



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 Влияние колебаний климата на производительность рыбного промысла  
на Канарском апвеллинге

Исполнитель Мельников Дмитрий Сергеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Чанцев Валерий Юрьевич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«14» ев 2024 г.

Санкт-Петербург  
2024

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	2
1 Район исследования .....	4
1.1 Описание района исследования.....	4
1.2 Рассмотренные промысловые виды рыб .....	7
2 Исходные данные и методы .....	11
2.1 Исходные данные .....	11
2.2 Методы анализа.....	14
2.2.1 Корреляционный анализ.....	14
2.2.2 Взаимнокорреляционный анализ .....	15
2.2.3 Кластерный анализ.....	16
3 Влияние колебаний климата на производительность промысла на Канарском апвеллинге .....	21
3.1 Определение районов апвеллинга .....	21
3.2 Расчет индексов апвеллинга .....	30
3.3 Корреляционные матрицы уловов и характеристик апвеллинга .....	34
3.4 Взаимнокорреляционные функции характеристик интенсивности апвеллинга.....	37
3.5 Результаты кластеризации для характеристик апвеллинга .....	54
3.6 Результат кластеризации для уловов промысловых видов с характеристиками апвеллинга .....	56
Заключение .....	65
Приложение А .....	66
Приложение Б.....	69
Источники .....	72

## Введение

Высокопродуктивный район Канарского апвеллинга служит кормовой базой для множества видов пелагических рыб, многие из которых являются промысловыми, а также является одним из четырех основных регионов апвеллинга в мировом океане. [1,2,3]

Прибрежный апвеллинг образуется наличием благоприятной вдольбереговой компоненты ветра. Условием его возникновения в Северном полушарии является направление компоненты ветра с севера на юг при расположении берега слева.[4]

Ежегодные уловы в исследуемом районе варьируется от 1,2 до 2,4 миллиона тонн с 1970 по 2021 годы (ФАО, FishstatJ). Запасы пелагических рыб, составляющие примерно 70 процентов то общего улова, не подвергаются чрезмерной эксплуатации, и было показано, что их численность определяется силой апвеллинга. По данным ФАО (1997а), большая часть придонных запасов полностью эксплуатируется в Канарском течении от Мавритании до Гвинеи-Бисау, и в последнее десятилетие уловы существенно увеличиваются (ФАО, FishstatJ).[1]

Обычно, прибрежные апвеллинги простираются вдоль берега, и их сезонный ход изменяется в зависимости то географической широты. В некоторых широтах наблюдается более существенное изменение сезонного хода, эти широты условно принимаются за точки, где апвеллинг разделяется на регионы. Деление апвеллинга на регионы не всегда очевидно и обосновано. П. Чернышков в своей работе (Чернышков, 2006) разделяет Канарский апвеллинг по характеру внутригодовой изменчивости на три зоны: зону сезонного апвеллинга (между 10 и 20° с.ш.), зону интенсивного круглогодичного апвеллинга (между 20 и 26° с.ш.) и зону умеренного круглогодичного апвеллинга с выраженной сезонностью (между 26 и 32° с.ш.).

Другие авторы разбивают области Канарского апвеллинга на три квазиоднородных района: северный (25–27° с.ш.), центральный (21–23° с.ш.) и южный (15–19° с.ш.) (Малинин и др., 2002).[5]

Актуальность работы заключается в решении проблемы связи годовых уловов с достаточно сомнительной репрезентативностью и характеристик Канарского апвеллинга, который в свою очередь является сложной системой зависящей от множества факторов, таких как географическое положение, рельеф дна, близость островов и т.д.

Цель работы состоит в том, чтобы выявить зависимости между индексами интенсивности апвеллинга, отражающими колебания климата в исследуемой зоне с уловами основных промысловых видов рыб.

В задачи работы входит:

1. Выбор районов с максимальной изменчивостью интенсивности апвеллинга с помощью данных о концентрации хлорофилла и вертикальной скорости.
2. Расчет характеристик апвеллинга, суммарной концентрации хлорофилла, вертикальной скорости подъема воды, термического и Экмановского индексов для выбранных районов.
3. Выявление зависимостей и связей колебаний характеристик апвеллинга на уловы промысловых видов рыб.

## 1 Район исследования

### 1.1 Описание района исследования

Район берегового апвеллинга от Гибралтара до мыса Блан обусловлен наличием благоприятных северо-восточных ветров в течение всего года, хотя в летние месяцы ветры и апвеллинг более интенсивны. Между мысом Блан и мысом Верт апвеллинг имеет выраженную сезонную периодичность, достигая пика интенсивности зимой. В отличие от иберийского побережья, северо-западное побережье Африки в значительной степени находится под влиянием общей циркуляции североатлантического субтропического круговорота, особенно его восточной ветви, называемой «Канарским течением». Канарское течение течет к экватору, взаимодействуя с прибрежными водами апвеллинга. Он отделяется от побережья вблизи мыса Блан ( $21^{\circ}$  с.ш.) и течет на запад до широты мыса Верт ( $15^{\circ}$  с.ш.). К югу от мыса Блан находится крупная постоянная циклоническая рециркуляция вследствие смещения Канарского течения в море (Рис.1). Зимой у берега над шельфом возникает узкий поток, направленный к экватору, в ответ на апвеллинг, вызванный дующей на юг полосой пассатного ветра.[6]

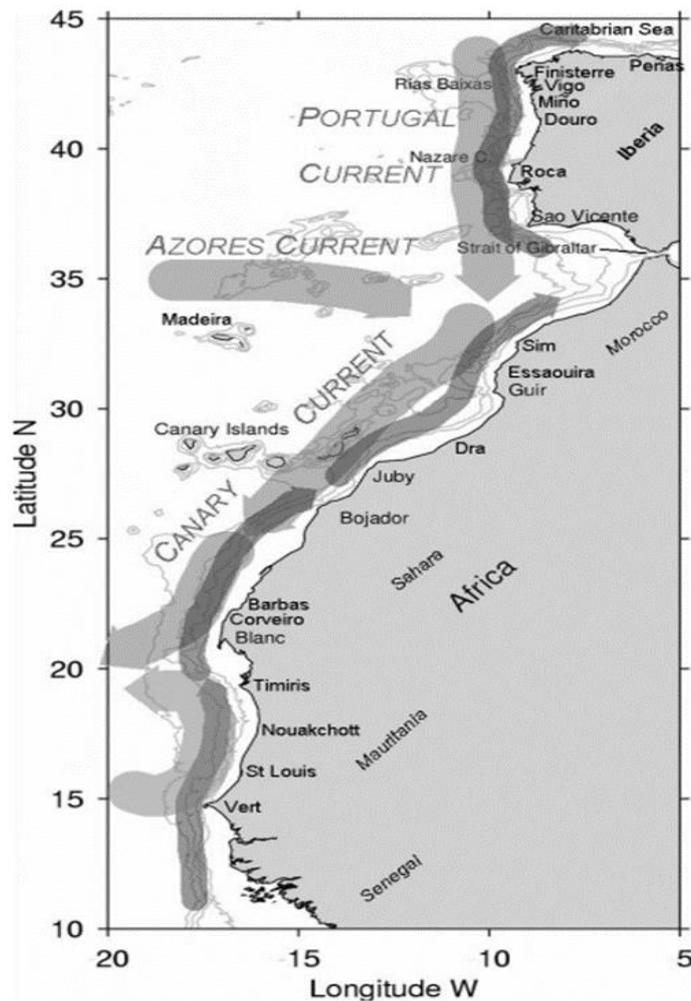


Рисунок 1. Система течений восточного побережья Африки [6]

Несколько исследований, описывающих сезонную изменчивость Канарского течения, подтвердили существование притока воды из открытого океана в прибрежный район апвеллинга к северу от Канарских островов. [6]

Постоянный апвеллинг наблюдается от 19° и 28° с.ш. Обычно южнее апвеллинг возникает только зимой; влияние зимнего сезонного апвеллинга с теплыми муссонами сильно усиливает годовой ход ТПО (Рис.2). Низкие значения ТПО, которые возникают летом между 28° и 32° с.ш., являются результатом апвеллинга в северной части Марокко. Дальше на север, между 32° и 37° с.ш., ориентация в пространстве побережья и наличие Гибралтарского пролива не благоприятствуют апвеллингу. [7,8]

К северу от 37° с.ш. летом у берегов Португалии и Испании существует апвеллинг. В этом регионе зимой он исчезает, за исключением коротких периодов благоприятных ветров. [6]

Поверхностный слой (приблизительно верхние 100 дбар) отличается высокой температурой и соленостью, большим содержанием растворенного кислорода и низкими концентрациями питательных веществ. Зимние температуры постепенно снижаются с широтой и колеблются от 25 °С до 15 °С на южной и северной окраинах Канарской экосистемы; летние значения температуры могут быть существенно выше, превышая 25°С, за исключением прибрежной зоны апвеллинга. Соленость имеет поверхностный максимум около 37,0 промилле примерно на 25° з.д., 25° с.ш. [8]

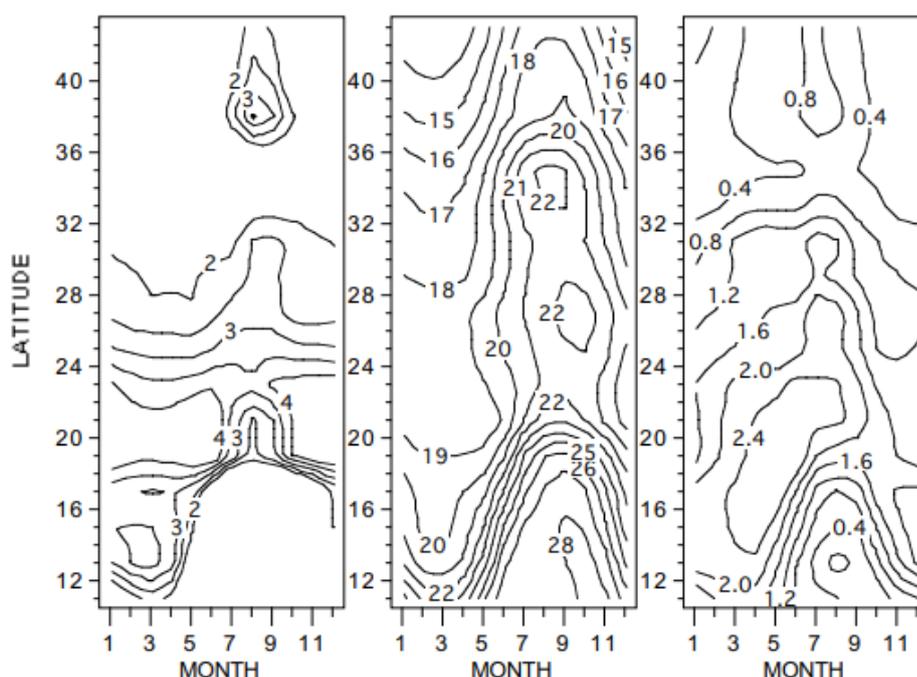


Рисунок. 2 Сезонная изменчивость отклонения ТПО (левый рисунок), ТПО (центр), индекса апвеллинга (правый рисунок) [6]

## 1.2 Рассмотренные промысловые виды рыб

Исходя из базы данных ФАО FishstatJ были выбраны основные вылавливаемые виды рыб за последние 21 год, такие как скумбрия японская, анчоус европейский, сардина европейская, сардинелла круглая и другие сардины. Позже для удобства расчетов уловы всех видов сардинелл будут суммированы, так как по отдельности они очень малы по сравнению с другими исследуемыми видами.

