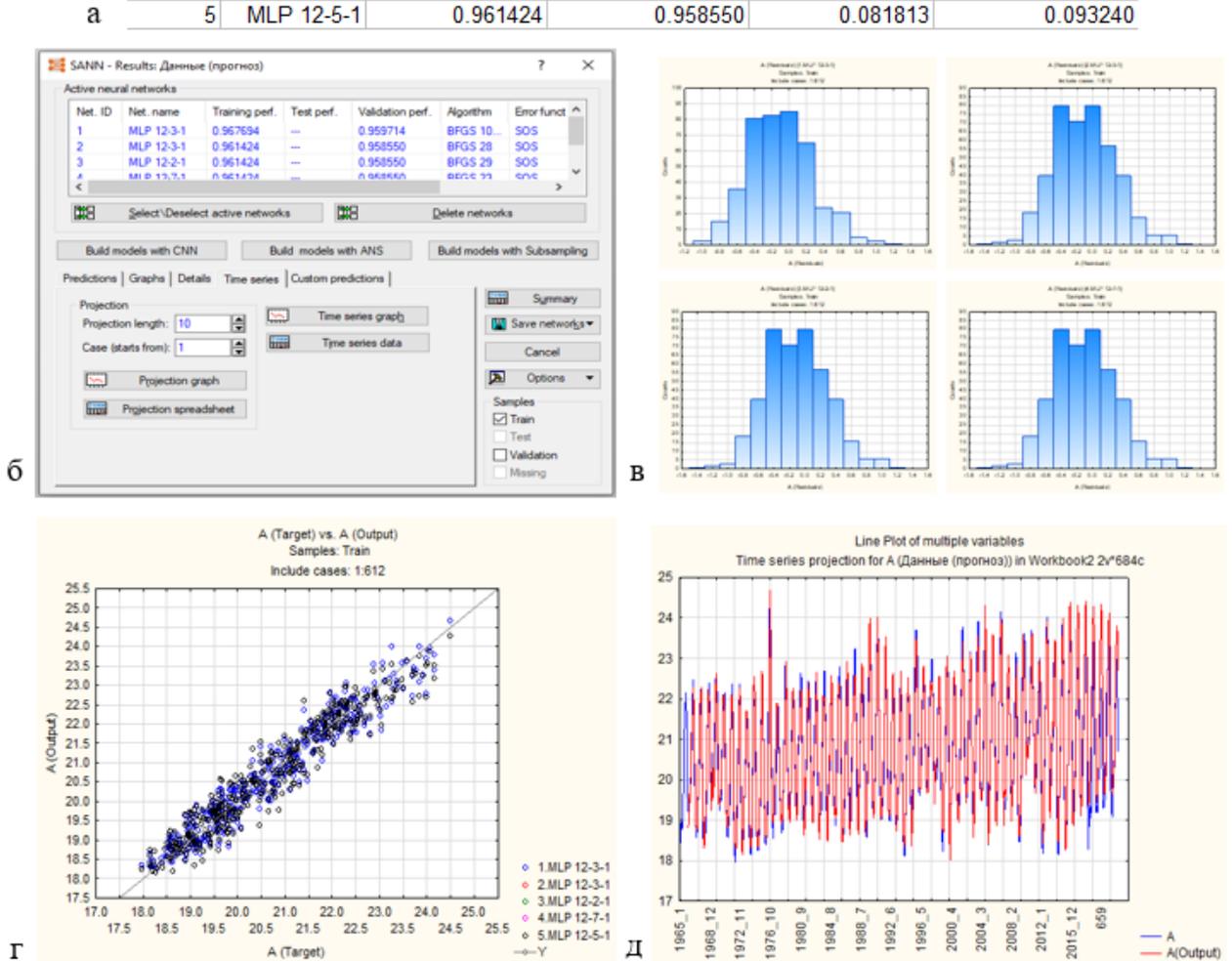


Рисунок 2.7. Результаты прогнозирования STATISTICA Neural Networks: а – вывод характеристик моделей прогнозирования временного ряда; б – результаты прогнозирования временного ряда; в – графики гистограмм распределения остатков; г – диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных; д - график исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели.

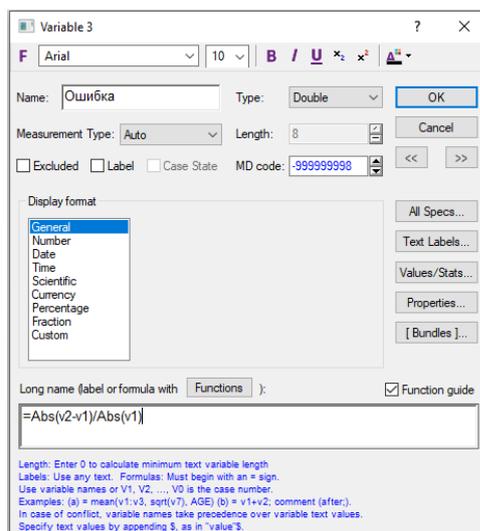


Рисунок 2.8. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели в STATISTICA Neural Networks

Subset of Spreadsheet8	
Variables: 3 Include condition: v0=1	
1	Ошибка
MEAN case 1-72	0.0377575738

Рисунок 2.9. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели в STATISTICA Neural Networks

Важно отметить, что в контексте нейросетевого моделирования любая задача прогнозирования временных рядов трансформируется в задачу многомерной регрессии. Методологически обоснованным подходом к поиску оптимального решения является поэтапное усложнение моделей – от базовых конфигураций к более комплексным структурам, при условии неудовлетворительного качества предшествующих итераций.

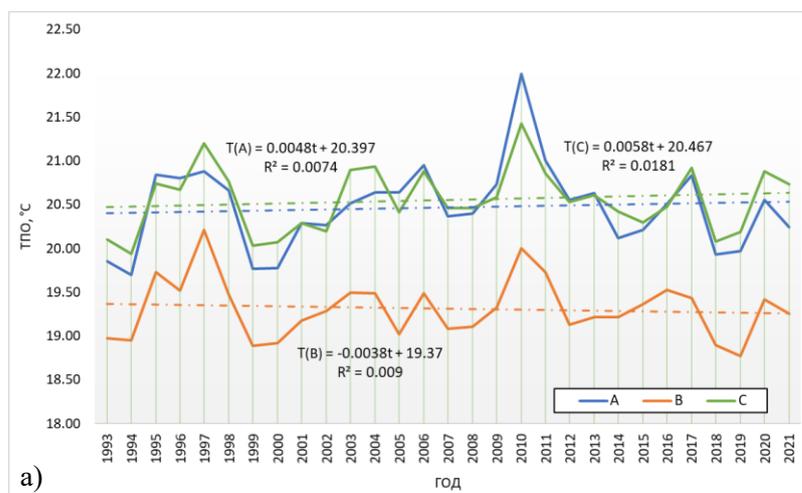
Существует возможность повышения точности прогнозирования на несколько процентов. Для этого требуется перейти от автоматизированных нейросетевых структур к методологии многократных подвыборок с применением тонких параметрических настроек модели.

Глава 3. Пространственно-временная изменчивость океанографических условий у побережья Марокко и возможность прогноза

3.1 Межгодовая изменчивость океанографических условий и результаты тренд-анализа

В данном разделе представлены результаты анализа временной изменчивости основных океанографических параметров (ТПО, соленость, растворенный кислород и минеральный фосфор) в прибрежных водах Марокко за период 1993-2021 гг. Предварительно район исследования был разделен на три сектора (А, В и С) (см. п. 2.1), что позволило выявить региональные особенности многолетней динамики.

Наглядное представление полученных данных представлено на рисунках 3.1 и 3.2, на которых отображены не только фактические значения исследуемых параметров, но и нанесены соответствующие линии тренда. Для каждой тенденции приведены математические формулы зависимостей, а также рассчитаны коэффициенты детерминации, количественно характеризующие степень соответствия регрессионной модели эмпирическим наблюдениям.



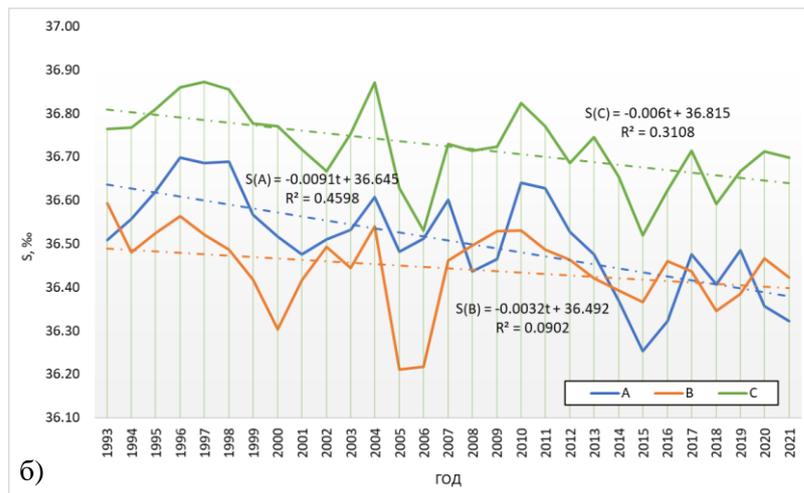


Рисунок 3.1. Межгодовая изменчивость гидрологических характеристик в различных районах побережья Марокко с 1993 по 2021 гг.: а – ТПО, б – соленость

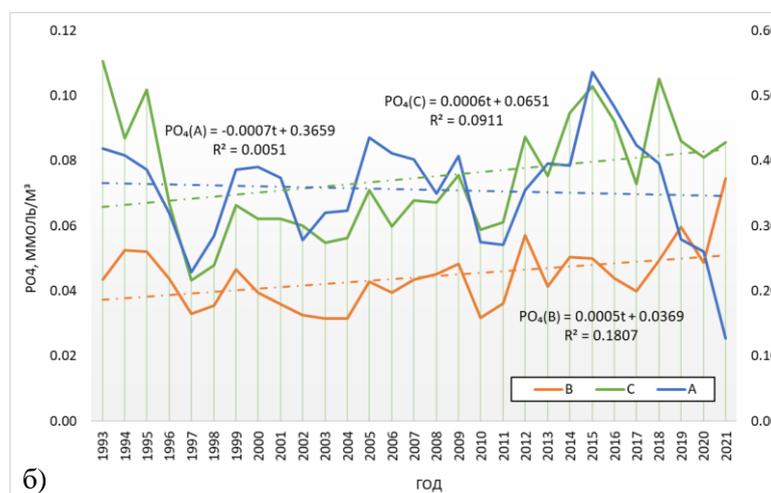
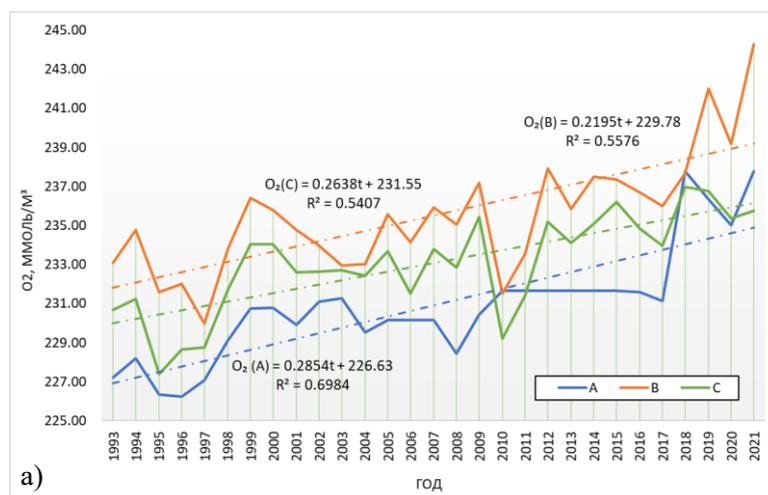


Рисунок 3.2. Межгодовая изменчивость гидрохимических характеристик в различных районах побережья Марокко с 1993 по 2021 гг.: а – растворенный кислород, б – минеральный фосфор

Анализ межгодовой изменчивости температуры поверхности океана (ТПО) показывает различную динамику в трех исследуемых зонах (рис. 3.1а). Для секторов А и С прослеживается слабо выраженная тенденция к повышению ТПО (коэффициенты линейного тренда составляют 0,005 и 0,006 соответственно), в то время как в секторе В наблюдается незначительная отрицательная тенденция (-0,004). Коэффициенты детерминации (R^2) для всех трех зон имеют низкие значения (0,007, 0,009 и 0,018 соответственно). Наиболее высокие значения ТПО в секторах А и С были зафиксированы в 2010 году, достигнув максимума около 22 °С. Для сектора В характерны более низкие температуры в диапазоне 18,5 – 20 °С для всего периода с 1993 по 2021 гг., при максимуме в 1997 году.

Временная динамика солености (рис. 3.1б) характеризуется слабыми отрицательными трендами во всех зонах. Наиболее выраженное снижение наблюдается в секторе А с коэффициентом -0,009 и относительно высоким значением R^2 (0,459). Секторы В и С демонстрируют более слабые тенденции к снижению с коэффициентами -0,003 ($R^2 = 0,090$) и -0,006 ($R^2 = 0,310$) соответственно. Абсолютные значения солености варьируются в пределах от 36,2 до 36,9 ‰, при этом наиболее высокие показатели характерны для сектора С, а наиболее низкие – для сектора В.

Графики межгодовой изменчивости содержания растворенного кислорода (рис. 3.2а) отображают выраженную положительную тенденцию во всех трех секторах. Наиболее значительный рост отмечен в секторе А, где коэффициент линейного тренда составляет 0,285 при высоком значении R^2 (0,698), что позволяет судить о статистически значимом тренде. В секторах В и С также наблюдается заметное увеличение концентрации кислорода с

коэффициентами линейного тренда 0,263 ($R^2 = 0,541$) и 0,219 ($R^2 = 0,558$) соответственно. С 1993 по 2021 гг. средние значения концентрации растворенного кислорода увеличились приблизительно с 227 до 243 мкмоль/л. Особенно выраженный рост наблюдается после 2015 года во всех трех зонах.