Сардина (Сардина пилчардус) встречается главным образом у Марокко, сардинелла (Сардинелла ауритаиС) южнее Мавритании и Сенегала. Вместе со ставридой они представляют собой преобладающие пелагические виды рыб. За последние десятилетия наблюдались резкие колебания численности сардин, сардинелл, а также других пелагических видов, которые были связаны с изменениями окружающей среды. Существует гипотеза, о том, что ускорение пассатов увеличивает наземный перенос на море и на юг, увеличивает скорость первичной продукции по сравнению с вторичной и, следовательно, благоприятствует питанию фитопланктона. Изменения миграционных тенденций, расширение запасов, неблагоприятная среда в традиционных промысловых зонах, влияющая на миграцию рыб, а также смещение центра тяжести популяции сардин к югу из-за климатических изменений были механизмами, которые были предложены для объяснения изменения, наблюдаемые в традиционном марокканском промысле сардин. Сардинеллы (ауритаи, Мадеренсис) в основном эксплуатируются рыболовством у берегов Сенегала. Акустические исследования, проведенные в Канарском течении, показали, что сардинеллы были очень многочисленны, особенно у берегов Мавритании, их биомасса в 1992 году оценивалась примерно в 4 миллиона тонн (FAO 1997a). Два вида сардинеллы умеренно вылавливались до 1992 года.[1]

### Скумбрия африканская (*Scomber japonicus*)

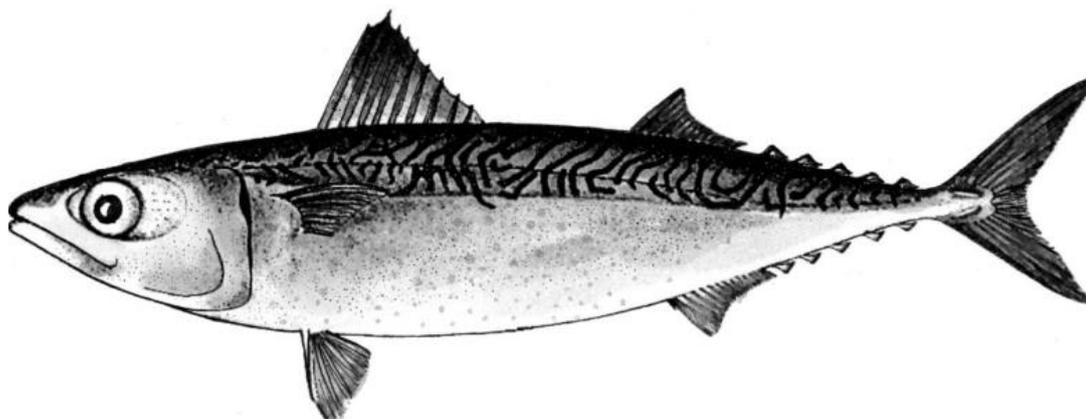


Рисунок.3 Скумбрия африканская (*Scomber japonicus*)

Описание: тело удлинненное сигаровидное. Голова с большими глазами. Два спинных плавника, в переднем плавнике 9-11 колючих лучей. Цвет: серебристо-серый, спинная сторона покрыта темными изломанными вертикальными полосами, брюшная сторона покрыта темными пятнами. Длина тела до 64 см, обычная 30-50 см, масса до 2,9 кг. [9]

### Анчоус европейский, хамса (*Engraulis encrasicolus*)

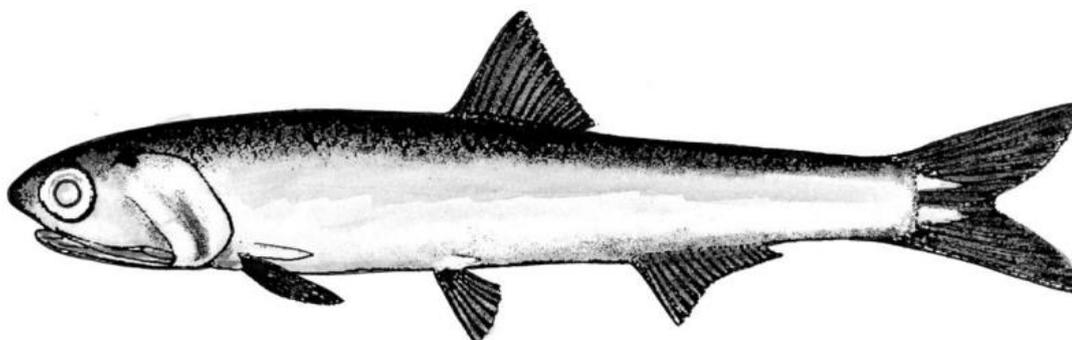


Рисунок.4 Анчоус европейский, хамса (*Engraulis encrasicolus*)

Описание: тело удлиненное. Рот нижний, крупный, заходящий далеко за заднюю вертикаль глаза. Один спинной плавник, в котором 16-18 мягких лучей. Цвет: спинная поверхность темная с зеленоватым отливом. Боковые и брюшная стороны серебристо-белые. Длина тела до 20 см, обычная 9-15 см, масса 0,01-0,02 кг.[9]

Сардина европейская, пилчард (*Sardina pilchardus*)

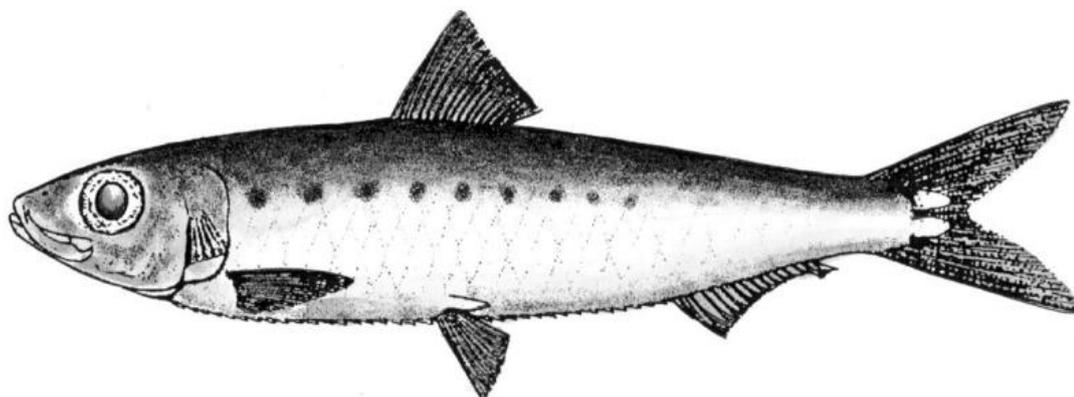


Рисунок.5 Сардина европейская, пилчард (*Sardina pilchardus*)

Описание: жаберная крышка покрыта радиальными бороздками, рот конечный, верхняя челюсть доходит до вертикали переднего края глаза. Один спинной плавник. Цвет: спинная поверхность темная с зеленоватым отливом. Позади верхней части жаберной крышки имеется ряд темных пятен. Боковые и брюшная стороны серебристо-белые. Длина тела до 27 см, обычная 15-22 см, масса до 0,2 кг.[9]

Сардинелла круглая, алаша (*Sardinella aurita*)

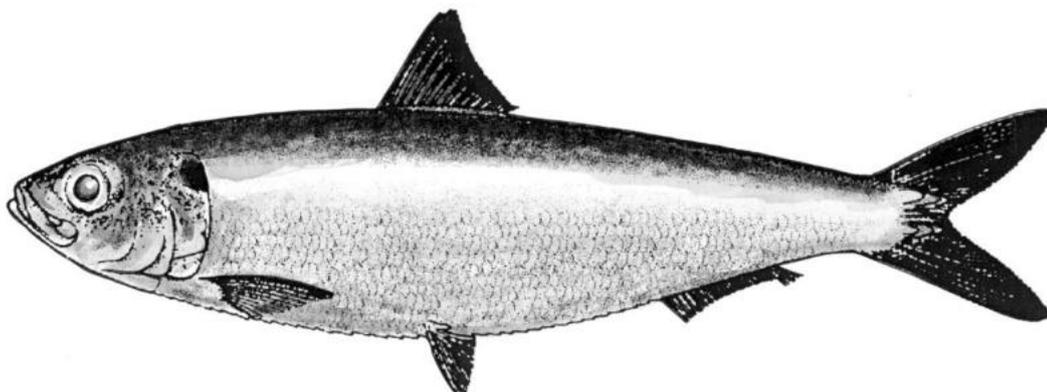


Рисунок.6 Сардинелла круглая, алаша (*Sardinella aurita*)

Описание: тело удлинненное, в сечении округлое, рот конечный, верхняя челюсть доходит до вертикали переднего края глаза. Один спинной плавник. Цвет: спинная поверхность темная с зеленоватым отливом. В верхней задней части жаберной крышки имеется темное пятно. Боковые и брюшная стороны серебристо-белые. Длина тела до 37 см, обычная 20-25 см, масса до 450 г.[9]

## 2 Исходные данные и методы

### 2.1 Исходные данные

Для работы были взяты данные из открытых баз сайта Copernicus Marine Service (CMEMS), а именно:

Среднемесячные концентрации хлорофилла на глубинах до 26 метров с января 2000 года по декабрь 2022 года с разрешением 0,25 на 0,25 градуса сетки. (Global Ocean Biogeochemistry Hindcast)[10]

Среднемесячная температура воды на глубинах до 25 метров с января 2000 года по декабрь 2022 года с разрешением 0,25 на 0,25 градуса сетки. (Multi Observation Global Ocean 3D Temperature Salinity Height Geostrophic Current and MLD)[10]

Среднемесячные ветровые составляющие с января 2000 по декабрь 2022 года. (Global Ocean Monthly Mean Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model)[10]

Данные среднегодовых уловов исследуемых видов (FAO FishstatJ)

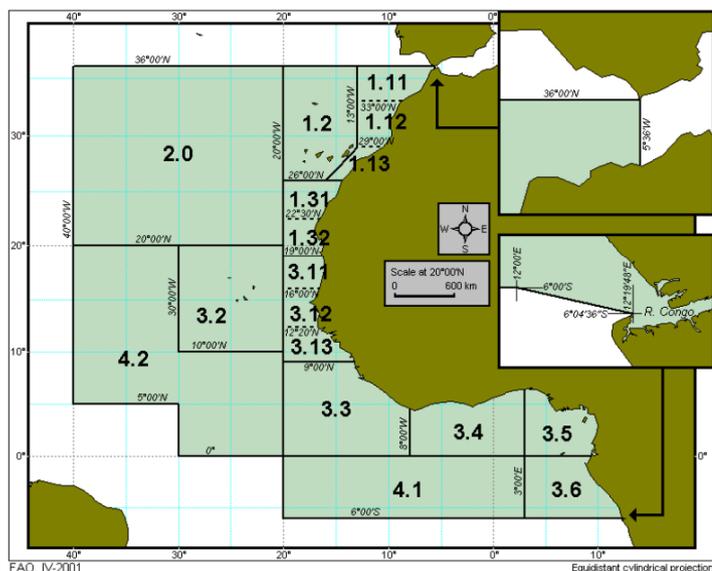


Рисунок 7. Деление восточного побережья Африки на промысловые районы (FAO ATLANTIC, EASTERN CENTRAL Area 34)

Индексы и рассчитанные значения концентрации хлорофилла апвеллинговой зоны у Канарских островов будут анализироваться с уловами Марокканского побережья, так как она попадает в промысловый район Марокко. (Рис.7)

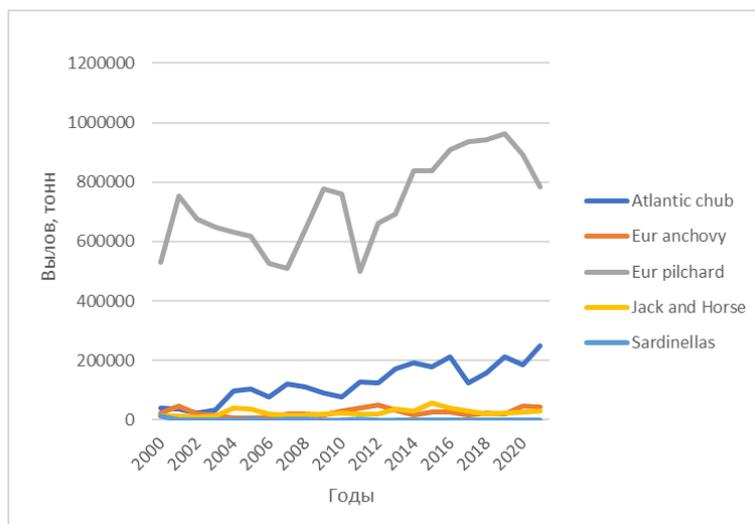


Рисунок 8. График уловов основных промысловых видов рыб для побережья Марокко

Наиболее вылавливаемым видом из представленных у Марокканского побережья является Европейская сардина с минимальными уловами в 498252 тонн в 2011 году до 964140 тонн в 2019 году. Уловы скумбрии за данный период увеличиваются с максимумом в 251048 тонн в 2021 году. Уловы остальных видов не превышают значений в 60000 тонн. Исходя из данных о выловах, зона Марокканского апвеллинга является наиболее продуктивной. (Рис.8)

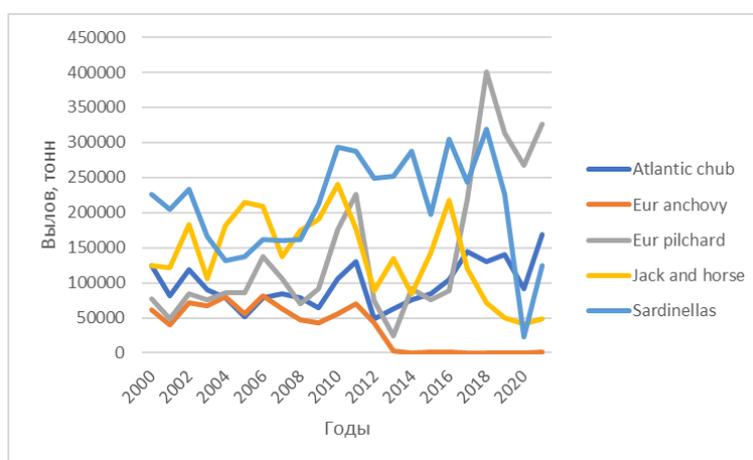


Рисунок 9. График уловов основных промысловых видов рыб для побережья Сахары

Побережье Сахары, имея наибольшие значения концентрации хлорофилла а, не уступает по своей продуктивности зоне Марокканского апвеллинга. Уловы Европейского анчоуса почти прекратились после 2014 года. (Рис.9)

## 2.2 Методы анализа

### 2.2.1 Корреляционный анализ

При анализе гидрометеорологических явлений или процессов очень часто возникает необходимость в установлении связи между ними. Для оценки тесноты и направления связи между изучаемыми переменными пользуются показателем корреляции. Коэффициент корреляции  $r$  характеризует степень тесноты линейной зависимости. Линейная зависимость двух случайных величин заключается в том, что при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать (или убывать) по линейному закону. [11,12]

Коэффициент корреляции может быть рассчитан по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)]}{N\sigma_1\sigma_2}$$

где  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  значения первой и второй переменных соответственно;  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  – средние значения первой и второй переменных соответственно;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – стандартные отклонения первой и второй переменных соответственно;  $N$  – длина рядов первой и второй переменных.