Анализ многолетней динамики содержания минерального фосфора (рис. 3.2б) выявил статистически значимый тренд только для одного из трех секторов. Коэффициенты линейных трендов близки к нулю: -0,001 для сектора А ($R^2 = 0,005$), 0,001 для сектора В ($R^2 = 0,181$) и 0,001 для С ($R^2 = 0,091$). Концентрация фосфатов характеризуется значительной межгодовой изменчивостью с периодическими пиками и спадами. В секторе С наблюдаются наиболее высокие концентрации (0,06-0,10 мкмоль/л), в то время как В отличается более низкими значениями (0,03-0,05 мкмоль/л).

Результаты тренд-анализа представлены в таблицах 3.1 – 3.2.

Таблица 3.1 Результаты тренд-анализа для ряда ТПО и солености

T, °C				S, ‰			
Сектор	t	tkp	Линейный	Сектор	t	tkp	Линейный
А	0.46	2.05	не значим	А	4.88	2.05	значим
В	0.50		не значим	В	1.67		не значим
С	0.72		не значим	С	3.55		значим

Таблица 3.2 Результаты тренд-анализа для ряда растворенного кислорода и минерального фосфора

O ₂ , ммоль/м ³				P-PO ₄ ³⁻ , ммоль/м ³			
Сектор	t	tkp	Линейный	Сектор	t	tkp	Линейный
А	8.05	2.05	значим	А	0.38	2.05	не значим
В	5.74		значим	В	2.49		значим
С	5.94		значим	С	1.68		не значим

Анализ статистических критериев, представленных в таблицах 3.1 и 3.2, позволяет сделать следующие выводы о значимости линейных трендов исследуемых параметров:

Для рядов температуры поверхности океана (ТПО) во всех трёх секторах исследуемой акватории наблюдается соотношение $|t^*| < t_{кр}$. Это свидетельствует об отсутствии статистически значимого влияния линейного тренда на многолетнюю динамику данного параметра - все выявленные тенденции носят случайный характер.

При оценке линейного тренда рядов солёности отмечена иная картина: в секторах А и С выполняется неравенство $|t^*| > t_{кр}$, что указывает на существенное воздействие линейного тренда на формирование временной структуры данного показателя.

Наиболее выраженные линейные тенденции обнаружены для содержания растворенного кислорода – во всех секторах выполняется условие $|t^*| > t_{кр}$. Это означает, что динамика концентрации кислорода подчиняется устойчивым закономерностям с выраженным линейным трендом.

Что касается содержания фосфатов, статистически значимый линейный тренд выявлен только в секторе В. В секторах А и С линейная составляющая не значима.

Дополнительно выполнен мультипараметрический кластерный анализ по сезонам, объединяющий данные по температуре поверхности океана (ТПО) и концентрации фосфатов (PO_4). В отличие от традиционного одномерного подхода, такой анализ позволяет выявить комплексные океанографические режимы, которые характеризуются специфическими сочетаниями термических и гидрохимических параметров.

Зимой в секторе С выделено шесть устойчивых кластеров, характеризующихся различными сочетаниями ТПО и концентрации фосфатов:

Кластер 1: умеренно-теплый режим (ТПО = 18,55°C) с повышенным содержанием фосфатов (0,21 μ моль/л)

Кластер 2: холодный режим (ТПО = 16,93°C) с низким содержанием фосфатов (0,03 μ моль/л)

Кластер 3: холодно-умеренный режим (ТПО = 17,18°C) с повышенным содержанием фосфатов (0,22 $\mu\text{моль/л}$)

Кластер 4: умеренно-теплый режим (ТПО = 19,13°C) с повышенным содержанием фосфатов (0,21 $\mu\text{моль/л}$)

Кластер 5: теплый режим (ТПО = 19,10°C) с низким содержанием фосфатов (0,05 $\mu\text{моль/л}$)

Кластер 6: теплый режим (ТПО = 20,13°C) с очень низким содержанием фосфатов (0,00 $\mu\text{моль/л}$)

Обращает на себя внимание кластер 6, который характеризуется максимальной ТПО и минимальным содержанием фосфатов. Эта комбинация является индикатором ослабленного апвеллинга и может соответствовать аномальным годам. Анализ временного распределения наблюдений показывает, что в этот кластер входят преимущественно зимы 1998, 2010, 2016 и 2019 годов, которые следуют за сильными событиями Эль-Ниньо или совпадают с ними.

Весной в секторе С выделено пять кластеров, среди которых особый интерес представляют:

Кластер 3: холодный режим (ТПО = 18,65°C) с повышенным содержанием фосфатов (0,09 $\mu\text{моль/л}$) – типичный апвеллинговый режим

Кластер 5: теплый режим (ТПО = 20,36°C) с повышенным содержанием фосфатов (0,06 $\mu\text{моль/л}$) – нетипичное сочетание, указывающее на специфические гидрологические условия

Кластер 5, характеризующийся необычным сочетанием высокой ТПО и относительно высокого содержания фосфатов, содержит наблюдения преимущественно из весенних периодов 1998, 2007, 2019 и 2020 годов. Первые три точно соответствуют ранее обнаруженным аномальным годам.

В летний период в секторе С выделено пять кластеров, и вновь наблюдается четкое разделение аномальных лет, особенно в кластере 4, который характеризуется высокой ТПО (21,25°C) и низким содержанием

фосфатов (0,02 $\mu\text{моль/л}$). Этот кластер включает наблюдения из летних периодов 1998, 2010, 2016 и 2019 годов.

Осенью структура кластеров также отражает влияние аномальных лет, с концентрацией наблюдений из 2019 года преимущественно в кластерах 1 и 2.

В секторе В зимой выделено четыре основных кластера. Характерной особенностью является наличие кластера 4, который выделяется существенно более высокой ТПО (18,93 $^{\circ}\text{C}$) по сравнению с остальными кластерами при умеренном содержании фосфатов (0,03 $\mu\text{моль/л}$). Этот кластер содержит преимущественно наблюдения из зим 1998, 2010, 2016 и 2019 годов.

В весенний период в секторе В также выделяются кластеры, связанные с аномальными годами. Особенно кластер 5 с высокой ТПО (18,93 $^{\circ}\text{C}$) и низким содержанием фосфатов (0,01 $\mu\text{моль/л}$), который включает наблюдения из 1998, 2007 и 2019 годов.

В летний и осенний периоды кластерная структура в секторе В менее дифференцирована (3-4 кластера), но сохраняется тенденция выделения аномальных лет в отдельные группы, особенно по осени, где кластер 3 с максимальной ТПО (22,01 $^{\circ}\text{C}$) и низким содержанием фосфатов (0,05 $\mu\text{моль/л}$) включает наблюдения из осенних периодов тех же аномальных лет.

В южном секторе А зимой выделено пять кластеров, среди которых кластер 4 характеризующий уникальное сочетание относительно высокой ТПО (19,56 $^{\circ}\text{C}$) и низкого содержания фосфатов (0,33 $\mu\text{моль/л}$), что отличает его от других кластеров. Анализ временного распределения показывает, что этот кластер содержит преимущественно наблюдения из зимних периодов 1998, 2007, 2016 и 2019 годов.

Весной в секторе А выделено пять кластеров, с четким разделением аномальных лет преимущественно в кластере 5, который характеризуется высокой ТПО (19,56 $^{\circ}\text{C}$) и повышенным содержанием фосфатов (0,41 $\mu\text{моль/л}$) – комбинация, нетипичная для апвеллинговой зоны.

В летний период в секторе А выделено пять кластеров, с концентрацией наблюдений из 2019 года в кластере 3, который характеризуется высокой ТПО ($21,66^{\circ}\text{C}$) при низком содержании фосфатов ($0,03 \mu\text{моль/л}$).

Осенью в секторе А также обнаруживается пять кластеров, с выраженной концентрацией наблюдений из аномальных лет в кластерах 1 и 2, характеризующихся максимальными значениями ТПО ($23,55^{\circ}\text{C}$ и $22,40^{\circ}\text{C}$ соответственно) при различных уровнях содержания фосфатов.

3.2 Долгопериодная изменчивость в многолетних рядах и результаты кластерного анализа

В результате мультипараметрического кластерного анализа, выполненного в предыдущей главе, была выделена некая закономерность в распределении фосфатов. К сожалению, т.к. более ранних данных по минеральному фосфору нет, то целесообразно интерпретировать данные, имеющиеся по температуре поверхности океана (ТПО) за период с 1965 по 2021 гг.

Анализ расширенных временных рядов ТПО позволил установить группу лет со схожими океанографическими условиями. Наиболее выраженное сходство наблюдается между 1992, 2007 и 2019 годами, которые демонстрируют аналогичную структуру в распределении температуры и, предположительно, других океанографических параметров (рис. 3.3 – 3.5). Дополнительно выявлены еще два года – аналога – 1970 и 1979 гг., которые также значительно схожи в распределении характеристик с основной группой (рис. 3.6). Следует подчеркнуть, что методология идентификации таких аналогов требует комплексного подхода. Как показывает опыт, использование исключительно корреляционного анализа в качестве критерия подобия временных рядов зачастую приводит к ложным отождествлениям. Динамическая система может демонстрировать высокую корреляцию

межгодовых колебаний при существенно различных средних значениях параметра, что отражает принципиально разные гидрологические режимы.

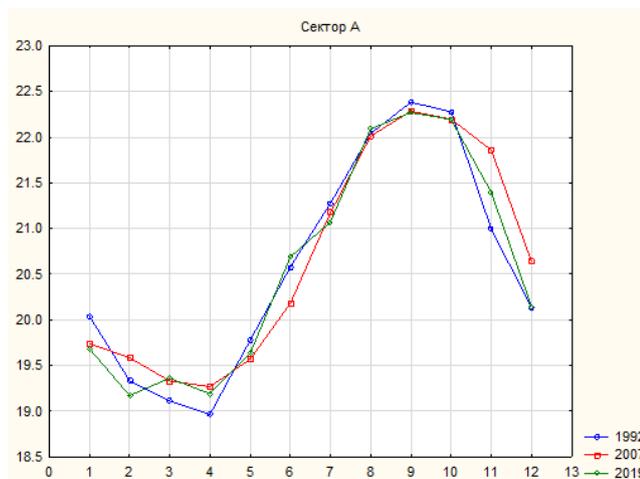


Рисунок 3.3. Годовая изменчивость ряда ТПО в 2019 году у побережья Марокко в секторе А и её годы-аналоги

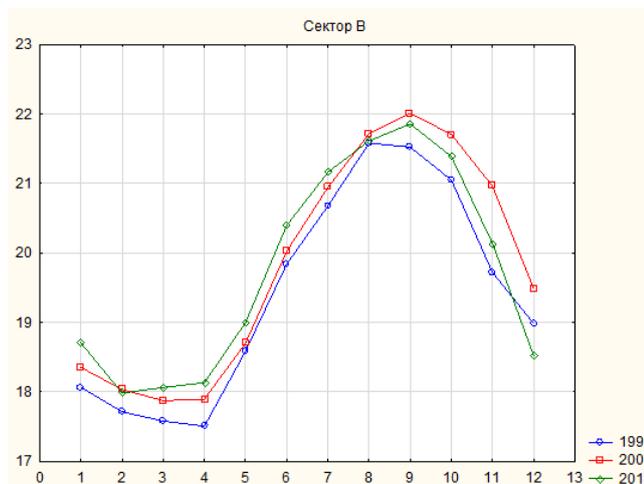


Рисунок 3.4. Годовая изменчивость ряда ТПО в 2019 году у побережья Марокко в секторе В и её годы-аналоги

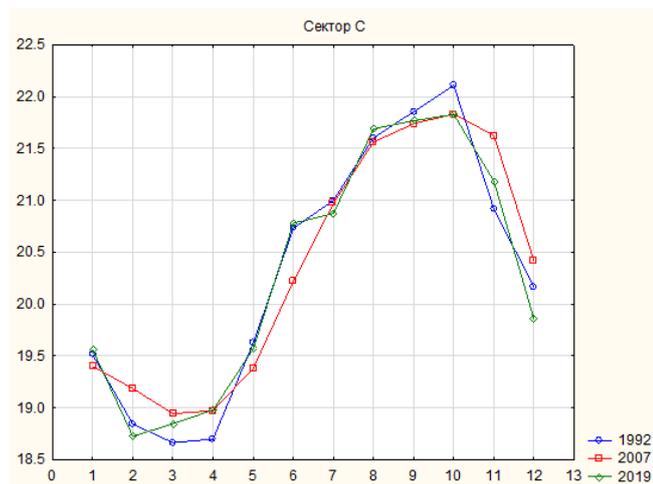


Рисунок 3.5. Годовая изменчивость ряда ТПО в 2019 году у побережья Марокко в секторе С и её годы-аналоги

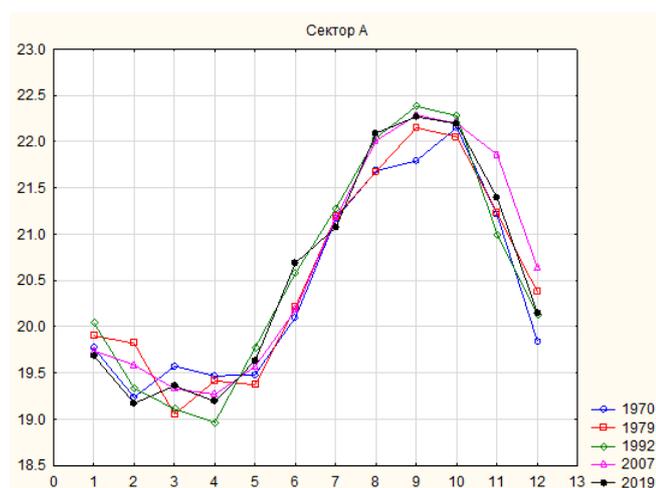


Рисунок 3.6. Годовая изменчивость ряда ТПО в 2019 году у побережья Марокко в секторе А и её годы-аналоги

Таблица 3.3 Результаты подобия временных рядов

А						
	Аномальный год	Годы-аналоги				
	2019	2007	1992	2000	1979	1970
Корреляция	1.00	0.95	0.98	0.96	0.96	0.98
Ср. знач.	20.58	20.65	20.58	20.47	20.54	20.46
Дисперсия	1.45	1.42	1.49	1.68	1.18	1.13
В						

	Аномальный год	Годы-аналоги				
	2019	2007	1992	2000	1979	1970
Корреляция	1.00	0.96	0.98	0.96	0.97	0.99
Ср. знач.	19.75	19.81	19.40	19.43	19.19	19.29
Дисперсия	2.27	2.61	2.39	2.76	2.27	2.27
С						
	Аномальный год	Годы-аналоги				
	2019	2007	1992	2000	1979	1970
Корреляция	1.00	0.96	0.99	0.94	0.94	0.96
Ср. знач.	20.30	20.35	20.31	20.07	20.00	20.06
Дисперсия	1.40	1.34	1.54	1.39	1.08	0.95

Наличие пяти лет-аналогов (1970, 1979, 1992, 2007 и 2019 годы), распределенных на временном интервале 56 лет, позволяет предположить наличие квазипериодического процесса с приблизительным периодом 12 – 13 лет.

В 1970, 1979 и 1992 годы предшествовали периодам умеренного или сильного Эль-Ниньо (1972-73, 1982-83 и 1997-98 гг. соответственно). Аналогично, 2007 год предшествовал Эль-Ниньо 2009-2010 гг, а 2019 год – Ла-Нинья 2020-2021 гг. Возможно, что выявленные годы-аналоги представляют собой особый фазовый режим в региональном отклике на глобальные климатические изменения как отмечалось для зоны Перуанского апвеллинга [31].

Для каждого из трех секторов (А, В и С) проведена кластеризация временных рядов ТПО по сезонам с выделением трех основных кластеров термических условий. Такой подход позволяет выявить характерные режимы, формирующиеся в прибрежных водах Марокко в разные сезоны года.

Зимний сезон, сектор А:

Кластер 1 характеризуется наиболее низкими средними значениями ТПО (18,97°С) с небольшой дисперсией (0,36), что указывает на устойчивый холодный режим.

Кластер 2 – промежуточный, со средней температурой 19,69°С и относительно небольшой дисперсией (0,41).

Кластер 3 самый теплый ($20,57^{\circ}\text{C}$) с наибольшей дисперсией (0,46) и отрицательной асимметрией (-1,31), что свидетельствует о смещении распределения в сторону более высоких значений.

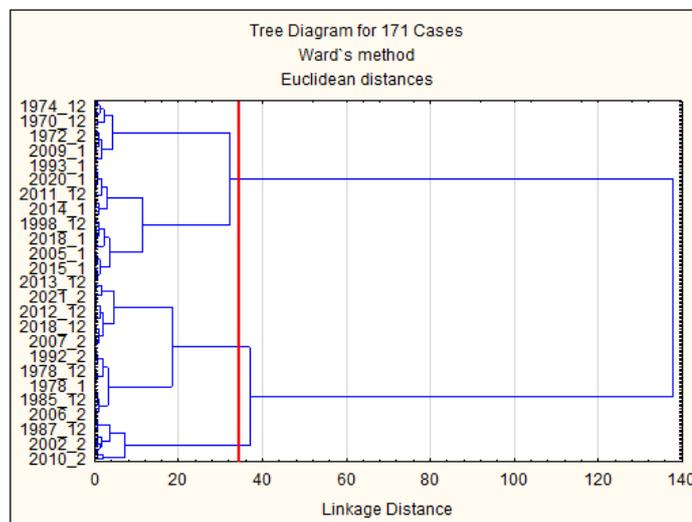


Рисунок 3.7. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Зимний сезон. Сектор А

Таблица 3.4. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в зимний сезон (сектор А)

Зима			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	18.97	19.69	20.57
Стандартная ошибка	0.08	0.08	0.10
Стандартное отклонение	0.60	0.64	0.68
Дисперсия выборки	0.36	0.41	0.46

Зимний сезон, сектор В:

Кластеры с более низкими средними температурами по сравнению с сектором А. Кластер 3 выделяется наиболее низкими значениями ($17,55^{\circ}\text{C}$), что можно связать с более интенсивным проявлением апвеллинга или влиянием холодного Канарского течения в этой зоне.

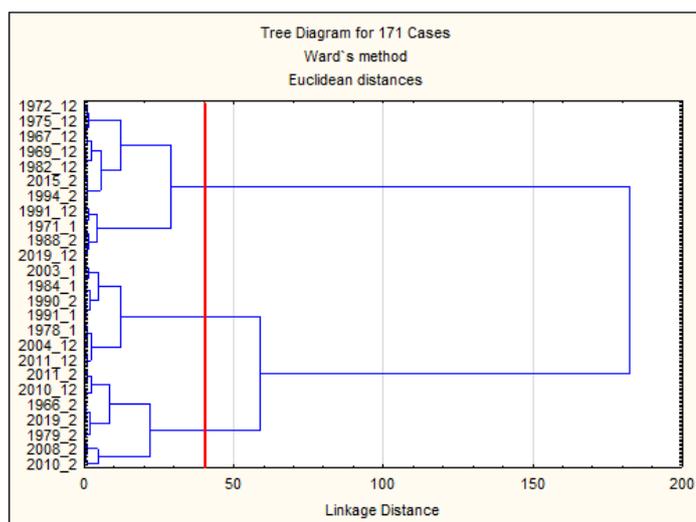


Рисунок 3.8. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Зимний сезон. Сектор В

Таблица 3.5. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в зимний сезон (сектор В)

Зима			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	18.78	18.26	17.55
Стандартная ошибка	0.09	0.08	0.07
Стандартное отклонение	0.65	0.59	0.55
Дисперсия выборки	0.42	0.35	0.30

Зимний сезон, сектор С:

Кластер 2 характеризуется наиболее высокой средней температурой (20,23°C), но при этом имеет самую высокую дисперсию (0,50), что указывает на нестабильность термического режима. Кластер 3 отличается низкими температурами (18,74°C) и высокой положительной асимметрией (0,58), что может быть связано с эпизодическими усилениями апвеллинга.

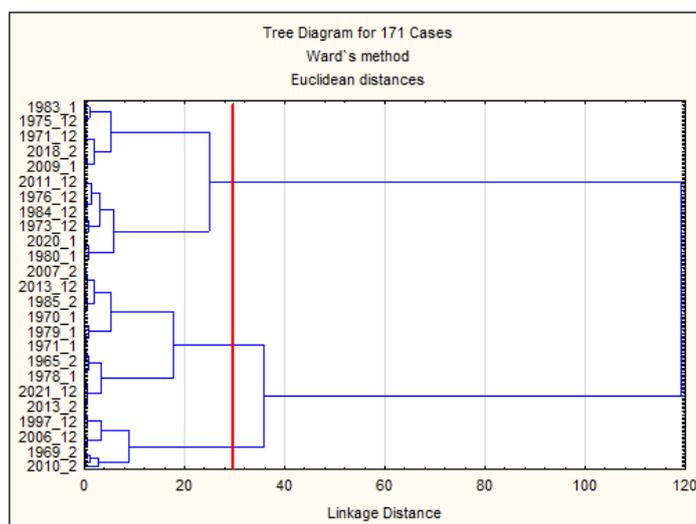


Рисунок 3.9. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Зимний сезон. Сектор С

Таблица 3.6. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в зимний сезон (сектор С)

Зима			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	19.42	20.23	18.74
Стандартная ошибка	0.08	0.10	0.08
Стандартное отклонение	0.67	0.70	0.65
Дисперсия выборки	0.45	0.50	0.42

Весенний сезон, сектор А:

Наблюдается инверсия кластеров по сравнению с зимой: наиболее теплым становится кластер 1 (20,37°C), а самым холодным - кластер 3 (18,70°C). Все кластеры характеризуются меньшей дисперсией по сравнению с зимним сезоном, что указывает на более стабильный термический режим.

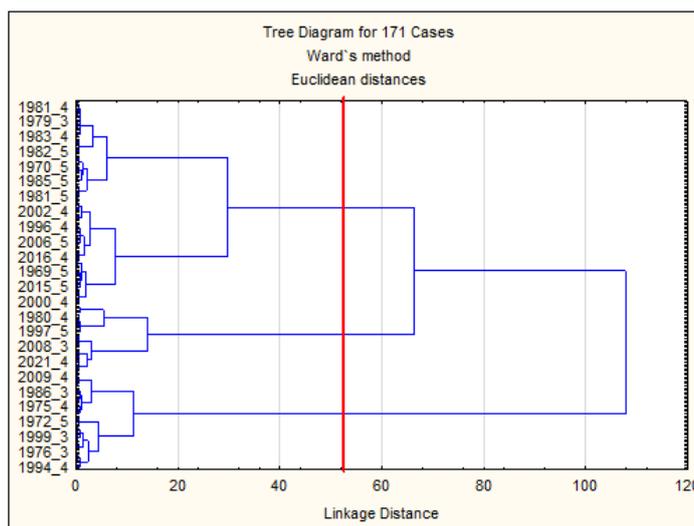


Рисунок 3.10. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Весенний сезон. Сектор А

Таблица 3.7. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО весенний сезон (сектор А)

Весна			
Характеристика	Класс 1	Класс 2	Класс 3
Среднее	20.37	19.52	18.70
Стандартная ошибка	0.08	0.04	0.05
Стандартное отклонение	0.46	0.33	0.35
Дисперсия выборки	0.21	0.11	0.12

Весенний сезон, сектор В:

Весной в секторе В наблюдается значительная температурная дифференциация между кластерами с амплитудой от 17,29°C (класс 2) до 18,75°C (класс 3). Высокие положительные значения асимметрии (особенно в классе 3 - 0,72) свидетельствуют о существенном вкладе аномально теплых периодов.

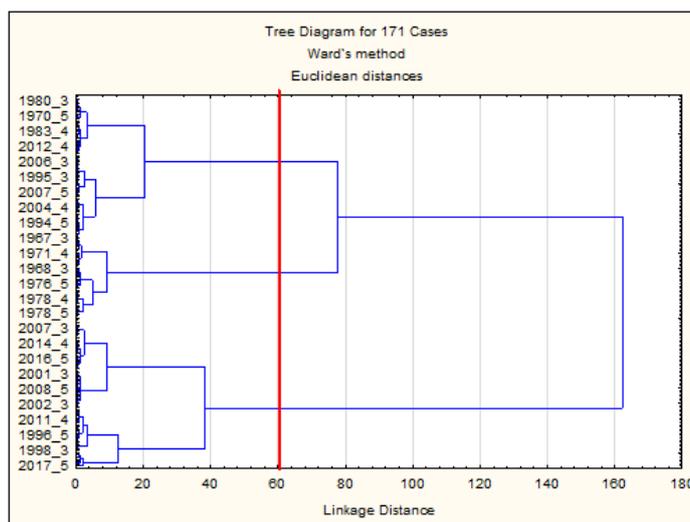


Рисунок 3.11. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Весенний сезон. Сектор В

Таблица 3.8. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО весенний сезон (сектор В)

Весна			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	18.07	17.29	18.75
Стандартная ошибка	0.06	0.06	0.09
Стандартное отклонение	0.50	0.40	0.62
Дисперсия выборки	0.25	0.16	0.38

Весенний сезон, Сектор С:

Уникальная особенность этого сектора - инверсированное распределение кластеров: наиболее теплый кластер 3 (20,23°C), наиболее холодный - кластер 1 (18,43°C). Высокая положительная асимметрия в кластере 3 (0,65) указывает на наличие экстремальных теплых аномалий.

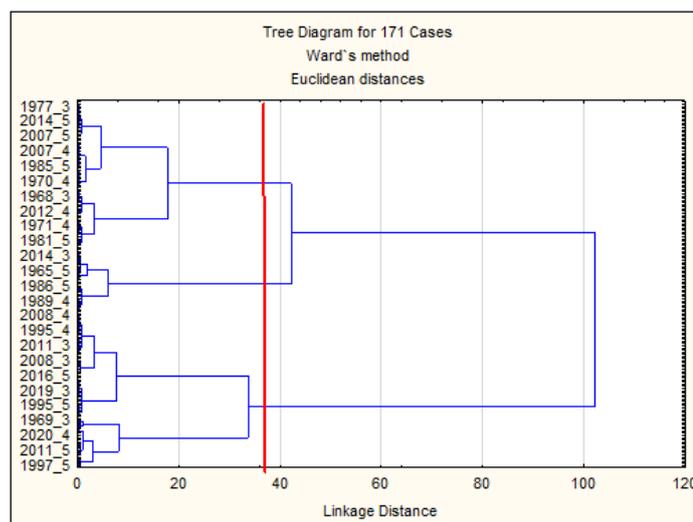


Рисунок 3.12. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Весенний сезон. Сектор С

Таблица 3.9. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО весенний сезон (сектор С)

Весна			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	18.43	19.23	20.23
Стандартная ошибка	0.06	0.04	0.10
Стандартное отклонение	0.41	0.42	0.46
Дисперсия выборки	0.17	0.18	0.21

Летний сезон, сектор А:

Летом наблюдаются максимальные температуры для всего года, с наиболее высокими значениями в кластере 1 (21,95°C) и кластере 2 (21,28°C). Высокая дисперсия во всех кластерах (0,67 – 0,89) свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости летних условий.

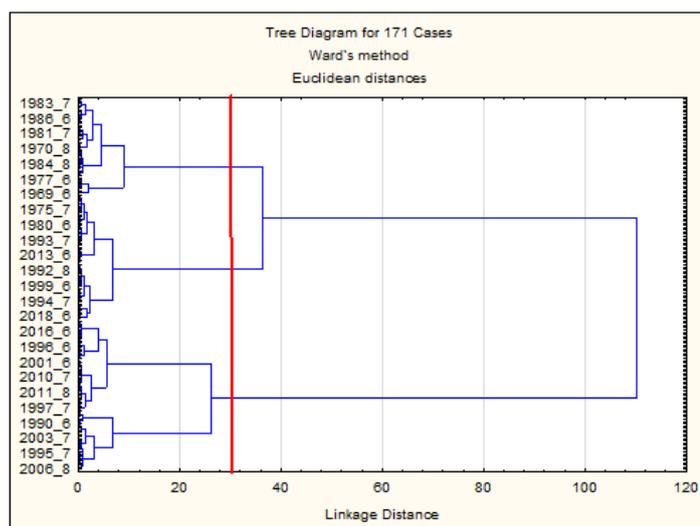


Рисунок 3.13. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Летний сезон. Сектор А

Таблица 3.10. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в летний сезон (сектор А)

Лето			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	21.95	21.28	20.86
Стандартная ошибка	0.13	0.09	0.12
Стандартное отклонение	0.94	0.82	0.84
Дисперсия выборки	0.89	0.67	0.70

Летний сезон, сектор В:

Характеризуется более низкими температурами по сравнению с сектором А, особенно в кластере 3 (20,08°C). Отрицательные значения эксцесса во всех кластерах (-0,80 до -1,46) говорят о более плоском, чем нормальное, распределении.