Если необходимо рассчитать коэффициенты корреляции для нескольких переменных (больше двух) во всех сочетаниях друг с другом, то набор получившихся коэффициентов корреляции можно записать в виде матрицы, которая называется корреляционной.[11]

Если связь стохастическая, то рассчитанная величина  $r$  может быть большой или маленькой, что отражает степень связи. Чтобы ее оценить, необходимо выполнить проверку коэффициента корреляции на значимость.

Сформулируем нулевую гипотезу  $H_0: r = 0$ ; альтернативную  $H_1: r \neq 0$ . Для проверки этой гипотезы выбирается критерий Стьюдента, выборочное значение которого рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}, \sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 2}}$$

где  $\sigma_r$  – средняя квадратическая погрешность расчета коэффициента корреляции.

Далее определяется критическое значение  $t_{кр}(\alpha, \nu)$ , где уровень значимости  $\alpha$  принимается равным 5%, а число степеней свободы  $\nu = N - 2$ , где  $N$ -длина ряда.

Сравниваем  $t^*$  с  $t_{кр}$ .

Если  $t^* > t_{кр}$  нулевая гипотеза отвергается, коэффициент корреляции значим, т.е. между двумя переменными существует статистически значимая прямая (или обратная, в зависимости от знака) связь.

Если  $t^* < t_{кр}$  предполагается, что нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, т.е. коэффициент корреляции незначим, т.е. между двумя переменными статистически значимая линейная связь отсутствует.[11]

## 2.2.2 Взаимнокорреляционный анализ

Когда мы рассчитываем коэффициент парной корреляции, мы оцениваем связь параметров при их синхронном взаимодействии, и в большинстве случаев, когда между характеристиками Физические процессы могут протекать синхронно, испытывая колебания параметра одновременно, но чаще всего – асинхронно, когда изменение одного параметра отразится на другом параметре через некоторое время, которое определяется запаздыванием.[11]

Когда мы рассчитываем коэффициент парной корреляции, мы оцениваем связь параметров при их синхронном существовании, асинхронное взаимодействие, коэффициент корреляции мал. В результате мы полностью теряем представление о связи двух характеристик.[11]

Чтобы разрешить эту проблему, т.е. определить наличие связи двух характеристик при асинхронном взаимодействии и применяется взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).[11]

Взаимная корреляция (кросскорреляция) – это корреляция двух статистических рядов друг с другом при разных сдвигах во времени.[11]

Так как ВКФ (в отличие от АКФ) несимметрична, ряд X нужно сдвигать и в другую сторону (назад) на то же количество сдвигов (отрицательное направление сдвигов). Если все коэффициенты взаимной корреляции нанести на график зависимости  $r$  от  $\tau$  (сдвига) и соединить плавной кривой, получим взаимнокорреляционную функцию.[11]

Коэффициент взаимной корреляции  $r(\tau)$  на каждом сдвиге также можно рассчитать по формуле

$$r(\pm\tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y (N - 1 - |\tau|)} \sum_{i=1}^{N-|\tau|} [(x_i - \bar{x})(y_{i\pm\tau} - \bar{y})]$$

где  $N$  – длина реализации;  $\tau$  – сдвиг, который меняется от  $-\tau_{\max}$  до  $\tau_{\max}$ .

Максимальное количество сдвигов  $\tau_{\max}$  (длина ВКФ) зависит от длины ряда  $N$ : если ряд короткий ( $N$  порядка 30-50) –  $\tau_{\max} = N/3$  ;[11]

### 2.2.3 Кластерный анализ

Классификация— это разбиение множества объектов (явлений, процессов и т.п.) на ряд подмножеств (классов, таксонов) по признаку их сходства. Объекты, отнесенные к одному и тому же классу, должны быть

сходны между собой и отличаться от объектов других классов. Поэтому можно считать, что классификация — это средство выделения наиболее важных особенностей, классифицируемых объектов и обобщения, наших представлений о них. [13]

Классификация может быть специальной (целевой) и естественной (универсальной). При целевой классификации признаки, задаются заранее, а число их обычно невелико. Универсальная классификация — это классификация по комплексу различных признаков, причем при изменении набора признаков (частичном или даже полном) она остается неизменной.[13]

Вопрос выбора исходных признаков в значительной степени является субъективным и зависит от цели классификации, наличия априорной информации, ее качества и Других факторов. В случае целевой классификации исходные признаки, как уже указывалось выше, задаются заранее.[13]

Рассмотрим некоторые из метрических мер близости.

Если расстояние между некоторыми объектами  $X_j$  и  $X_{j+1}$  обозначить как  $d(X_j, X_{j+1})$ , то необходимо выполнение следующих условий:

$$d(X_j, X_{j+1}) \geq 0$$

$$d(X_j, X_{j+1}) = 0, \text{ при } X_j = X_{j+1}$$

$$d(X_j, X_{j+1}) = d(X_{j+1}, X_j)$$

$$d(X_j, X_{j+1}) \leq d(X_j, X_c) + d(X_{j+1}, X_c)$$

Последнее выражение говорит о том, что расстояние между исследуемыми признаками всегда наикротчайшее в сравнении с любым другим расстоянием, проходящим через произвольную точку.

$$d(X_j, X_{j+1}) = \left[ \sum_{i=1}^n p_i (x_{ij} - x_{i,j+1})^2 \right]^{1/\varepsilon}$$

Где  $n$  – число исходных признаков,  $p_i$  – вес  $i$ -го признака,  $\varepsilon$  - показатель степени (Может быть любым числом больше нуля). Но, не всегда мы можем взвесить исходные признаки, тогда чтобы не отдавать предпочтения каким-либо из них, обычно принимают  $p_i=1$ . В результате чего имеем евклидову метрику

$$d(X_j, X_{j+1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_{i,j+1})^2}$$

Разные методы кластерного анализа соответствуют различным подходам к созданию групп, и применение различных методов к одним и тем же данным может привести к сильно различающимся результатам. Важно помнить, что выбранный метод должен находиться в согласии с ожидаемым характером классификации, применяемыми признаками и мерой сходства.[14]

В программе STATISTICA реализованы следующие методы кластеризации: иерархический агломеративный (объединительный) метод – joining (tree clustering), итеративный метод k-средних (k-means clustering) и двухходовое объединение (two-way joining).[14]

В данной работе рассматривается метод k-средних. Это итеративный метод, который работает непосредственно с объектами, а не с матрицей сходства. Он отличается тем, что позволяет *заранее* задать число кластеров. Это число определяет сам пользователь, исходя из имеющейся задачи и предсказаний теории. Метод k-средних разобьет все объекты на заданное количество кластеров, которые будут максимально различаться между собой.

В этом методе объект относится к тому классу, расстояние до которого минимально. Расстояние понимается как евклидово расстояние, то есть объекты рассматриваются как точки евклидова пространства. Вначале задается некоторое разбиение данных на кластеры (число кластеров

определяется пользователем) и вычисляются центры тяжести кластеров. Затем происходит перемещение каждой точки в ближайшей к ней кластер. Затем снова вычисляются центры тяжести новых кластеров и процесс повторяется, пока не будет найдена стабильная конфигурация (то есть кластеры перестанут изменяться) или число итераций не превысит заданное пользователем.[14]

Можно сказать, что вычислительная процедура данного метода представляет собой дисперсионный анализ «наоборот». Программа начинает работу с  $k$  случайных кластеров, а затем перемещает объекты из одного кластера в другой с целью (1) минимизировать вариативность (дисперсию) внутри кластера и (2) максимизировать вариативность между кластерами. Это аналогично дисперсионному анализу «наоборот» в том смысле, что в дисперсионном анализе при определении значимости различий в средних значениях групп оценивается межгрупповая дисперсия в сравнении с внутригрупповой дисперсией. В методе  $k$ -средних программа пытается перемещать объекты между группами (кластерами) таким образом, чтобы получить наиболее значимые результаты дисперсионного анализа. Поэтому и результаты этого самого дисперсионного анализа приводятся в разделе результатов применения данного метода.

Кроме числа кластеров, пользователю также необходимо выбрать условие, которое задает начальные центры кластеров. Существует три возможности:

Первая, когда за центр кластера принимается наблюдение или объект, а выбор объектов следует правилу максимизации начальных расстояний между кластерами. В этом случае программа (1) выберет сначала первые  $N$  (число кластеров, заданное вами) наблюдений в качестве центров кластеров; (2) последующие наблюдения заменят выбранные центры кластеров, если наименьшее расстояние от них до любого другого центра кластера больше, чем наименьшее расстояние между кластерами. Такая процедура может привести к выделению кластеров, содержащих одно-единственное наблюдение, особенно, если в данных есть выбросы (outliers). [14]

Вторая, когда расстояния между объектами сначала будут упорядочены, а затем объекты с одинаковыми расстояниями будут выбраны в качестве центров кластеров. [14]

Третья, это когда первые  $N$  (количество кластеров) наблюдений будут выбраны в качестве начальных центров кластеров. Таким образом, это условие дает пользователю возможность контроля выбора начальной конфигурации. Это бывает полезно, если исследователь хочет проверить какие-то начальные предположения о составе кластеров. В этом случае передвиньте те наблюдения, вокруг которых вы хотите сгруппировать все остальные, в начало файла. [14]

### 3 Влияние колебаний климата на производительность промысла на Канарском апвеллинге

#### 3.1 Определение районов апвеллинга

Так как в основном именно апвеллинг является определяющей характеристикой высокой продуктивности района, логично считать, что колебания интенсивности данного явления могут определять количество уловов на исследуемой акватории.

Для выявления наиболее интенсивных зон были взяты среднемесячные данные о вертикальной скорости с сайта Copernicus из базы данных GLOBAL\_ANALYSISFORECAST\_PHY\_001\_024 Product name Global Ocean Physics Analysis and Forecast cmems\_mod\_glo\_phy-wcur\_anfc\_0.083deg\_P1M-m с разрешением  $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$  и максимальным сроком 01/11/2020 по 01/03/2024 для глубин 0,5 м до 109,73 м. Остальные базы данных коперникуса имеющие данные о вертикальных скоростях не имеют данных о прибрежных скоростях в данном регионе.

Проведено осреднение по глубине и рассчитаны среднеклиматические значения для каждого месяца за данный период, а также переведены в размерность метры в сутки.

Для карт вертикальных скоростей были установлены минимальные значения равные 0 так как в работе нас интересуют именно зоны апвеллинга, то есть поднятия вод, а значит только положительные значения вертикальных скоростей.

Исходя из построенных карт мы видим, что наиболее интенсивные зоны выделяются у Канарских островов (май, июнь, июль, август), побережье Сахары (круглый год) и побережье Марокко (май, июнь, июль, август)

Зона у побережья Сахары выделяется своей наибольшей интенсивностью и длительностью, а также площадью особенно в весенне-летнее время.

Так же можно заметить, что выделяемые зоны практически неизменны в пространстве, лишь в зависимости от сезона меняются площади и интенсивность изменения характеристик.