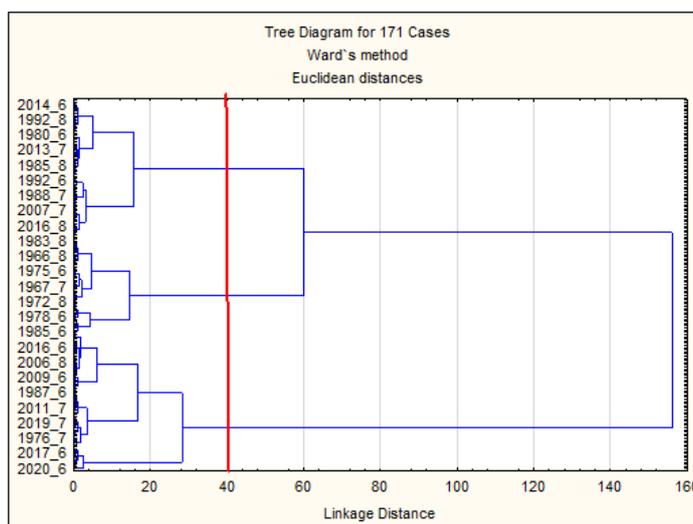


Рисунок 3.14. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Летний сезон. Сектор В

Таблица 3.11. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в летний сезон (сектор В)

Лето			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	21.53	20.94	20.08
Стандартная ошибка	0.11	0.09	0.13
Стандартное отклонение	0.82	0.77	0.87
Дисперсия выборки	0.67	0.60	0.76

Летний сезон, сектор С:

Средние температуры в секторе С летом занимают промежуточное положение между секторами А и В. Кластер 2 выделяется как наиболее теплый (21,74°C), что может указывать на ослабление апвеллинга в этой зоне в отдельные годы.

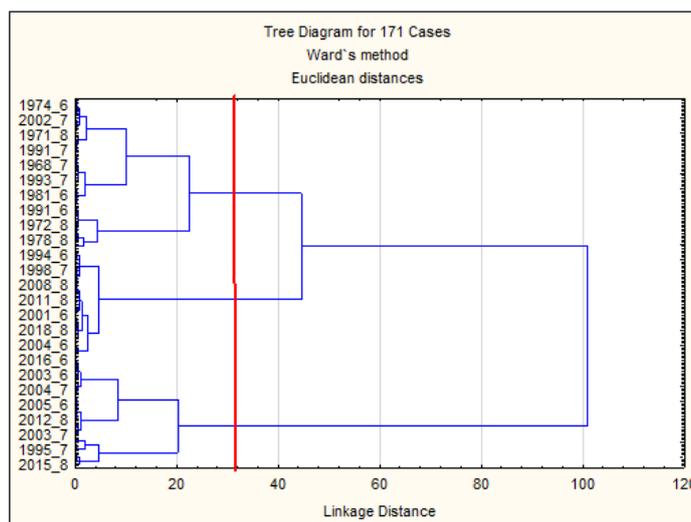


Рисунок 3.15. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Летний сезон. Сектор С

Таблица 3.12. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в летний сезон (сектор С)

Лето			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	20.95	21.74	20.17
Стандартная ошибка	0.06	0.10	0.09
Стандартное отклонение	0.55	0.66	0.58
Дисперсия выборки	0.30	0.43	0.34

Осенний сезон, сектор А:

Осенью наблюдаются максимальные температуры для всех секторов и сезонов, с пиковыми значениями в кластере 1 (22,54°C) и классе 2 (23,33°C).

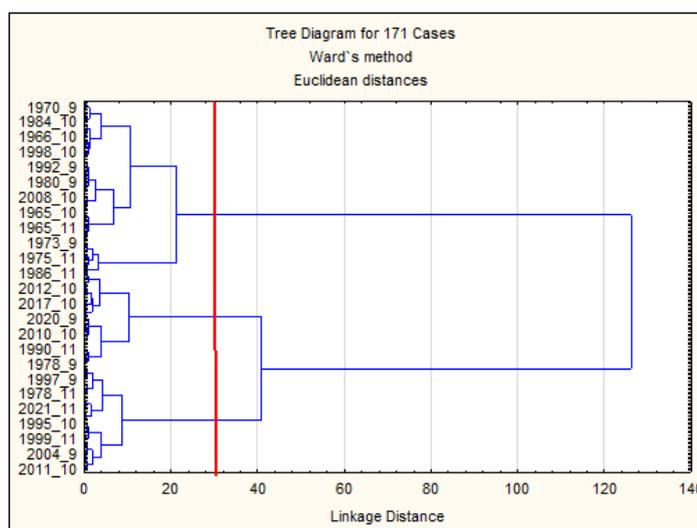


Рисунок 3.16. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Осенний сезон. Сектор А

Таблица 3.13. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в осенний сезон (сектор А)

Осень			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	22.54	23.33	21.75
Стандартная ошибка	0.06	0.09	0.06
Стандартное отклонение	0.49	0.57	0.52
Дисперсия выборки	0.24	0.33	0.27

Осенний сезон, сектор В:

Кластер 2 характеризуется аномально высокими температурами (22,38°C), что свидетельствует о существенном прогреве вод в осенний период в отдельные годы. Значительный разброс между кластерами (от 20,60°C до 22,38°C) указывает на высокую межгодовую вариабельность осенних условий.

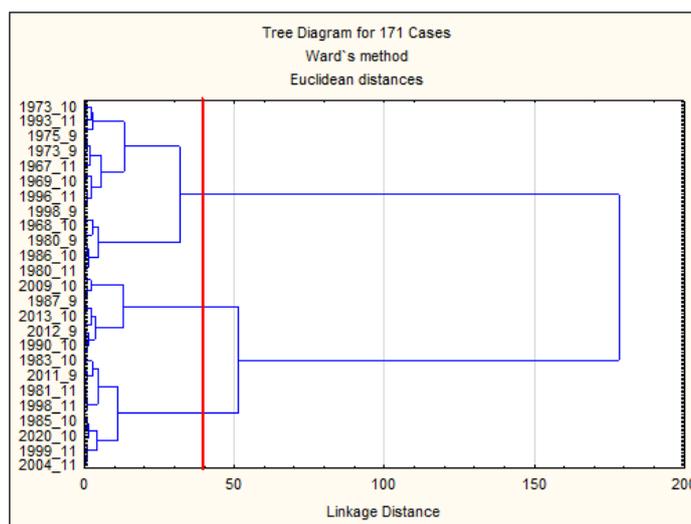


Рисунок 3.17. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Осенний сезон. Сектор В

Таблица 3.14. Описательная статистика для каждого кластера по ТПО в осенний сезон (сектор В)

Осень			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	21.32	22.24	20.60
Стандартная ошибка	0.10	0.11	0.10
Стандартное отклонение	0.82	0.72	0.76
Дисперсия выборки	0.67	0.52	0.57

Осенний сезон, сектор С:

Кластер 1 демонстрирует самые высокие температуры (22,86°C), что может быть следствием особых циркуляционных условий в этой зоне. Наименьшие значения дисперсии среди всех секторов указывают на относительную стабильность осенних условий в данном секторе.

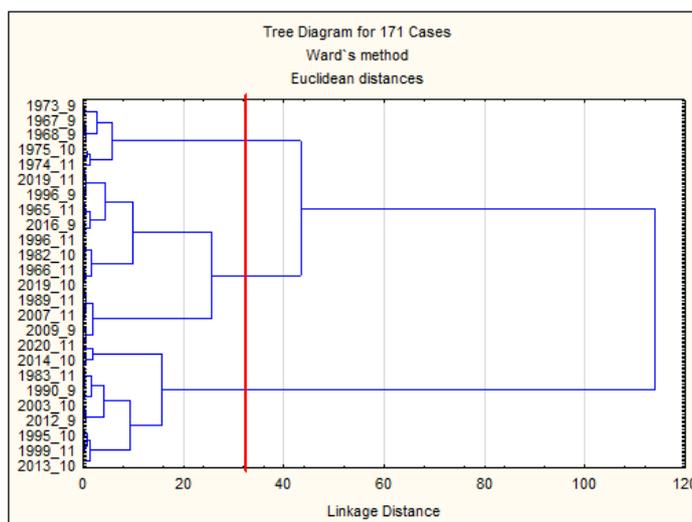


Рисунок 3.18. Дендрограмма по ТПО для иерархического метода Уорда, выполненного при помощи Евклидовой метрики. Осенний сезон. Сектор С

Таблица 3.15. Описательная статистика для каждого кластере по ТПО в осенний сезон (сектор С)

Осень			
Характеристика	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
Среднее	22.86	21.92	21.20
Стандартная ошибка	0.07	0.05	0.06
Стандартное отклонение	0.48	0.36	0.43
Дисперсия выборки	0.24	0.13	0.19

Результаты кластеризации показывают отчетливую сезонность термического режима во всех секторах, с минимальными температурами зимой и максимальными осенью.

Пространственные различия между секторами наиболее выражены зимой и весной, когда разница между средними температурами соответствующих кластеров в разных секторах достигает 2 – 3°C. Летом эти различия сглаживаются, что свидетельствует о более однородном прогреве поверхностных вод.

Сектор А (южный) в целом характеризуется более высокими температурами во все сезоны по сравнению с секторами В и С, что может быть связано с его более низкой широтой и меньшим влиянием холодного Канарского течения.

3.3 Влияние глобальных климатических циклов (ENSO) на океанографические условия акватории

Эль-Ниньо – Южное Колебание (ENSO) представляет собой циклический климатический феномен, возникающий в тропической части Тихого океана, оказывающий существенное влияние на атмосферную циркуляцию и океанографические условия во многих регионах мира.

Показатель SOI (Индекс Южного колебания) представляет собой нормализованную метрику, отражающую разницу барических полей на поверхности океана между двумя ключевыми пунктами наблюдения — французской Полинезией (о. Таити) и северным побережьем австралийского континента (г. Дарвин).

Этот индикатор входит в систему климатического мониторинга, фиксирующую значительные барические отклонения в воздушных массах над тропической зоной Тихого океана. Особую ценность данный параметр представляет при идентификации противоположных фаз климатического цикла ENSO (Эль-Ниньо – Южное колебание): теплой фазы Эль-Ниньо и холодной фазы Ла-Нинья.

Сопоставление динамики индекса Южного колебания (SOI) (рис. 3.19) с выявленными в разделе 3.1 особенностями океанографических условий позволяет обнаружить ряд важных закономерностей.

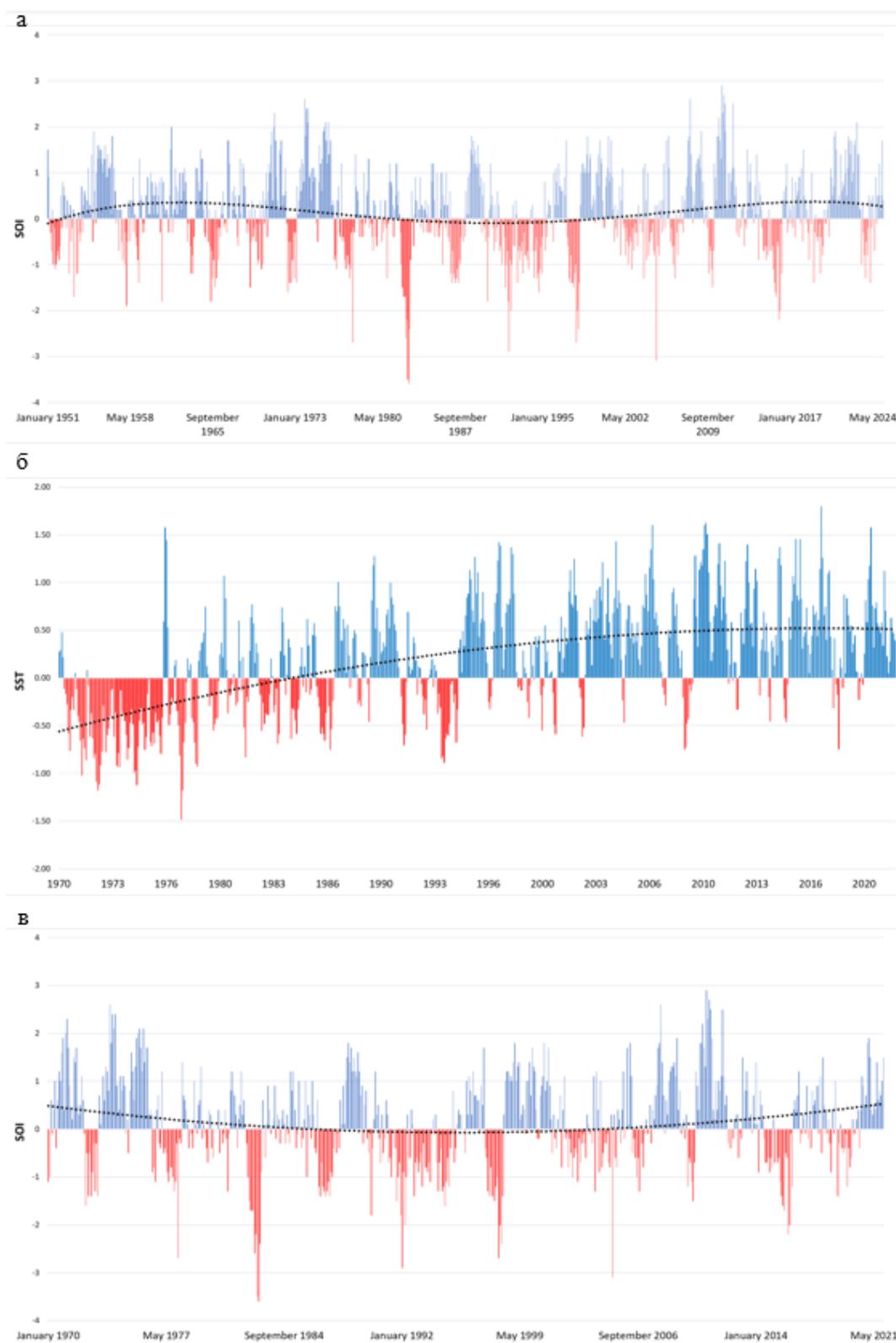


Рисунок 3.19. А – временной ход Индекса Южного колебания (SOI) с 1951 по 2025 гг.; б – временной ход аномалий ТПО (SST) с января 1970 по декабрь 2021 гг.; в - временной ход Индекса Южного колебания (SOI) с 1970 по 2021 гг.

На рисунке 3.19 (а) представлен индекс Южного колебания (SOI) с 1951 по 2024 год, отражающий атмосферную компоненту ENSO. Положительные значения SOI (синие) соответствуют фазе Ла-Нинья, отрицательные (красные) – фазе Эль-Ниньо. Пунктирная линия тренда демонстрирует слабовыраженную квазициклическую составляющую с периодом около 30-40 лет, что указывает на возможное влияние междекадных климатических осцилляций.

На рисунке 3.19 (б) отображены аномалии температуры поверхности океана (SST) в системе Канарского апвеллинга с 1970 по 2021 год. Наблюдается отчетливый положительный тренд (пунктирная линия), свидетельствующий о долгосрочном потеплении прибрежных вод Марокко. Особенно интенсивное повышение температуры отмечается после 1990-х.

Сопоставляя долгопериодные тренды SOI и SST можно обнаружить определенную инверсию – периоды преобладания положительных значений SOI (преимущественно Ла-Нинья) во второй половине XX века коррелируют с преобладанием отрицательных аномалий SST, тогда как смещение SOI в сторону более частых и интенсивных событий Эль-Ниньо в конце XX – начале XXI века сопровождается усилением положительных аномалий температуры в Канарском апвеллинге.

Выявленное в разделе 3.1 аномальное распределение фосфатов в 2007 и 2019 годах, а также обнаруженные годы-аналоги (1970, 1979, 1992) имеют четкую корреляцию с фазами ENSO. Все эти годы предшествовали значимым событиям Эль-Ниньо или следовали за Ла-Нинья:

1970 год предшествовал Ла-Нинья 1970-71 и Эль-Ниньо 1972-73

1979 год следовал за слабым Эль-Ниньо 1977-78 и предшествовал мощному Эль-Ниньо 1982-83

1992 год совпадает с завершением длительного Эль-Ниньо 1990-92 и предшествует сильному Эль-Ниньо 1997-98

2007 год приходится на начало Ла-Нинья 2007-08

2019 год следует за слабым Эль-Ниньо 2018-19 и предшествует Ла-Нинья 2020-21

Особенно показательна разнонаправленная динамика концентрации фосфатов в разных секторах после 2019 года. В южном секторе А наблюдалось резкое снижение концентрации фосфатов, что может свидетельствовать об ослаблении апвеллинга, в то время как в секторах В и С зафиксирован значительный рост, указывающий на усиление подъема глубинных вод.

Временные ряды солености демонстрируют более слабую, но все же заметную корреляцию с SOI. Локальные минимумы солености в секторе В отмечаются после сильных событий Эль-Ниньо 1997-98 и 2015-16, что может быть связано с изменениями в режиме осадков и испарения, а также с модификацией циркуляционных процессов.

Динамика растворенного кислорода показывает инверсную связь с ENSO: периоды Эль-Ниньо сопровождаются снижением концентрации кислорода, что может быть следствием усиления стратификации и ослабления вертикального перемешивания. Особенно ярко это проявляется в период 2015-2016 гг., когда наблюдалась стагнация в общем положительном тренде содержания растворенного кислорода.

Прибрежные воды Марокко известны высокой биопродуктивностью и имеют существенное промысловое значение. Южное колебание оказывает заметное влияние на экосистему региона и, как следствие, на динамику промысловых видов и успешность рыбного промысла.

Анализ графика выловов основных промысловых видов (европейский анчоус, европейская сардина и круглая сардинелла) за период 1958-2021 гг., представленного на рисунке 3.20, также позволяет выявить существенную взаимосвязь между динамикой промысла и Южным колебанием.

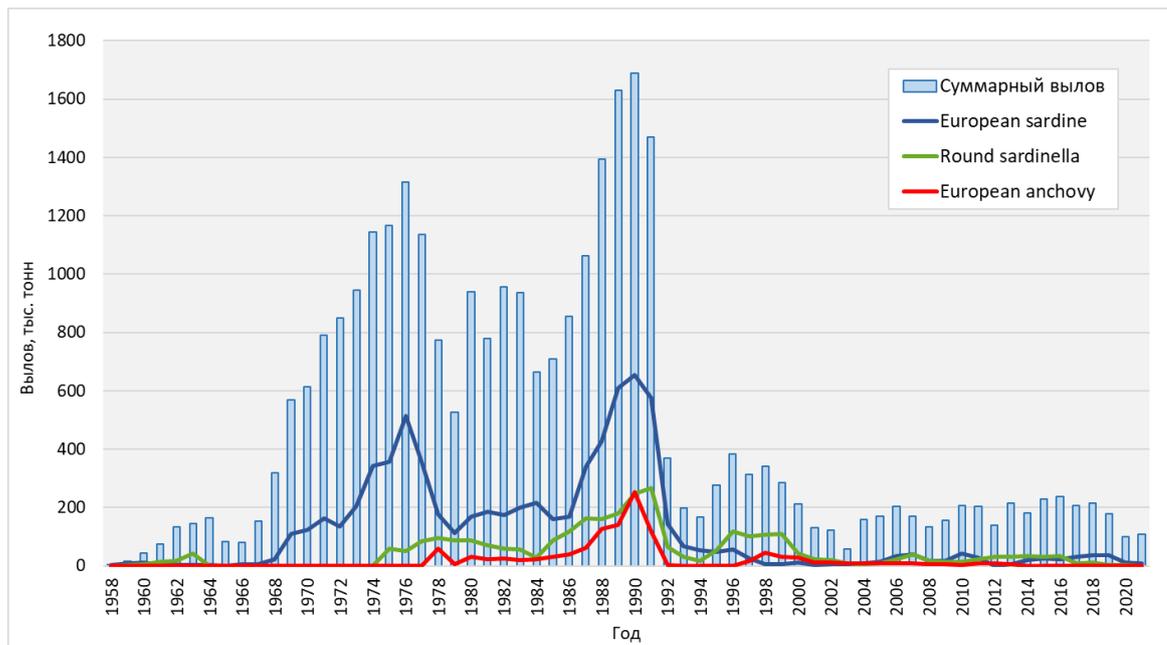


Рисунок 3.20. График вылова основных промысловых видов у побережья Марокко

Европейская сардина (European sardine) демонстрирует наиболее выраженную и сложную реакцию на изменения, связанные с ENSO.

Период 1958-1967 гг. характеризуется минимальными уловами сардины, что соответствует периоду преимущественно слабых событий Эль-Ниньо. Резкий рост с конца 1960-х до середины 1970-х гг. с достижением первого значительного пика около 1976-77 гг. (около 500 тыс. тонн). Этот рост совпадает с периодом преимущественно положительных значений SOI (преобладание Ла-Нинья), которые обычно связаны с усилением апвеллинга, что благоприятствует популяции сардины. Новый подъем с конца 1980-х до начала 1990-х гг. с абсолютным максимумом в 1992-1993 гг. (более 650 тыс. тонн), что следует за периодом сильных событий Ла-Нинья 1988-89 гг. и совпадает с продолжительным, но умеренным Эль-Ниньо 1990-92 гг. Резкое уменьшение уловов после 1993-94 гг. с падением более чем на порядок к концу 1990-х гг. Этот спад следует за переходом к очень сильному Эль-Ниньо 1997-98 гг. Восстановление запасов и уловов сардины отмечается в период 2005-

2007 гг., что совпадает с преобладанием нейтральных условий и слабого Ла-Нинья. Четко выраженные циклы в добыче сардины с 2005 по 2021 гг. обнаруживают корреляцию с фазами ENSO: локальные пики уловов (2007, 2010, 2015, 2019) часто следуют за переходом от Эль-Ниньо к Ла-Нинья или нейтральным условиям.

Европейский анчоус (*European anchovy*) показывает иную модель реакции на ENSO.

Практически отсутствие промышленного вылова до середины 1970-х гг. Первый значимый пик в конце 1970-х гг., совпадающий с Эль-Ниньо 1976-77 гг. Умеренные уловы с колебаниями в 1980-х гг. Резкий рост с конца 1980-х до середины 1990-х гг. с абсолютным максимумом в 1994-95 гг. (около 250 тыс. тонн), непосредственно предшествующим очень сильному Эль-Ниньо 1997-98 гг. Резкое падение после 1995-96 гг. и практически полное исчезновение из промысла к концу 1990-х гг., после чего они стабилизируются на относительно низком уровне (5-10 тыс. тонн). В период 2010-2021 гг. уловы анчоуса остаются относительно стабильными, несмотря на значительные колебания SOI, что может указывать на адаптацию популяции к изменяющимся условиям или на влияние других факторов (например, промыслового усилия).

Круглая сардинелла (*Round sardinella*) демонстрирует наиболее выраженную амплитуду колебаний уловов.

Умеренные уловы в 1960-х гг., когда вылов сардины был минимальным. Рост в конце 1970-х - начале 1980-х гг., совпадающий с временным снижением уловов после первого пика. Значительный подъем в конце 1980-х - начале 1990-х гг. с пиком, предшествующим максимальному пику вылова в 1992-93 гг. Максимальный вылов сардины в 1994-96 гг. (около 260-270 тыс. тонн), приходящийся на период начала резкого снижения уловов и предшествующий сильному Эль-Ниньо 1997-98 гг. Волнообразные колебания с общей тенденцией к снижению в XXI веке, аналогично динамике сардины. В период 2003-2021 гг. уловы сардинеллы демонстрируют относительную стабильность

с локальным максимумом около 2007-2008 гг. (период Ла-Нинья) и постепенным снижением после 2015 г.

Наблюдается отчетливая обратная зависимость между уловами сардины и сардинеллы в периоды 1992-2000 гг. и 2005-2015 гг., что может свидетельствовать о конкуренции этих видов за экологические ниши, модифицируемые под влиянием ENSO.

В период 1997-1999 гг., совпадающий с сильным Эль-Ниньо и последующим Ла-Нинья, отмечается синхронное пиковое значение уловов анчоуса и сардинеллы при минимальных уловах сардины, что указывает на смену доминирующих видов в экосистеме.

После 2015 г. наблюдается синхронное снижение уловов всех трех видов, что может быть связано как с влиянием очень сильного Эль-Ниньо 2015-16 гг. на продуктивность экосистемы в целом, так и с увеличением промысловой нагрузки.

3.4 Результаты прогнозирования термического режима прибрежных вод Марокко

Прогноз температурных условий имеет особое значение для рыбохозяйственного комплекса прибрежных вод Марокко, поскольку позволяет предположить изменения в численности и доступности основных промысловых объектов, которые, как показал анализ вылова в предыдущем разделе, реагируют на изменения термического режима. Заблаговременное прогнозирование некоторых климатических явлений создает основу для адаптивного управления промыслом и оптимизации рыболовного усилия.

Первый этап разработки нейросетевой модели включает детальное исследование структуры и особенностей временного ряда. Следующий важный этап – это построение спектрограммы для выявления периодических компонент. Для этого используется спектральный анализ Фурье, результат которого представлен на рисунке 3.21.

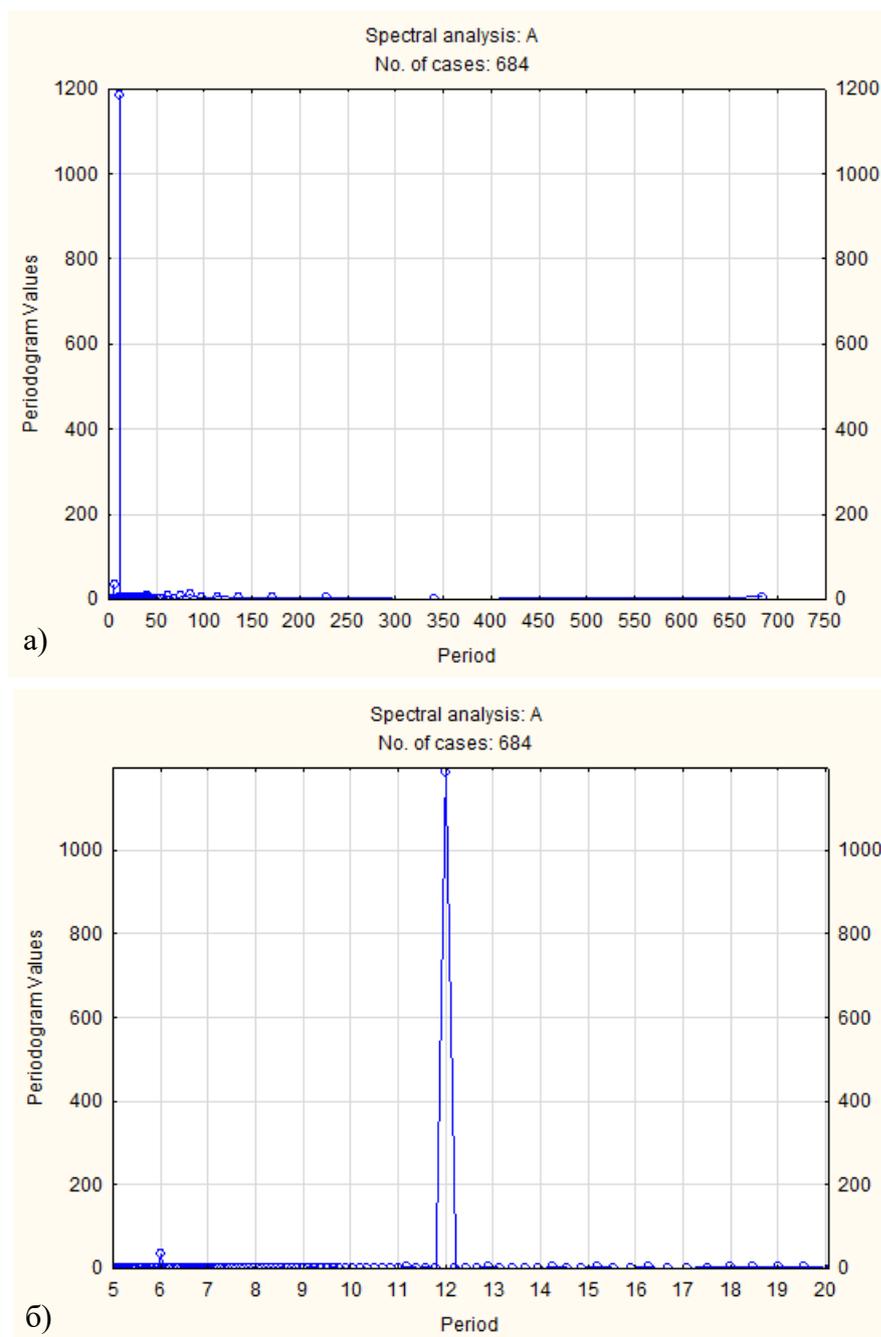


Рисунок 3.21. Спектральный анализ Фурье для временного ряда значений ТПО с 1965 по 2021 г для сектора А (а – спектрограмма для всего ряда; б – спектр, характеризующий периодичность компонент)

На периодограмме наибольший пик соответствует периоду, который необходимо найти, в нашем случае он равен 12 месяцам.