Для работы были взяты данные из открытых баз сайта Copernicus Marine Service (CMEMS), а именно; Концентрация хлорофилла на глубинах до 26 метров за период с января 2000г. по декабрь 2021 года (Global Ocean Biogeochemistry Hindcast). Выбор слоя для хлорофилла обусловлен тем, что именно до глубины 26 метров (рис.10) наблюдается явная изменчивость характеристики и ее максимальные значения.[15]

Для выявления зон с максимальной изменчивостью исследуемых характеристик были рассчитаны среднеквадратические отклонения от среднего значения и построены карты для климатических месяцев с января по декабрь для хлорофилла и вертикальной скорости подъема воды.

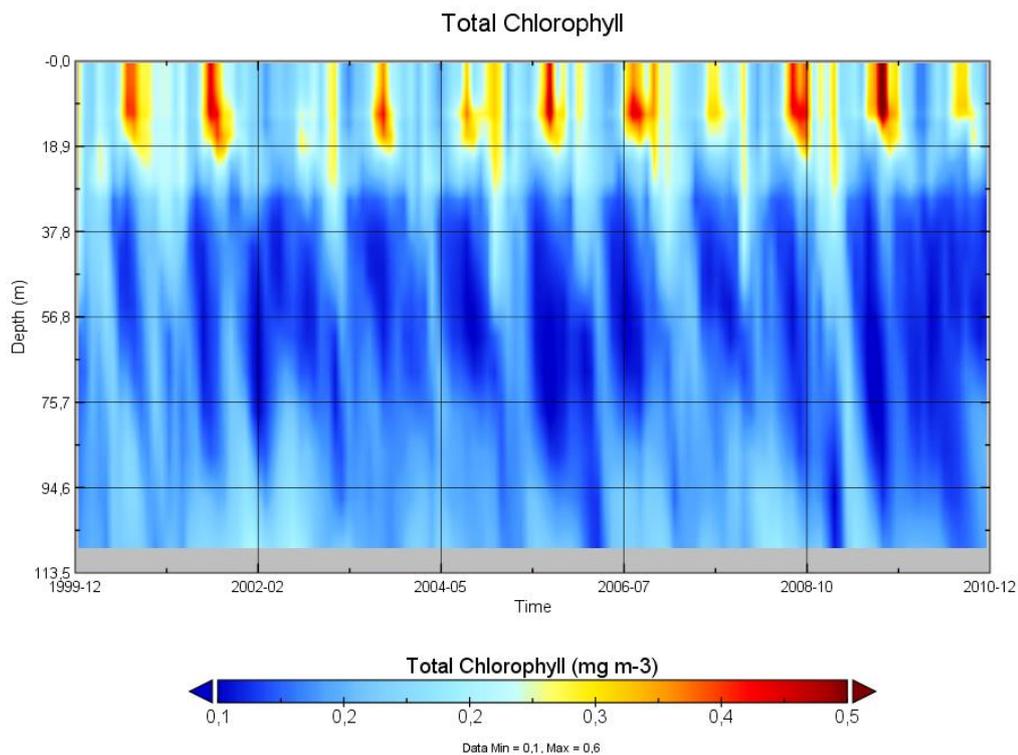


Рисунок 10. Распределение хлорофилла с глубиной в точке 23,0 °с.ш. с 12.1999 по 12.2010. (С осреднением по широте)