Результаты прогноза для сектора А:

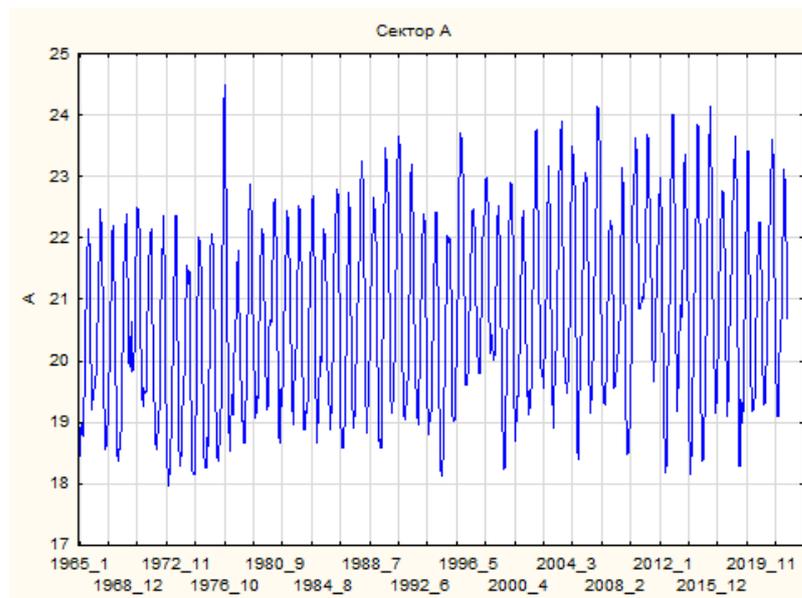


Рисунок 3.22. График временного ряда ТПО с 1965 по 2021 гг. в секторе А

В результате обучений нейросети в STATISTICA Neural Networks наилучшей была выбрана модель вида 12-15-1 (12 входов, 15 скрытых нейронов и 1 выход), с коэффициентом корреляции равном 0.9996. Средняя относительная ошибка между фактическими значениями временного ряда и прогнозными значениями составила 0.0117. Диаграмма распределения остатков (рис. 3.23) близка к нормальному распределению. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных тоже показала хороший результат (рис. 3.24), нет никаких явных выбросов.

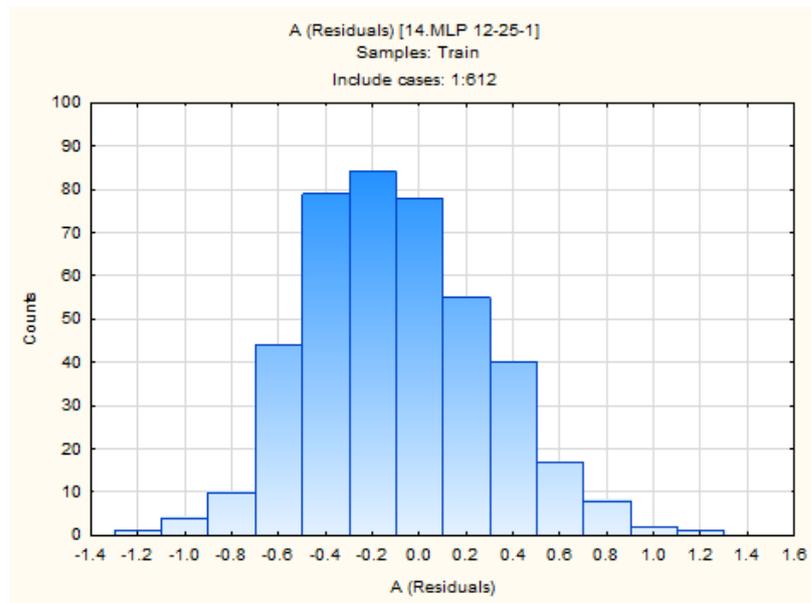


Рисунок 3.23. Гистограмма распределения остатков (сеть 12-15-1)

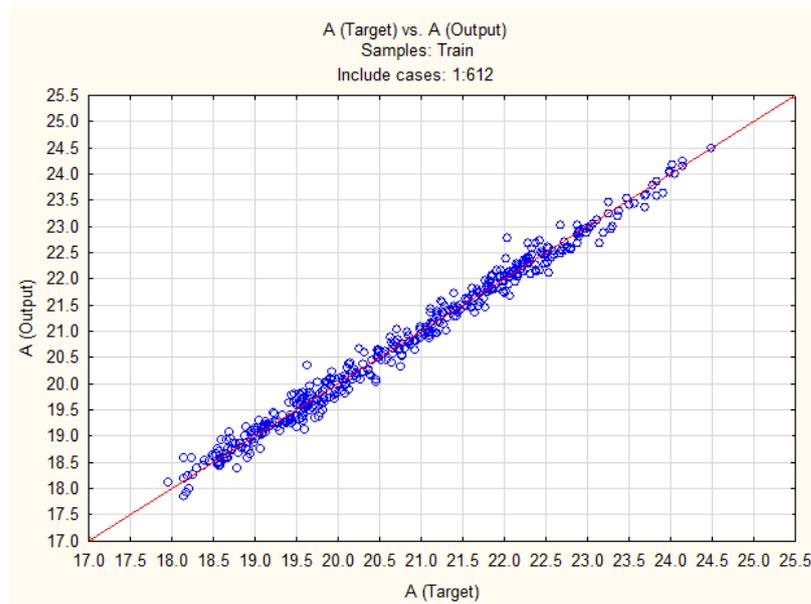


Рисунок 3.24. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных (сеть 12- 15- 1)

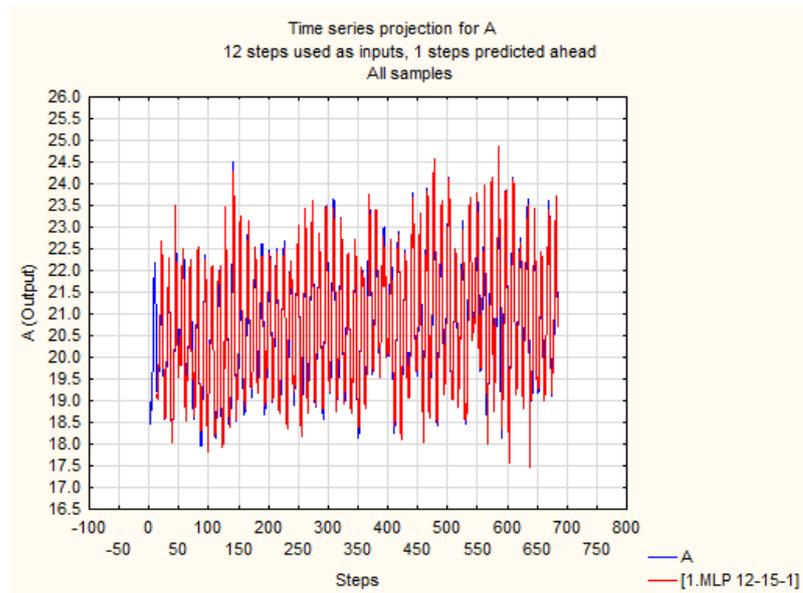


Рисунок 3.25. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

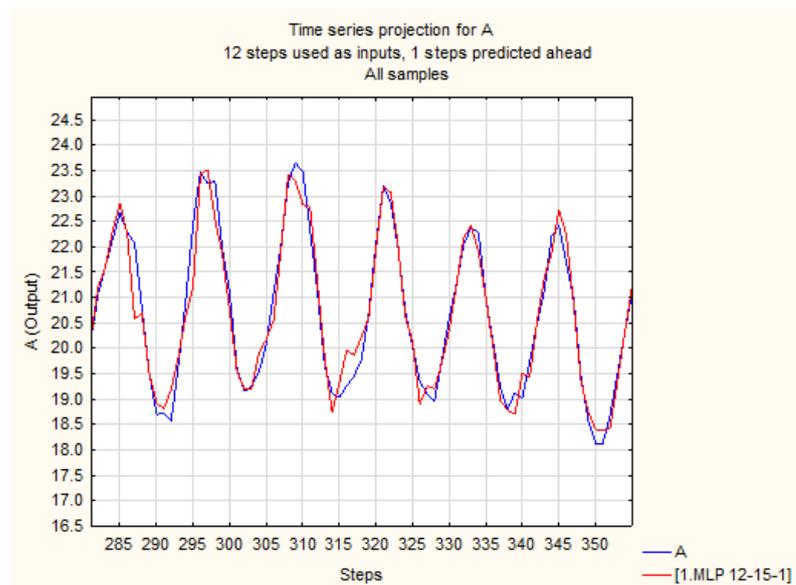


Рисунок 3.26. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

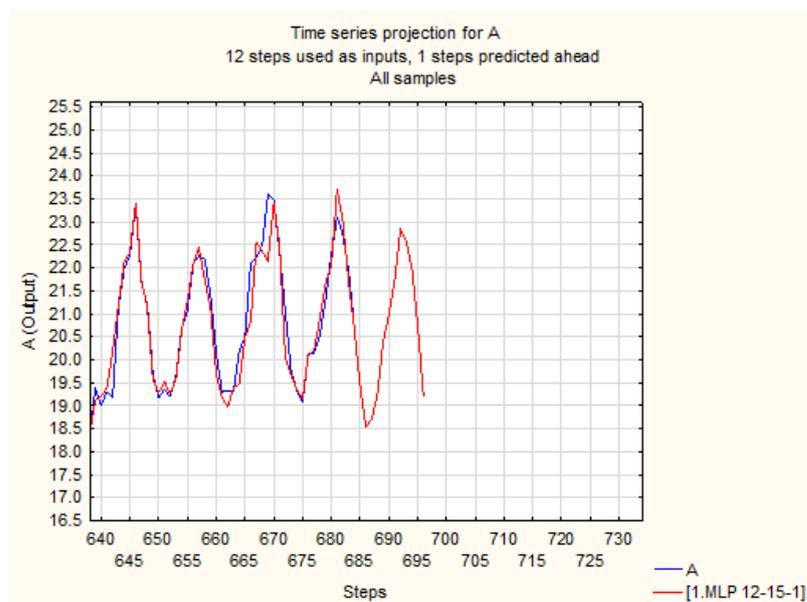


Рисунок 3.27. Спрогнозированные значения оптимальной модели (12-15-1) на год вперед

Результаты прогноза для сектора В:

В результате обучений нейросети в STATISTICA Neural Networks наилучшей была выбрана модель вида 12-10-1 (12 входов, 10 скрытых нейронов и 1 выход), с коэффициентом корреляции равном 0.9947. Средняя относительная ошибка между фактическими значениями временного ряда и прогнозными значениями составила 0.0273. Диаграмма распределения остатков (рис. 3.29) близка к нормальному распределению. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных тоже показала хороший результат (рис. 3.30), нет никаких явных выбросов.

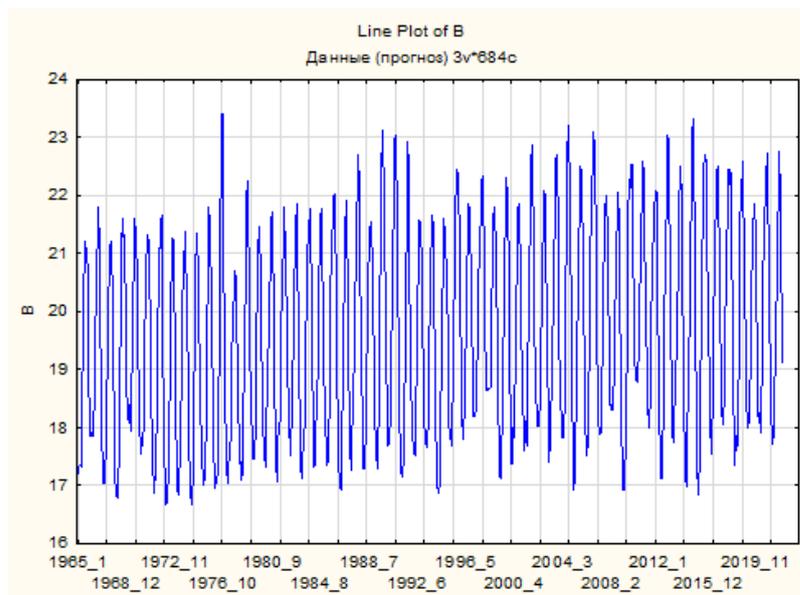


Рисунок 3.28. График временного ряда ТПО с 1965 по 2021 гг. в секторе В

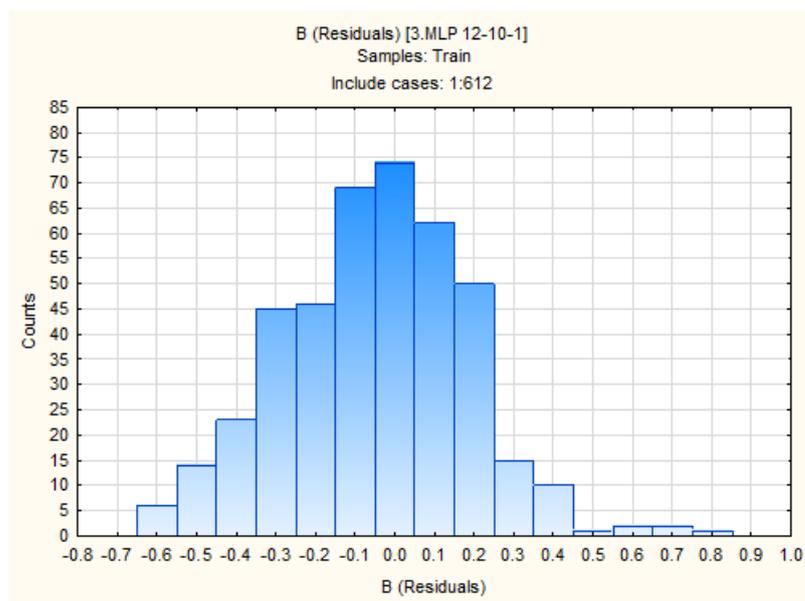


Рисунок 3.29. Гистограмма распределения остатков (сеть 12-10-1)

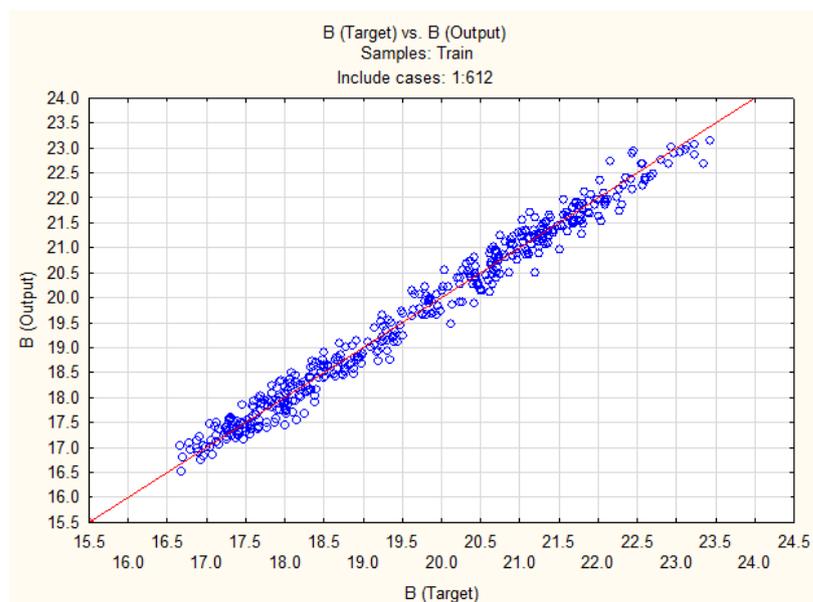


Рисунок 3.30. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных
(сеть 12- 10- 1)

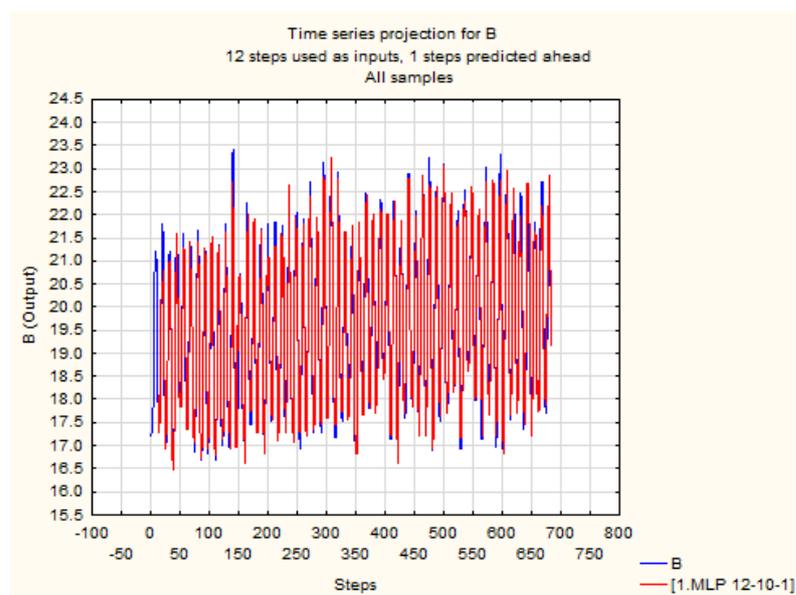


Рисунок 3.31. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

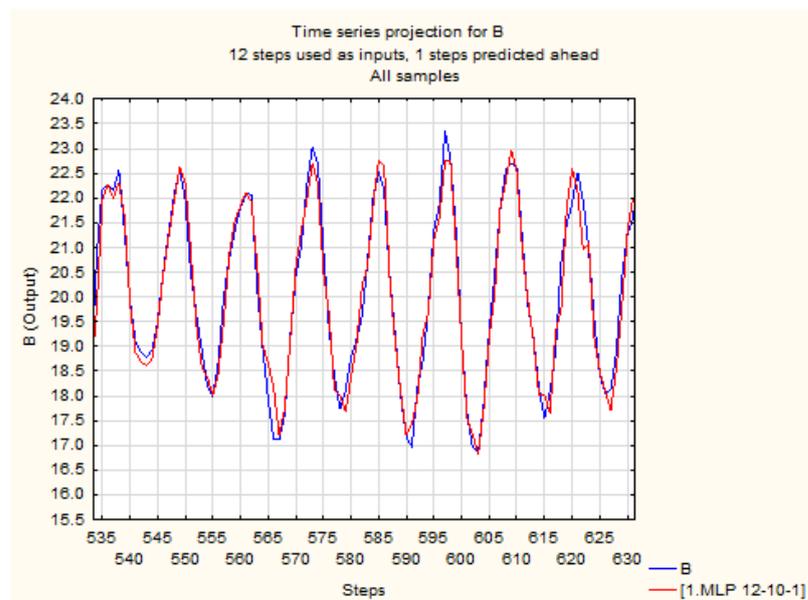


Рисунок 3.32. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

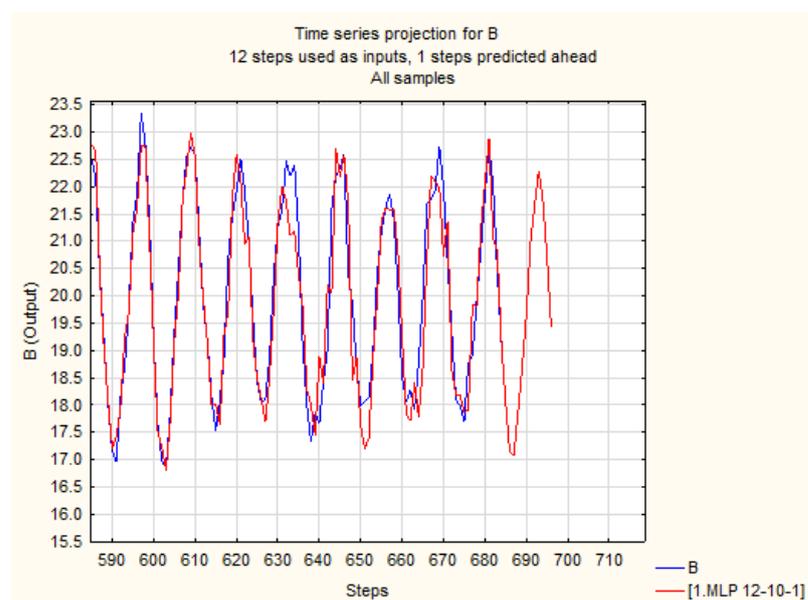


Рисунок 3.33. Спрогнозированные значения оптимальной модели (12-10-1) на год вперед

Результаты прогноза для сектора С:

В результате обучений нейросети в STATISTICA Neural Networks наилучшей была выбрана модель вида 12-5-1 (12 входов, 5 скрытых нейронов

и 1 выход), с коэффициентом корреляции равном 0.9659. Средняя относительная ошибка между фактическими значениями временного ряда и прогнозными значениями составила 0.0280. Диаграмма распределения остатков (рис. 3.35) близка к нормальному распределению. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных тоже показала хороший результат (рис. 3.36), нет никаких явных выбросов.

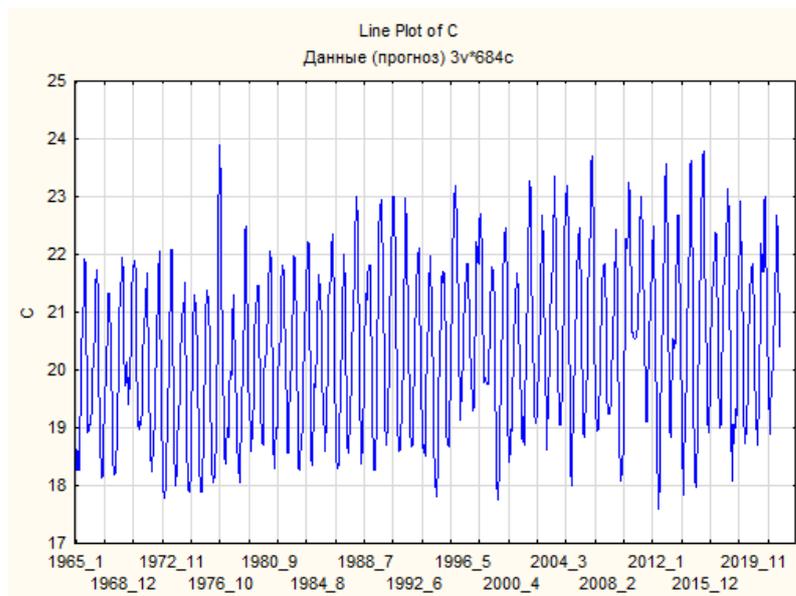


Рисунок 3.34. График временного ряда ТПО с 1965 по 2021 гг. в секторе С

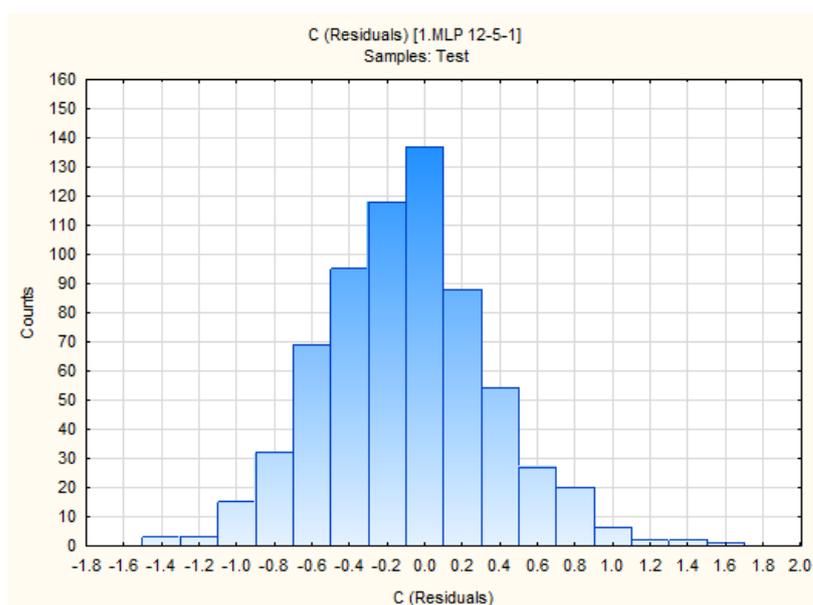


Рисунок 3.36. Гистограмма распределения остатков (сеть 12-5-1)

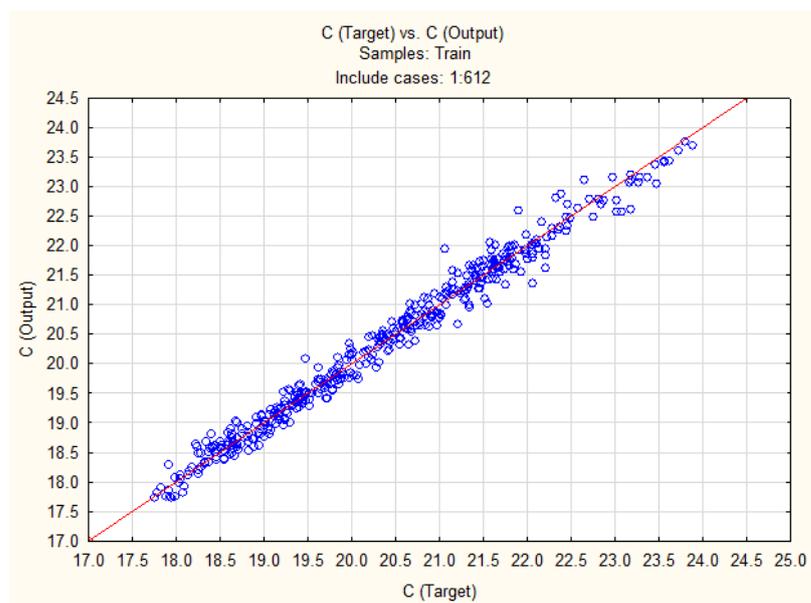


Рисунок 3.35. Диаграмма рассеивания целевых и выходных переменных (сеть 12- 5- 1)