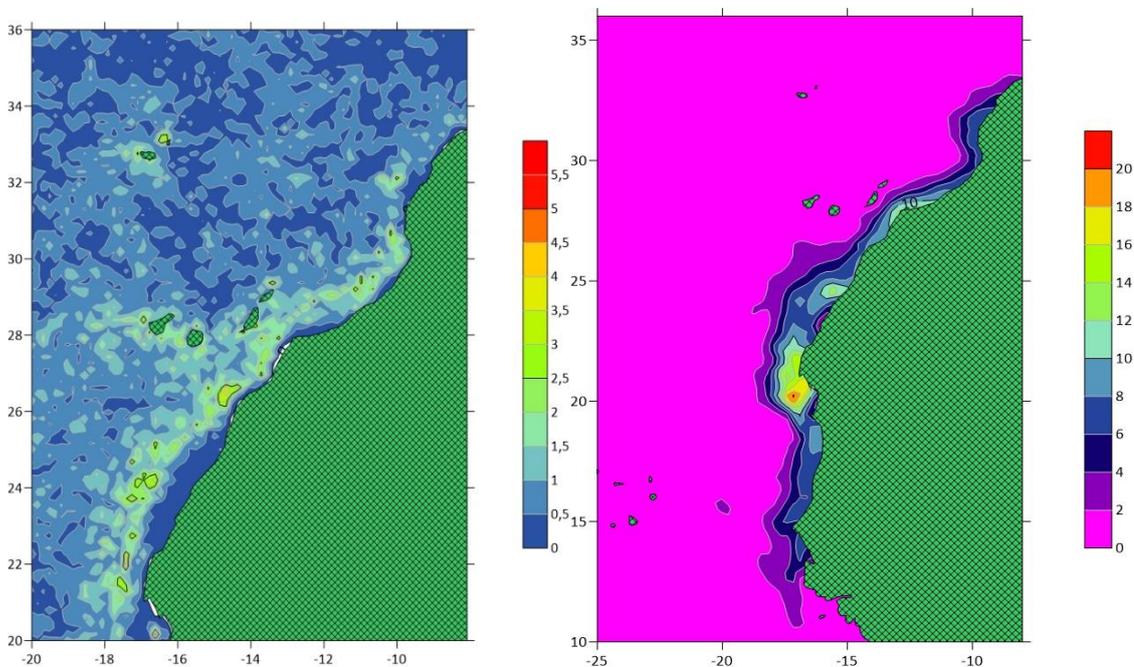


Рисунок 11. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического января

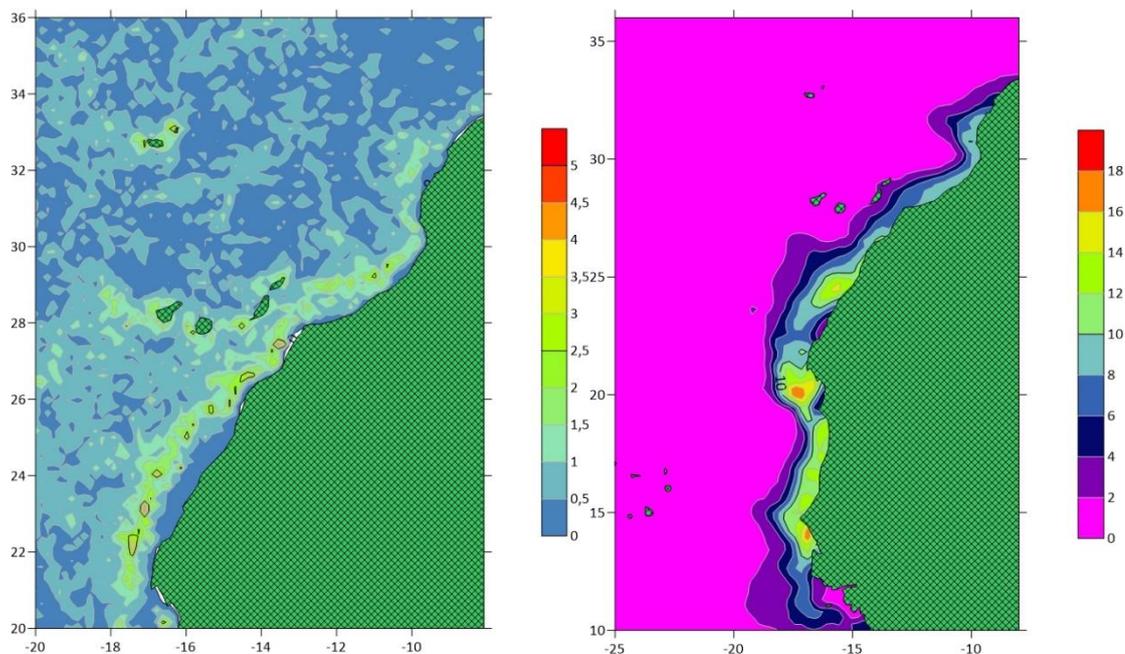


Рисунок 12. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического февраля

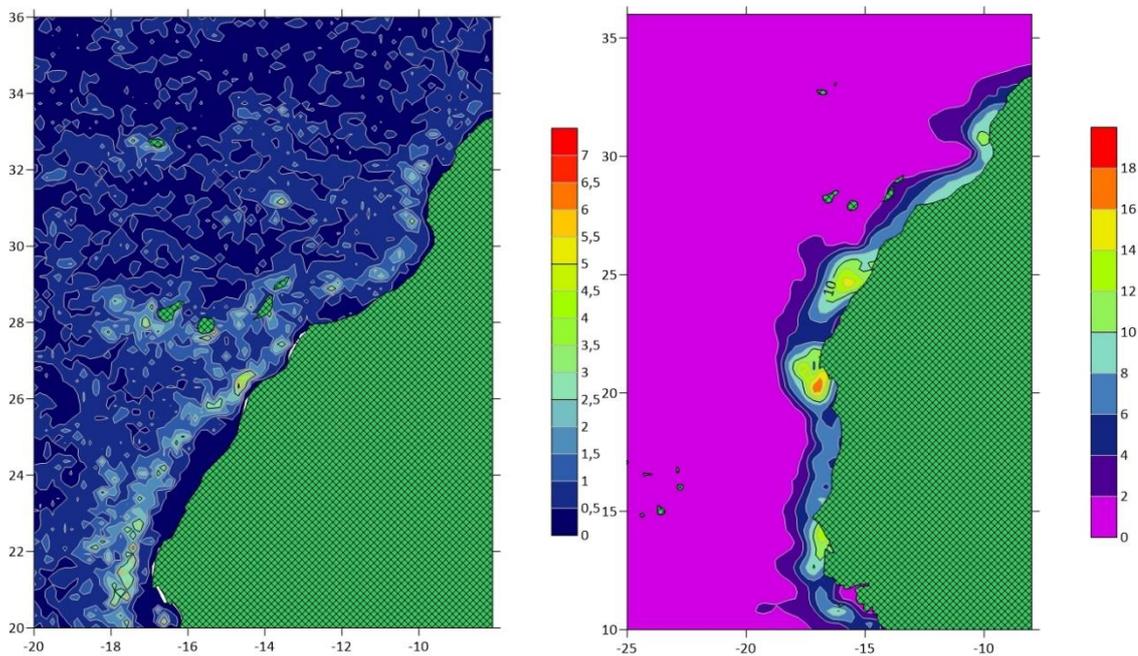


Рисунок 13. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического марта

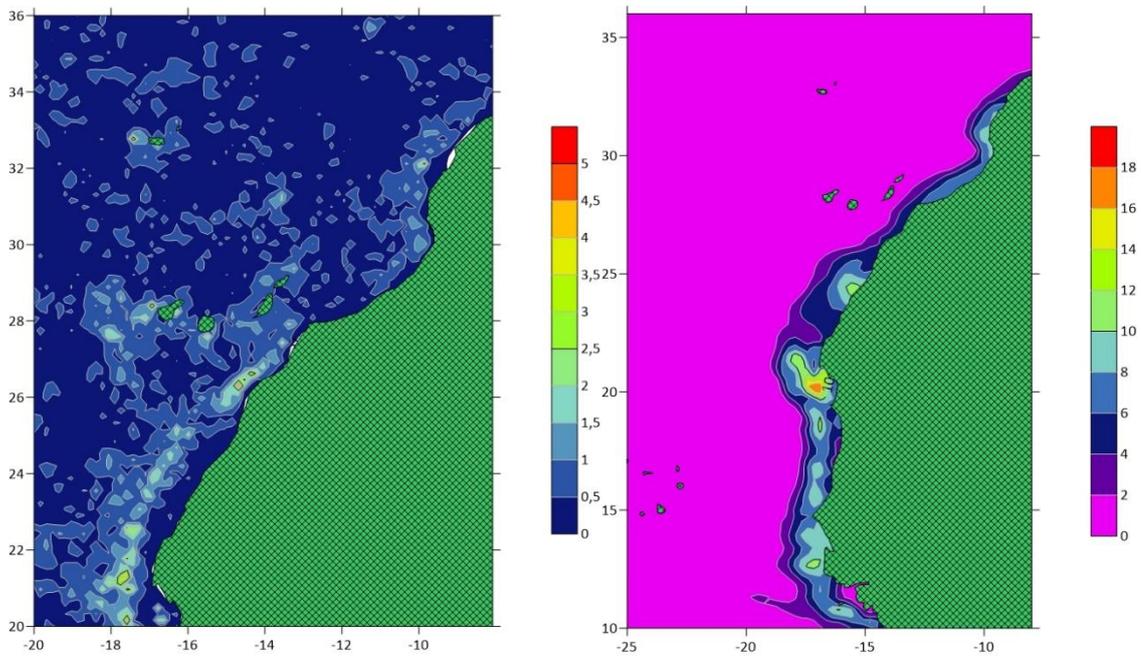


Рисунок 14. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического апреля

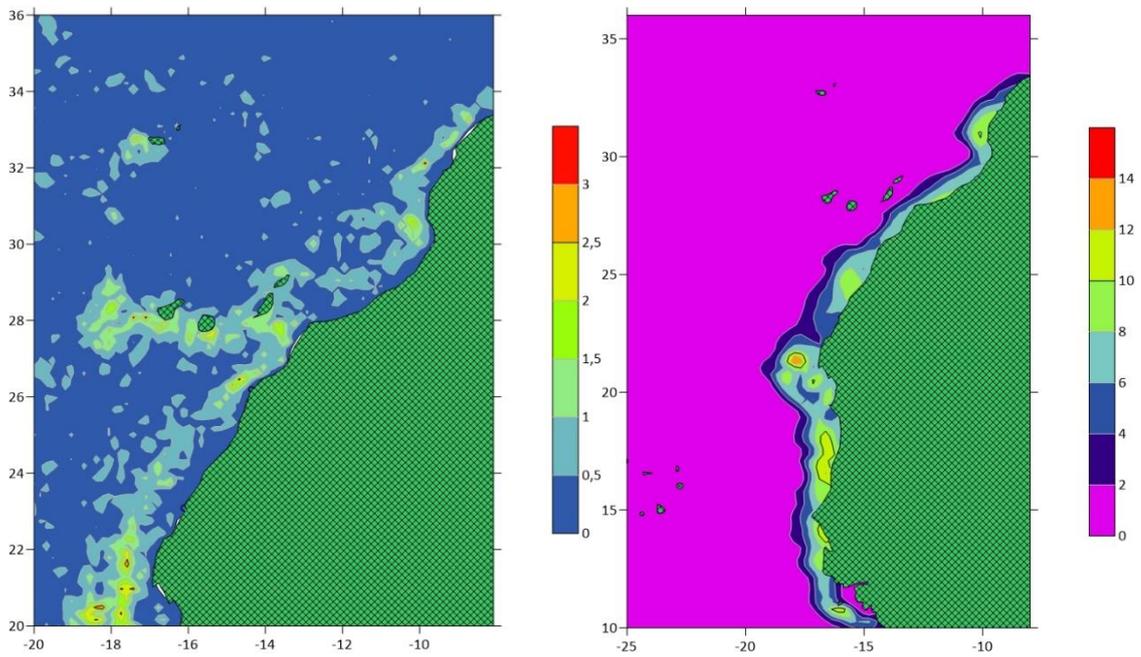


Рисунок 15. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического мая

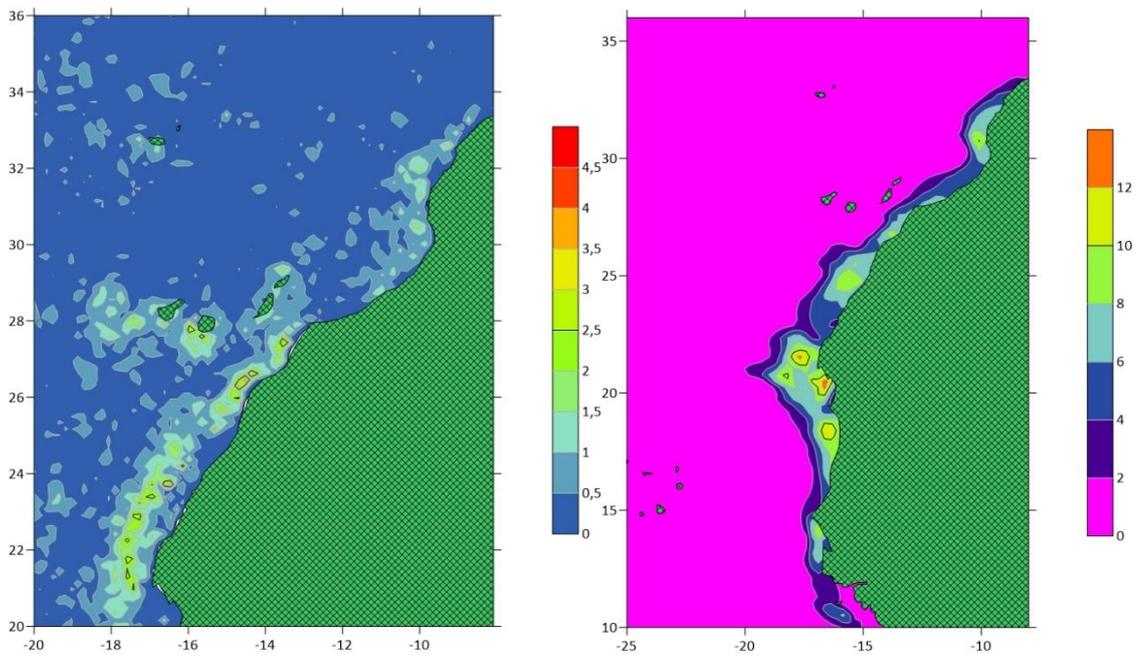


Рисунок 16. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического июня

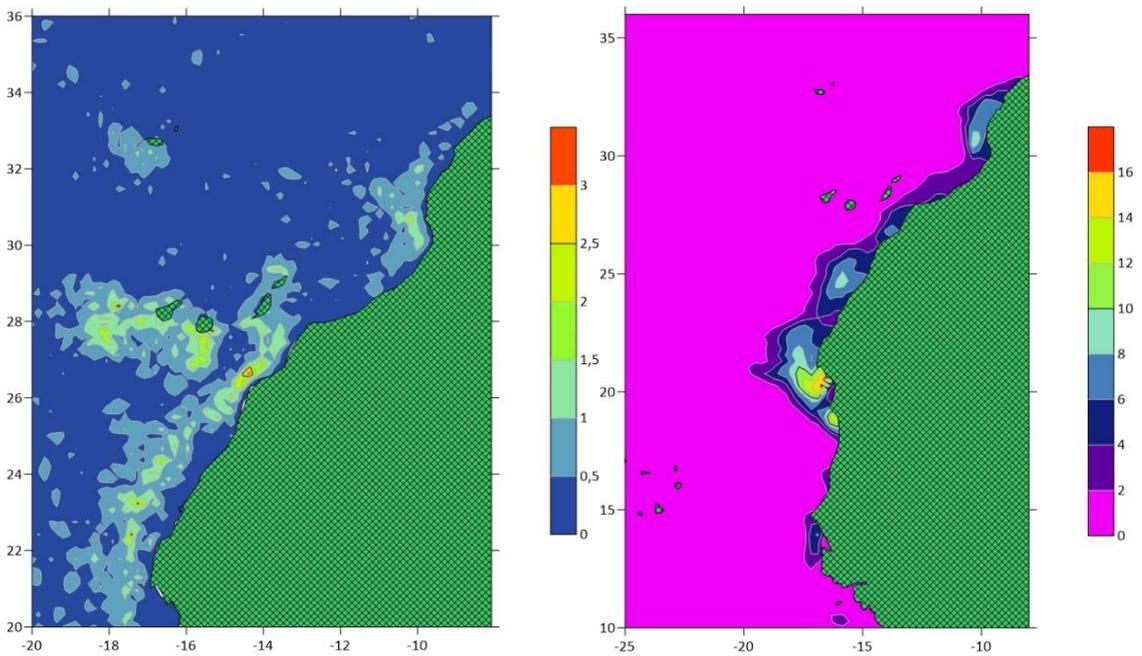


Рисунок 17. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического июля

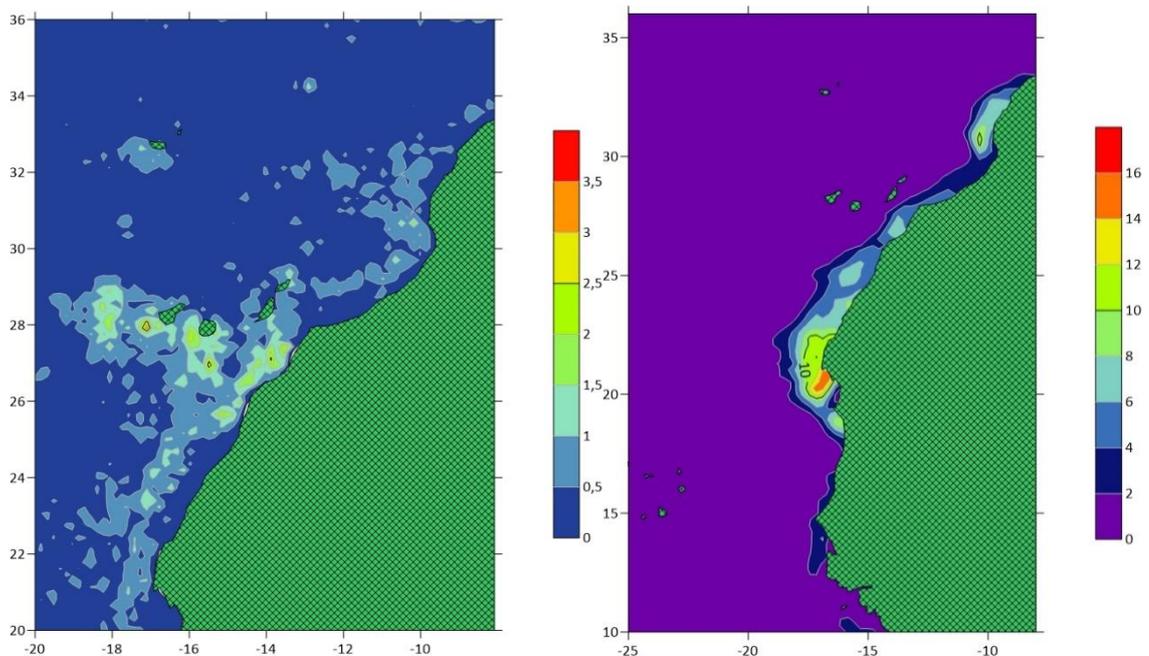


Рисунок 18. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического августа

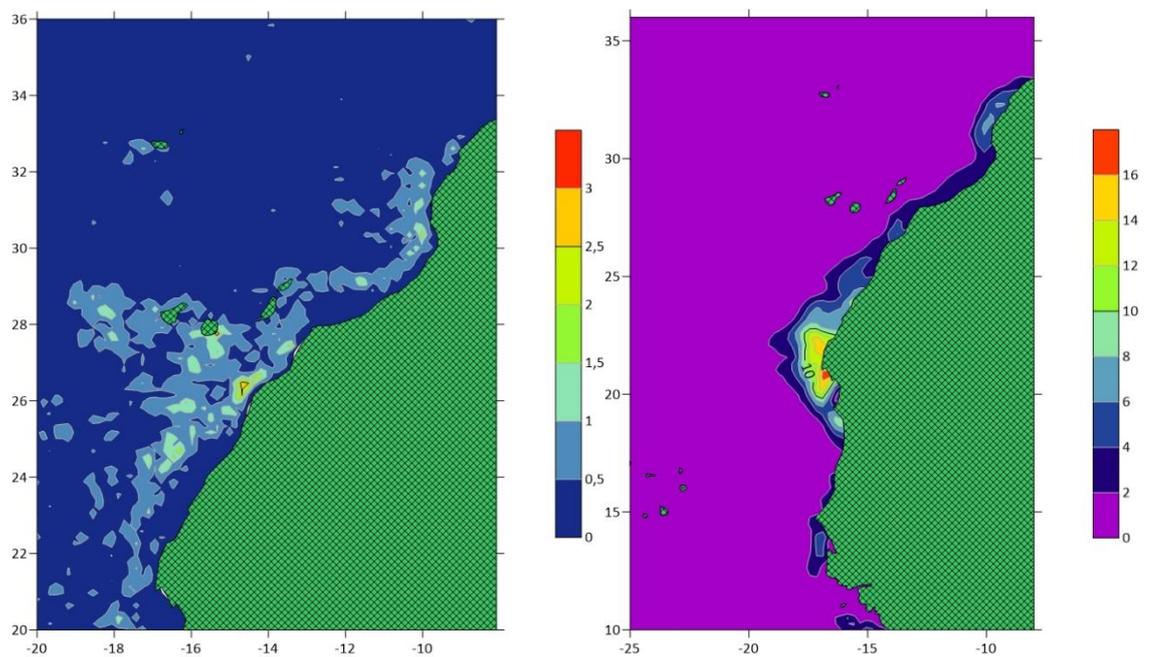


Рисунок 19. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического сентября