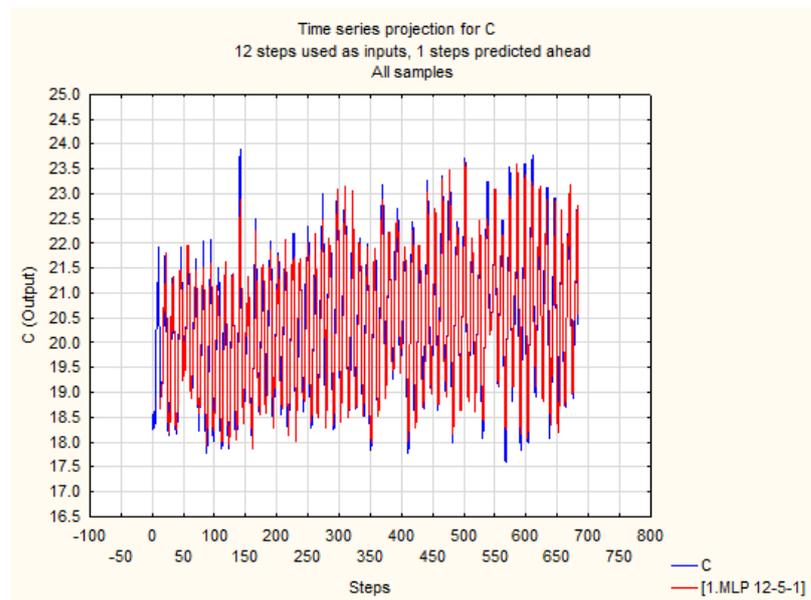


Рисунок 3.36. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

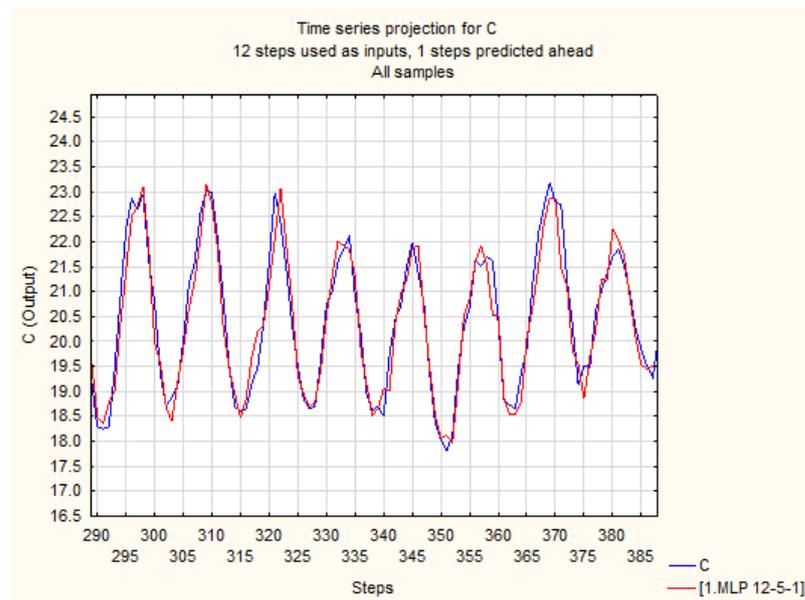


Рисунок 3.37. График исходного временного ряда и спрогнозированных значений по оптимальной модели

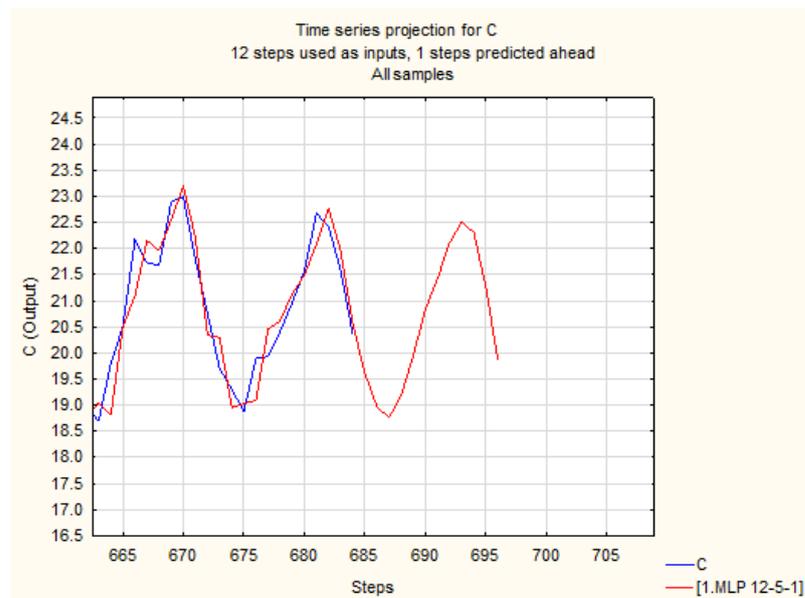


Рисунок 3.38. Спрогнозированные значения оптимальной модели (12-10-1) на год вперед

Заключение

В результате исследования была проведена оценка пространственно-временной изменчивости океанографических условий в акватории Канарского апвеллинга. Началом работы послужило ранее выявленное мной нетипичное распределение гидрохимических параметров в пределах двух идентифицированных очаговых зон данной апвеллинговой системы. Для предположения о циклическом характере обнаруженных аномалий были расширены хронологические рамки исследования и увеличена степень пространственной дискретизации анализируемой акватории с двух до трех секторов.

Полученные результаты дают основания для следующих научно обоснованных выводов:

Установлены статистически достоверные различия в долговременных трендах и абсолютных значениях основных гидрологических и гидрохимических параметров между выделенными секторами, что подтверждает корректность и обоснованность схемы пространственного разделения исследуемой акватории.

Проведенный кластерный анализ позволил выявить устойчивые группы термических режимов для каждого сектора и сезона года. Применение данного метода к расширенным временным рядам температуры поверхности океана (ТПО) выявило группу лет, характеризующихся однотипными океанографическими условиями, наблюдавшимся в 2019 году. Сопоставление хронологических интервалов между полученными годами-аналогами (1970, 1979, 1992, 2007, 2019) позволяет сделать вывод о квазипериодичности изучаемого процесса с характерным временным масштабом 12-13 лет. Обнаруженная закономерность позволяет провести аналогию с гидрологическими аномалиями, установленными для системы Перуанского апвеллинга, связанными с Эль-Ниньо.

Корреляционный анализ многолетних рядов вылова основных промысловых объектов (1958-2021 гг.) и индекса Южного колебания (SOI) позволяет судить о существенном влиянии ENSO на популяционную динамику промысловых гидробионтов у побережья Марокко. Данная взаимосвязь проявляется как на уровне отдельных экстремальных событий (особенно Эль-Ниньо 1997-98 гг.), так и в контексте долговременных режимных сдвигов в структуре промысловых сообществ.

Полученные результаты реализованы в форме прогностической модели термического режима исследуемой акватории. Учитывая установленную взаимосвязь между температурными аномалиями, концентрацией биогенных элементов и продукционным потенциалом экосистемы, разработанная модель может являться основой для прогнозирования пространственно-временной динамики промысловых скоплений и оптимизации промыслового усилия. Особую ценность она приобретает в контексте выявления потенциальных аномальных лет, характеризующихся нетипичным распределением гидробионтов, что позволяет своевременно корректировать стратегию промысла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hagen, E. Northwest African upwelling scenario / E. Hagen // *Oceanologica Acta*. — 2001. — Т. 24. — С. 113-128.
2. Pelegrí, J. L. Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter / J. L. Pelegrí, J. Arístegui, L. Cana, M. González-Dávila, A. Hernández-Guerra, S. Hernández-León, P. Sangrà // *Journal of Marine Systems*. — 2005. — Т. 54, № 1-4. — С. 3-37
3. Cropper, T. E. Spatial and temporal seasonal trends in coastal upwelling off Northwest Africa, 1981–2012 / T. E. Cropper, E. Hanna, G. R. Bigg // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2014. — Т. 86. — С. 94-111
4. Makaoui, A. L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998 / A. Makaoui, A. Orbi, K. Hilmi, S. Zizah, J. Larissi, M. Talbi // *Comptes Rendus Geoscience*. — 2005. — Т. 337, № 16. — С. 1518-1524.
5. Barton, E. D. Variability in the Canary Islands area of filament-eddy exchanges / E. D. Barton, J. Arístegui, P. Tett, E. Navarro-Perez // *Progress in Oceanography*. — 2004. — Т. 62, № 2-4. — С. 71-94
6. Bakun, A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling / A. Bakun // *Science*. — 1990. — Т. 247, № 4939. — С. 198-201
7. Mittelstaedt, E. The ocean boundary along the northwest African coast: circulation and oceanographic properties at the sea surface / E. Mittelstaedt // *Progress in Oceanography*. — 1991. — Т. 26, № 4. — С. 307-355
8. Sánchez, R. F. Comparisons of ocean scatterometer and anemometer winds off the southwestern Iberian Peninsula / R. F. Sánchez, P. Relvas, H. O. Pires // *Continental Shelf Research*. — 2007. — Т. 27, № 2. — С. 155-175
9. Arístegui, J. Sub-regional ecosystem variability in the Canary Current upwelling / J. Arístegui, E. D. Barton, X. A. Álvarez-Salgado, A. M. P. Santos, F.

G. Figueiras, S. Kifani, H. Demarcq // *Progress in Oceanography*. — 2009. — T. 83, № 1-4. — C. 33-48

10. Benazzouz, A. An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach—The case of the Canary Current upwelling system / A. Benazzouz, S. Mordane, A. Orbi, M. Chagdali, K. Hilmi, A. Atillah, D. Hervé // *Continental Shelf Research*. — 2014. — T. 81. — C. 38-54

11. Santos, A. M. P. Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity / A. M. P. Santos, A. S. Kazmin, Á. Peliz // *Journal of Marine Research*. — 2005. — T. 63, № 2. — C. 359-379

12. Narayan, N. Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century / N. Narayan, A. Paul, S. Munitza, M. Schulz // *Ocean Science*. — 2010. — T. 6, № 3. — C. 815-823

13. Marcello, J. Seasonal and temporal study of the northwest African upwelling system / J. Marcello, A. Hernández-Guerra, F. Eugenio, A. Fonte // *International Journal of Remote Sensing*. — 2011. — T. 32, № 7. — C. 1843-1859

14. Chavez, F. P. A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems / F. P. Chavez, M. Messié // *Progress in Oceanography*. — 2009. — T. 83, № 1-4. — C. 80-96.

15. Nykjær, L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991 / L. Nykjær, L. van Camp // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1994. — T. 99, № C7. — C. 14197-14207

16. Arístegui, J. Variability in plankton community structure, metabolism, and vertical carbon fluxes along an upwelling filament (Cape Juby, NW Africa) / J. Arístegui, E. D. Barton, P. Tett, M. F. Montero, M. García-Muñoz, G. Basterretxea, D. De Armas // *Progress in Oceanography*. — 2004. — T. 62, № 2-4. — C. 95-113

17. Pauly, D. Primary production required to sustain global fisheries / D. Pauly, V. Christensen // *Nature*. — 1995. — T. 374, № 6519. — C. 255-257

18. Belvèze, H. The influence of hydroclimatic factors on the availability of the sardine (*Sardina pilchardus*, Walbaum) in the Moroccan Atlantic fishery / H. Belvèze, K. Erzini // *FAO Fisheries Report*. — 1983. — Т. 291, № 2. — С. 285-328
19. Bakun, A. Greenhouse gas buildup, sardines, submarine eruptions and the possibility of abrupt degradation of intense marine upwelling ecosystems / A. Bakun, S. J. Weeks // *Ecology Letters*. — 2004. — Т. 7, № 11. — С. 1015-1023
20. Kifani, S. Climate dependent fluctuations of the Moroccan sardine and their impact on fisheries / S. Kifani // *Oceanographic Literature Review*. — 1998. — Т. 3, № 45. — С. 599
21. FAO. Fishery and Aquaculture Country Profiles: The Kingdom of Morocco / Food and Agriculture Organization of the United Nations. — Rome : FAO, 2018. — Текст : электронный. — URL: <http://www.fao.org/fishery/facp/MAR/> (дата обращения: 16.04.2025)
22. Roy, C. ENSO related modulation of coastal upwelling in the eastern Atlantic / C. Roy, C. Reason // *Progress in Oceanography*. — 2001. — Т. 49, № 1-4. — С. 245-255
23. Czaja, A. Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic Oscillation / A. Czaja, C. Frankignoul // *Journal of Climate*. — 2002. — Т. 15, № 6. — С. 606-623
24. García-Serrano, J. Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic / J. García-Serrano, C. Cassou, H. Douville, A. Giannini, F. J. Doblas-Reyes // *Journal of Climate*. — 2017. — Т. 30, № 17. — С. 6945-6957
25. Msadek, R. Mechanisms of the atmospheric response to North Atlantic multidecadal variability: A model study / R. Msadek, C. Frankignoul, L. Z. Li // *Climate Dynamics*. — 2011. — Т. 36, № 7-8. — С. 1255-1276
26. Alexander, M. A. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air–sea interaction over the global oceans / M. A. Alexander, I. Bladé, M. Newman, J. R. Lanzante, N. C. Lau, J. D. Scott // *Journal of Climate*. — 2002. — Т. 15, № 16. — С. 2205-2231

27. Binet, D. Climate and pelagic fisheries in the Canary and Guinea currents 1964–1993: the role of trade winds and the southern oscillation / D. Binet // *Oceanologica Acta*. — 1997. — Т. 20, № 1. — С. 177-190

28. Zeeberg, J. Climate modulates the effects of *Sardinella aurita* fisheries off Northwest Africa / J. Zeeberg, A. Corten, P. Tjoe-Awie, J. Coca, B. Hamady // *Fisheries Research*. — 2008. — Т. 89, № 1. — С. 65-75

29. Borges, M. F. Sardine regime shifts off Portugal: a time series analysis of catches and wind conditions / M. F. Borges, A. M. P. Santos, N. Crato, H. Mendes, B. Mota // *Scientia Marina*. — 2003. — Т. 67, № S1. — С. 235-244

30. Мищенкова А.С. Межгодовая изменчивость океанографических условий в зоне промысла у побережья Марокко. – РГГМУ, 2023. – электронный источник – Режим доступа: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_ff9de32120e14af2b5a62a82057350c2.pdf– Дата последнего обращения - 06.05.2025

31. Бурыкин С.Н., Краснобородько О.Ю., Морозов А.А. Особенности океанологических условий в водах Марокко в осенний сезон 2019 года. – Калининград: ТРУДЫ АТЛАНТИРО, 2020. – Т. 4. № 2. – С. 30 – 42

32. База данных GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 «Copernicus Marine MyOcean Viewer. Global Ocean Physics Reanalysis» – электронный источник – Режим доступа: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029/download?dataset=cmems_mod_glo_bgc_my_0.25deg_P1M-m_202406 – Дата последнего обращения – 26.05.2025

33. Базы данных GLOBAL_ANALYSISFORECAST_BGC_001_028 «Copernicus Marine MyOcean Viewer. Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast» – электронный источник – Режим доступа: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029/download?dataset=cmems_mod_glo_bgc_my_0.25deg_P1M-m_202406 – Дата последнего обращения – 26.05.2025

34. База данных ERSST – электронный источник – Режим доступа: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version5/.sst/> – Дата последнего обращения – 26.05.2025

35. База данных Fishery Statistical Collections fact sheets. Global capture production «FAO Global Fishery and Aquaculture Production Statistics» – электронный источник – Режим доступа: https://www.fao.org/fishery/statistics-query/en/capture/capture_quantity – Дата последнего обращения – 26.05.2025

36. Программный комплекс STATISTICA в решении задач управления качеством – электронный источник – Режим доступа: <http://ieee.tusur.ru/books/statistica.pdf> – Дата последнего обращения – 30.05.2025