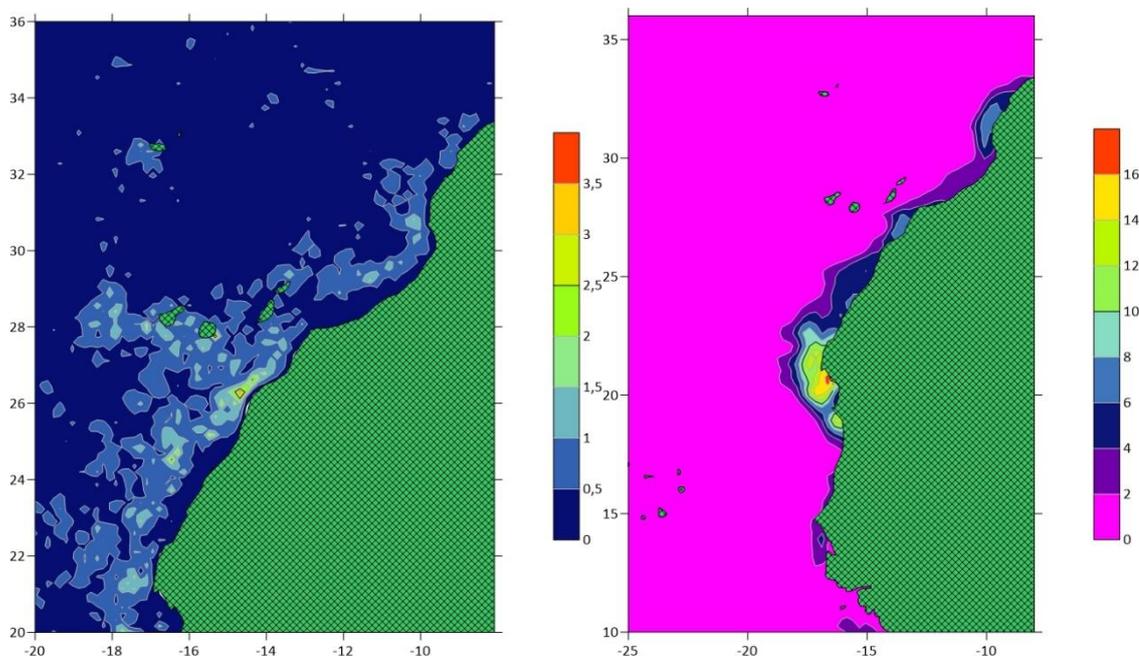


Рисунок 20. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического октября

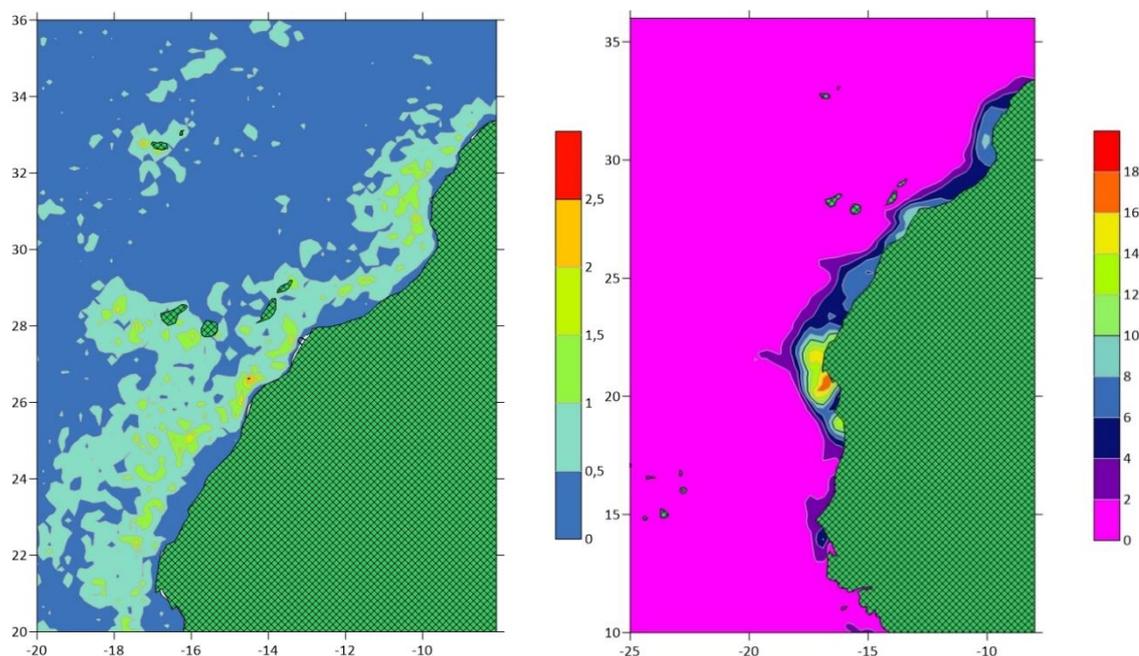


Рисунок 21. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического ноября

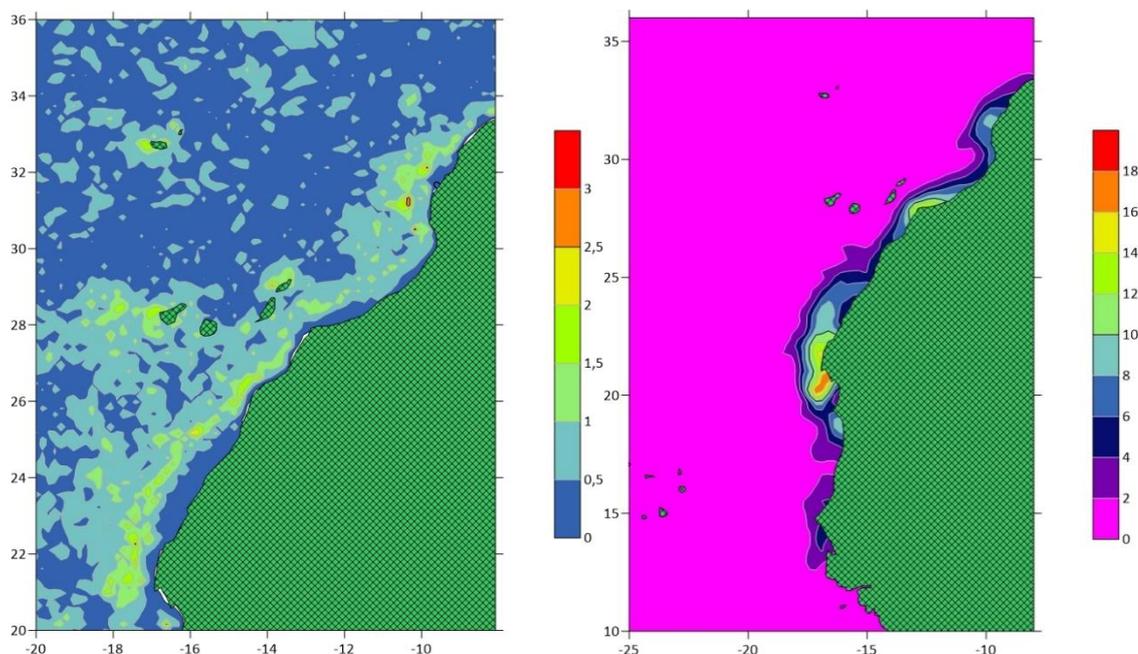


Рисунок 22. Среднеквадратичные отклонения вертикальной скорости (слева) и хлорофилла (справа) для климатического декабря

Исходя из построенных карт (рис 11-22) можно выделить 3 основных района круглогодичного апвеллинга, а именно побережье Сахары ( $19^{\circ}$ - $24^{\circ}$  с.ш.), побережье Марокко ( $30^{\circ}$ - $32^{\circ}$  с.ш.) и Африканское побережье близ Канарских островов ( $27^{\circ}$ - $29^{\circ}$  с.ш.). Эти данные позволят точнее рассчитать индексы апвеллинга в предстоящей работе и в полном объеме отразить временную изменчивость промысловых видов рыб.

Аналогичную картину можно наблюдать у П. Чернышкова в своей работе (Чернышков, 2006) разделяет апвеллинг по характеру внутригодовой изменчивости на три зоны: зону сезонного апвеллинга (между  $10$  и  $20^{\circ}$  с.ш.), зону интенсивного круглогодичного апвеллинга (между  $20$  и  $26^{\circ}$  с.ш.) и зону умеренного круглогодичного апвеллинга с выраженной сезонностью (между  $26$  и  $32^{\circ}$  с.ш.). Другие авторы (Малинин и др., 2002) разбивают области Канарского апвеллинга на три квазиоднородных района: северный ( $25$ – $27^{\circ}$  с.ш.), центральный ( $21$ – $23^{\circ}$  с.ш.) и южный ( $15$ – $19^{\circ}$  с.ш.).[4,5]

### 3.2 Расчет индексов апвеллинга

Так как данные об уловах исследуемых видов имеют спорную репрезентативность и предоставлены только для целого года, расчеты индексов и других гидрометеорологических характеристик для выбранных с помощью карт районов круглогодичных апвеллингов приводились осреднением к одной точке с максимальной интенсивностью.

Так были рассчитаны упрощенные температурные апвеллинговые индексы (TUI) для 3 выбранных районов (Побережье Марокко 30-32 с.ш.; Район Канарских островов 26-28с.ш.; побережье Сахары 20-22 с.ш.) по формуле:

$$TUI = T_{up} - T_{off}$$

Где  $T_{up}$  - температура в зоне апвеллинга,  $T_{off}$  - температура в оффшорной (удаленной) зоне о апвеллинга. Предполагается что температура в зоне апвеллинга зачастую ниже нежели в удаленной мористой части исследуемого района. Для удобства выделения компонентов  $T_{up}$  и  $T_{off}$ , были построены разрезы для каждого из 3 районов на широтах проходящих через точки с максимальной изменчивостью характеристик.

Для определения индекса апвеллинга с помощью температуры, для выбранных районов апвеллинга были построены разрезы по осредненным среднемесячным значениям SST в градусах Цельсия за период 2000-2021 гг. (Рис.23)

Длина каждого из разрезов составляет  $2^\circ$  широты, и этого более чем достаточно для выявления оффшорной и центральной областей апвеллинга. Значения для расчетов индексов взяты в точках:  $19^\circ$  и  $17^\circ$  з.д. на параллели  $20,66^\circ$  N для Сахарской зоны апвеллинга (Рис.24);  $13,5^\circ$  и  $15,5^\circ$  з.д. на

параллели 27,0 N для апвеллиноговой зоны у Канарских островов (Рис.25); 10,0° и 12,0° з.д. на параллели 31,16 N для Марокканской зоны апвеллинга. (Рис.26)

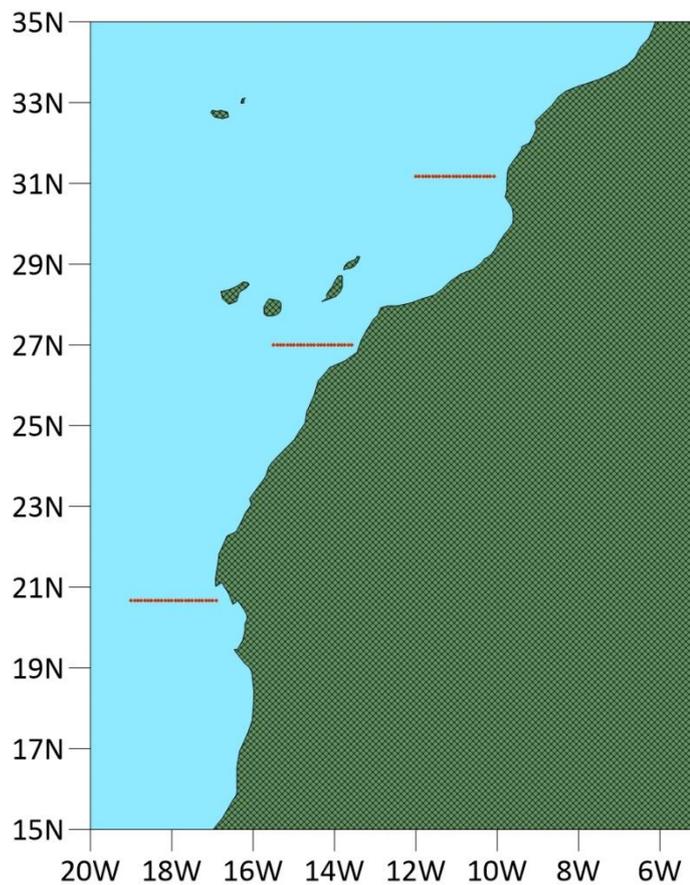


Рисунок 23. Расположение температурных разрезов для каждого района апвеллинга на карте

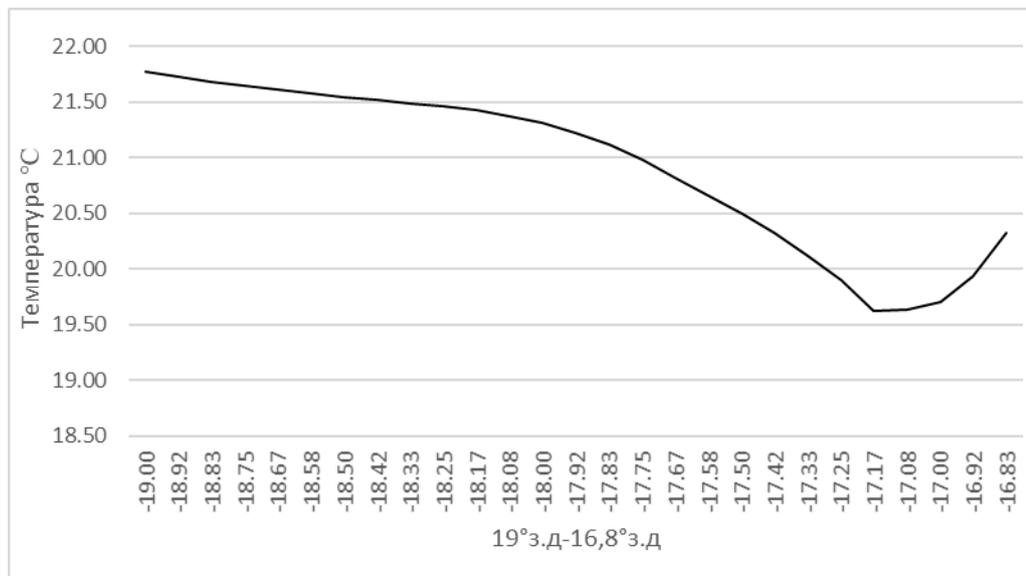


Рисунок 24. Разрез среднемесячных полей SST в градусах Цельсия за период 2000-2021 гг. для 20,66°с.ш.

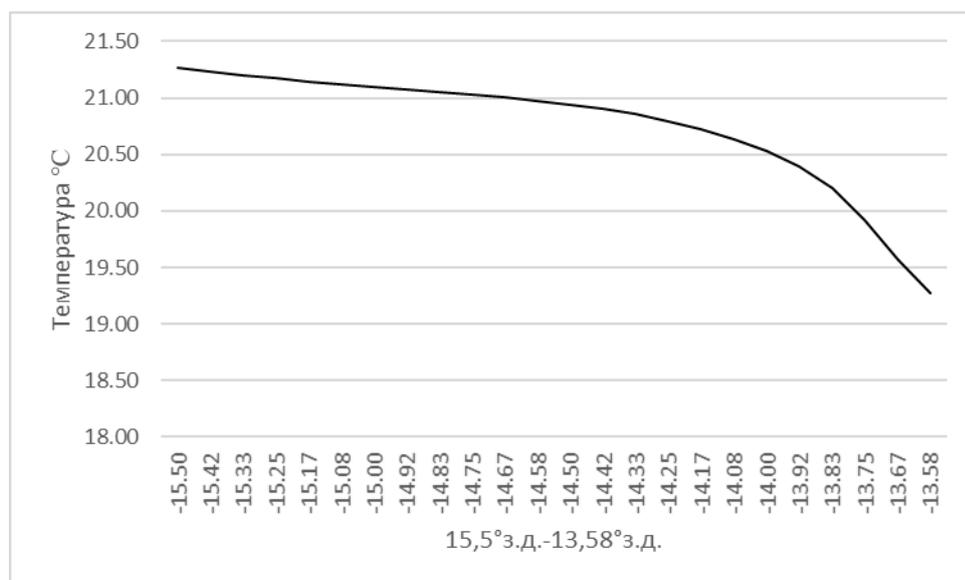


Рисунок 25. Разрез среднемесячных полей SST в градусах Цельсия за период 2000-2021 гг. для 27°с.ш.

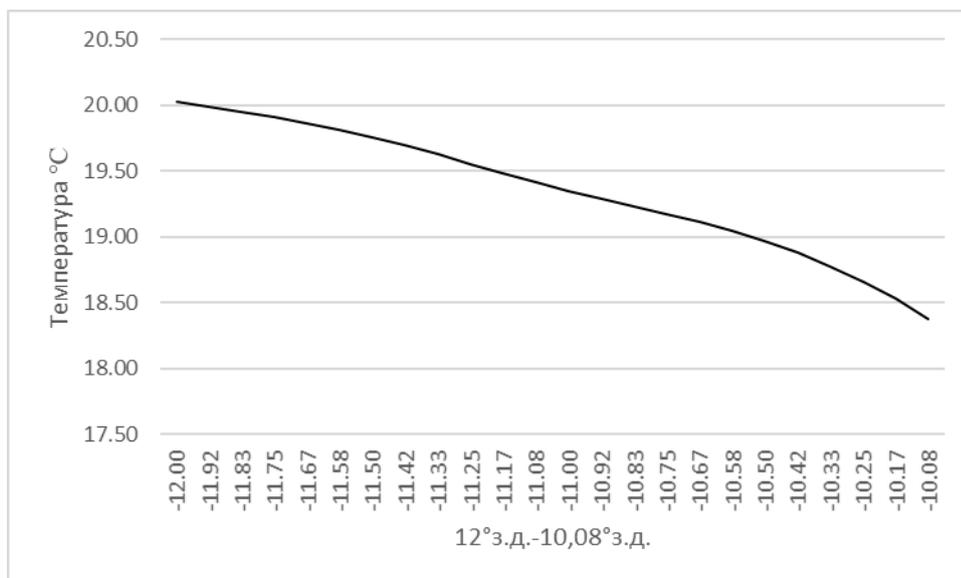


Рисунок 26. Разрез среднемесячных полей SST в градусах Цельсия за период 2000-2021 гг. для 31,16°с.ш.

Еще одной характеристикой, влияющей на интенсивность и образования апвеллингов является ветер. Экмановский индекс апвеллинга (EUI) рассчитывается с помощью экмановского транспорта ( $Q$ ) создаваемого касательным напряжением трения ветра, вида береговой линии, и параметра Кориолиса. [16]

$$EUI = -Q_x \cdot \sin(\varphi) + Q_y \cdot \cos(\varphi)$$

Где  $Q_x$  и  $Q_y$  – зональная и меридиональная компоненты экмановского транспорта,  $\varphi$  – угол наклона береговой линии к горизонтали ( $50^\circ$  для северо-восточного побережья Африки). Положительные значения EUI свидетельствуют о благоприятных условиях апвеллинга, отрицательные – для даунвеллинга.

Помимо рассмотренного выше экмановского переноса, по которому был построен EUI, ветровой апвеллинг может развиваться и за счёт экмановской накачки, связанной с положительной завихренностью поля напряжения трения ветра. Экмановская накачка приводит к дивергенции водной

поверхности, тем самым увеличивая вертикальную составляющую скорости течений, что приводит к усилению апвеллинга. [serebrennikov]

Скорость экмановской накачки  $W_E$  (скорость подъёма воды при положительном значении) можно вычислить из компонентов экмановского транспорта по следующей формуле:

$$-W_E = \frac{d(Q_x)}{dx} + \frac{d(Q_y)}{dy}$$

Были рассчитаны среднемесячные индексы и скорость экмановской накачки за период с января 2000 года до января 2023 года.

### 3.3 Корреляционные матрицы уловов и характеристик апвеллинга

Корреляционный анализ проводился для рядов уловов как отдельных видов рыб, так их суммы, а также для всех рассчитанных характеристик апвеллинга, таких как: термический апвеллинговый индекс (TUI), суммарные концентрации хлорофилла, Экмановский апвеллинговый индекс (EUI) и скорости экмановской накачки ( $W_E$ ). Результаты представлены в виде корреляционных матриц, все коэффициенты корреляции были проверены на значимость и отмечены в таблице зеленым цветом. Так как выявление взаимосвязи между уловами промысловых видов рыб не ставилась задачей данной работы, нас интересуют значимые коэффициенты корреляции между уловами и выбранными характеристиками апвеллинга. Они представлены областью в нижней части таблицы и выделены персиковым цветом.

Для апвеллинговой зоны Марокко выделяются значимые связи между уловами Африканской скумбрии и трех характеристик, таких как TUI, концентрации хлорофилла и EUI. Во всех случаях характер связи является прямым (TUI брался как разница температур между апвеллинговой и оффшорной зоной и имеет отрицательные значения). Похожая картина наблюдается для Европейской сардины, ее уловы коррелируют с концентрацией хлорофилла и TUI. Остальные виды, ввиду малых значений

уловов (Рис.8) видимо не отражают полной динамики взаимосвязей между характеристиками апвеллинга. Суммарные уловы аналогично уловам Европейской сардины и африканской скумбрии имеют связь с концентрацией хлорофилла и TUI (Таблица 1).

Таблица 1. Корреляционная матрица среднегодовых значений уловов по видам и характеристик апвеллинга для побережья Марокко

	<i>atlantic chub</i>	<i>eur anch</i>	<i>eur pilch</i>	<i>jack and horse</i>	<i>sardinellas</i>	Общие уловы	TUI	хлор	EUI	$W_E$
atlantic chub	1.00									
eur anch	0.25	1.00								
eur pilch	0.57	0.15	1.00							
jack and horse	0.58	-0.11	0.31	1.00						
sardinellas	-0.35	-0.12	-0.46	-0.25	1.00					
Общие уловы	0.79	0.25	0.95	0.47	-0.46	1.00				
tui	-0.70	-0.11	-0.55	-0.14	0.27	-0.65	1.00			
хлор	0.79	0.33	0.45	0.25	-0.25	0.62	-0.75	1.00		
EUI	0.49	0.33	0.28	0.10	-0.10	0.39	-0.60	0.73	1.00	
W	0.29	-0.12	0.10	0.25	0.08	0.18	-0.39	0.38	0.58	1.00

Для апвеллинговой зоны у Канарских островов выделяются значимые коэффициенты корреляции суммарных уловов и уловов Африканской скумбрии со всеми характеристиками апвеллинга. Уловы Европейского анчоуса коррелируют с EUI. Для Европейской сардины существует связь с TUI, концентрацией хлорофилла и скоростью Экмановской накачки. Уловы Японской ставриды связаны с концентрацией хлорофилла и  $W_E$ . Характер связи между уловами и характеристиками апвеллинга прямой. Так же значимыми коэффициентами корреляции на данной акватории связаны все характеристики. (Таблица 2)

Таблица 2. Корреляционная матрица среднегодовых значений уловов по видам и характеристикам апвеллинга для Канарских островов

	<i>atlantic chub</i>	<i>eur anch</i>	<i>eur pilch</i>	<i>jack and horse</i>	<i>sardinellas</i>	Общие уловы	TUI	хлор	EUI	W <sub>E</sub>
atlantic chub	1									
eur anch	0.252383	1								
eur pilch	0.569818	0.154735	1							
jack and horse	0.575844	-0.10535	0.314393	1						
sardinellas	-0.35032	-0.11947	-0.45719	-0.24985	1					
Общие уловы	0.79162	0.253977	0.950258	0.467167	-0.46069	1				
tui	-0.73183	-0.14634	-0.58864	-0.36689	0.268471	-0.70138	1			
хлор	0.771039	0.279097	0.627489	0.417614	-0.29742	0.754119	-0.7294	1		
EUI	0.503092	0.519208	0.37053	0.003856	0.089426	0.473826	-0.57444	0.617261	1	
W	0.76307	0.069435	0.59441	0.529318	-0.28166	0.719933	-0.7782	0.742146	0.57406	1

На акватории Сахарского побережья значимые связи с TUI выделяются только для Африканской скумбрии и Европейской сардины. Примечательно что в данном случае характер связи обратный. Уловы Японской ставриды коррелируют с концентрацией хлорофилла и EUI. Характер связи обратный. (Таблица 3)

Таблица 3. Корреляционная матрица среднегодовых значений уловов по видам и характеристикам апвеллинга для побережья Сахары

	<i>atlantic chub</i>	<i>eur anch</i>	<i>eur pilch</i>	<i>jack and horse</i>	<i>sardinellas</i>	Общие уловы	TUI	хлор	EUI	W <sub>E</sub>
atlantic chub	1.00									
eur anch	-0.28	1.00								
eur pilch	0.72	-0.41	1.00							
jack and horse	-0.33	0.57	-0.50	1.00						
sardinellas	0.17	-0.16	0.02	0.20	1.00					
Общие уловы	0.65	0.02	0.61	0.21	0.61	1.00				
tui	0.46	-0.14	0.40	-0.13	-0.16	0.23	1.00			
хлор	0.31	-0.22	0.16	-0.46	0.12	0.00	0.22	1.00		
EUI	0.27	-0.18	0.06	-0.40	0.17	-0.02	-0.10	0.53	1.00	
W	-0.33	-0.09	-0.15	-0.35	-0.37	-0.55	-0.48	-0.30	0.23	1.00

### 3.4 Взаимнокорреляционные функции характеристик интенсивности апвеллинга

Для выявления связей между выбранными характеристиками апвеллинга при асинхронном взаимодействии были построены взаимнокорреляционные функции (ВКФ) для каждой из исследуемых зон. Так как функция строилась по среднемесячным данным с января 2000 года по декабрь 2022 года, был принят сдвиг ВКФ равный трем месяцам.

#### *Апвеллинговая зона Марокко*

Выявлена асинхронная связь между  $W_E$  и  $EUI$  со значимыми коэффициентами корреляции на сдвиге 3 в отрицательном направлении и 1 в положительном. (рис.27) Наибольшая корреляция наблюдается на 0 сдвиге. Вероятно, это связано с тем, что обе эти характеристики рассчитываются из данных о компонентах экманоского транспорта.

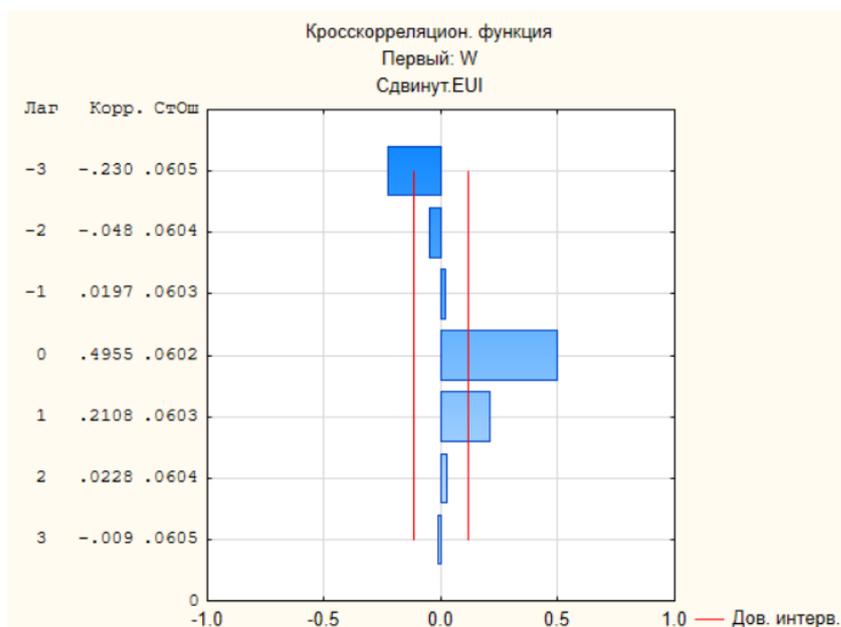


Рисунок 27. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и Экмановского индекса апвеллинга

Асинхронная связь на границе доверительных интервалов наблюдается для характеристик апвеллинга  $W_E$  и TUI. (Рис.28) Все значимые коэффициенты приходятся на отрицательный сдвиг, что может говорить нам о запаздывании изменения TUI относительно  $W_E$ . Это логично, ведь с падением скорости подъема вод, уменьшается и термический апвеллинговый индекс (прим. TUI величина с отрицательным значением). Наибольший коэффициент корреляции наблюдается на нулевом сдвиге, можно предполагать, что это связано с масштабом такого явления как апвеллинг, месячные данные плохо отражают изменчивость в таких масштабах.

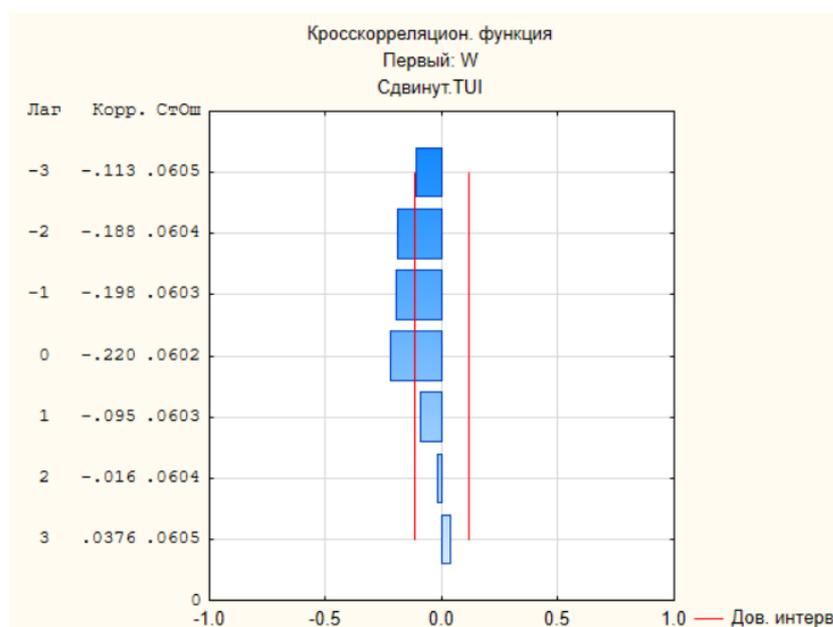


Рисунок 28. Взаимнокорреляционная функция Эрмановской накачки и Термического индекса апвеллинга

Картина для  $W_E$  и концентрации хлорофилла аналогична представленной выше ситуации для зависимости эрмановской накачки и TUI. Значимые коэффициенты наблюдаются на первом и втором отрицательном сдвиге. С падением интенсивности поднятия вод падает концентрация хлорофилла. (Рис.29)

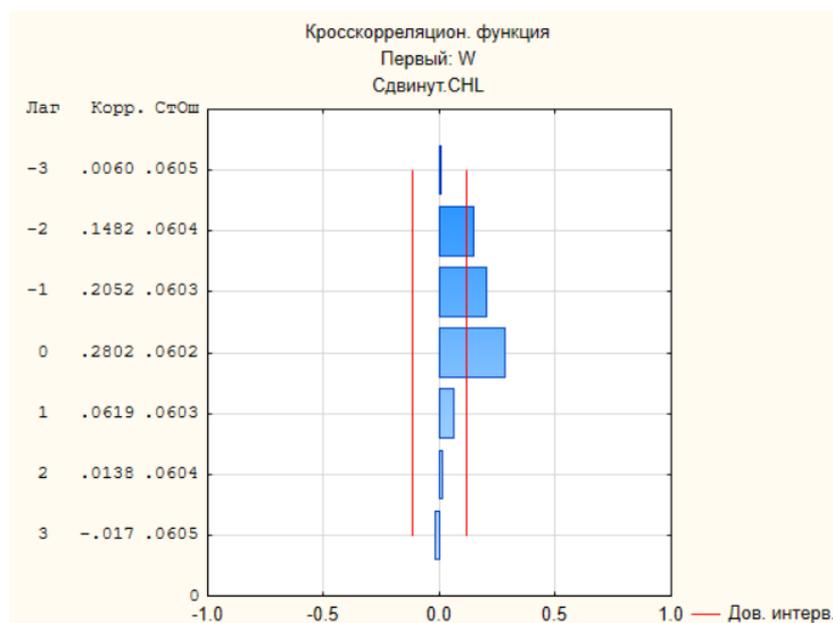


Рисунок 29. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и концентрации хлорофилла

Взаимнокорреляционная функция EUI с TUI не имеет незначимых коэффициентов корреляции. Наибольшие их значения приходятся на второй и третий отрицательные сдвиги. Связь асинхронная. TUI опережает EUI на три месяца. (Рис.30)

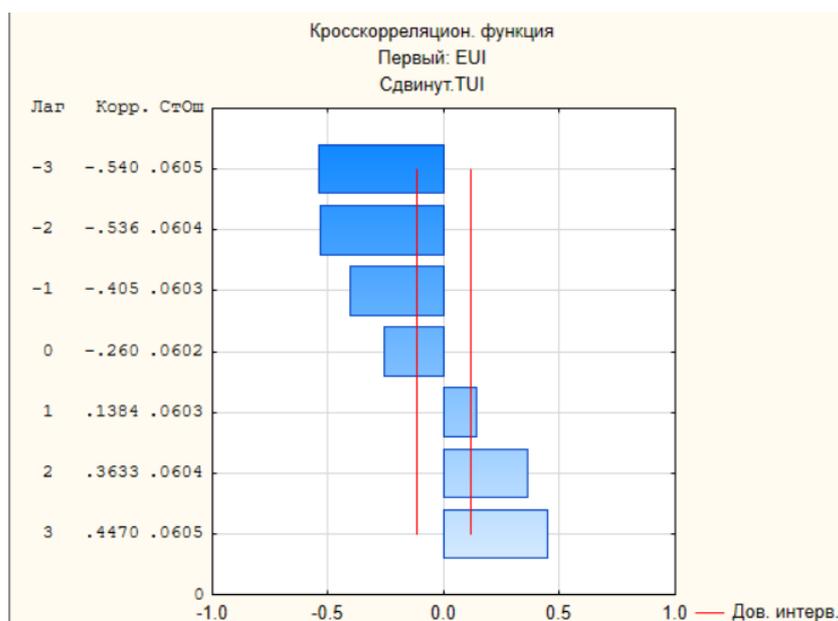


Рисунок 30. Взаимнокорреляционная функция Экмановского индекса апвеллинга и Термического индекса апвеллинга

ВКФ между EUI и концентрацией хлорофилла выявляет асинхронную связь со значимыми коэффициентами отличными от 0. Максимальное значения коэффициента корреляции отмечается на нулевом сдвиге. Отрицательные шаги ВКФ не интересуют нас так как не имеют практического смысла, вряд ли концентрация хлорофилла оказывает значимое влияние на EUI. (Рис.31)

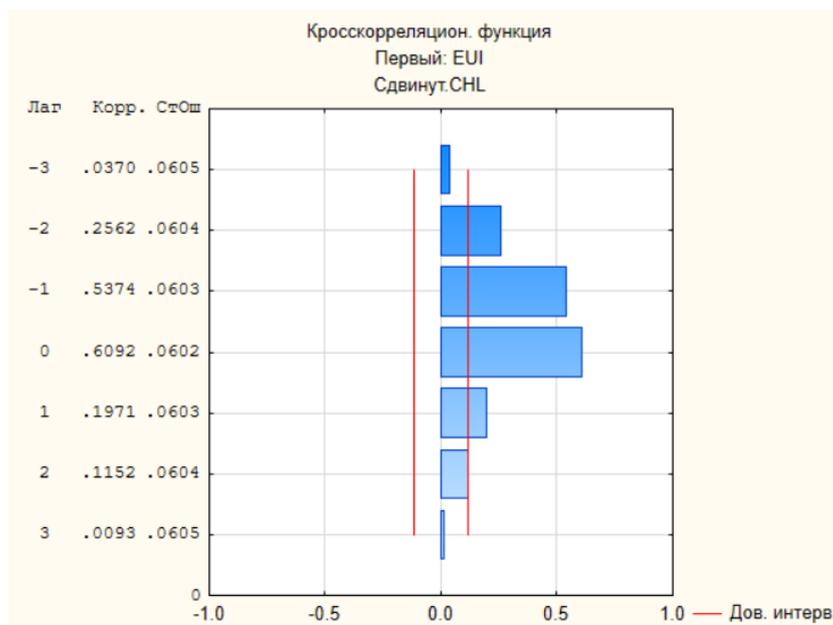


Рисунок 31. Взаимнокорреляционная функция Экмановского индекса апвеллинга и концентрации хлорофилла

Кросскорреляционная функция для TUI и концентрации хлорофилла имеет асинхронную связь со значимыми коэффициентами в положительной области и максимальным значением на сдвиге 3. Что говорит о более раннем наступлении характеристики TUI. (Рис.32)



Рисунок 32. Взаимнокорреляционная функция Термического индекса апвеллинга и концентрации хлорофилла

*Апвеллинговая зона Канарских островов*

Для ВКФ между  $W_E$  и EUI характер связи асинхронный. Наибольший коэффициент корреляции отмечается на сдвиге 2 в положительном направлении. Направление запаздывание положительное, т.е сначала изменяются значения  $W_E$ , а позже, через 2 месяца EUI. (Рис.33)



Рисунок 33. Взаимокорреляционная функция Экмановской накачки и Экмановского индекса апвеллинга

ВКФ  $W_E$  от TUI отражает асинхронный вид связи. Наибольшие значимые коэффициенты корреляции отмечаются на отрицательных сдвигах 1 и 2, а также на положительном сдвиге 3. График показывает что между этими характеристиками апвеллинга существует задержка их влияния друг на друга. (Рис.34)

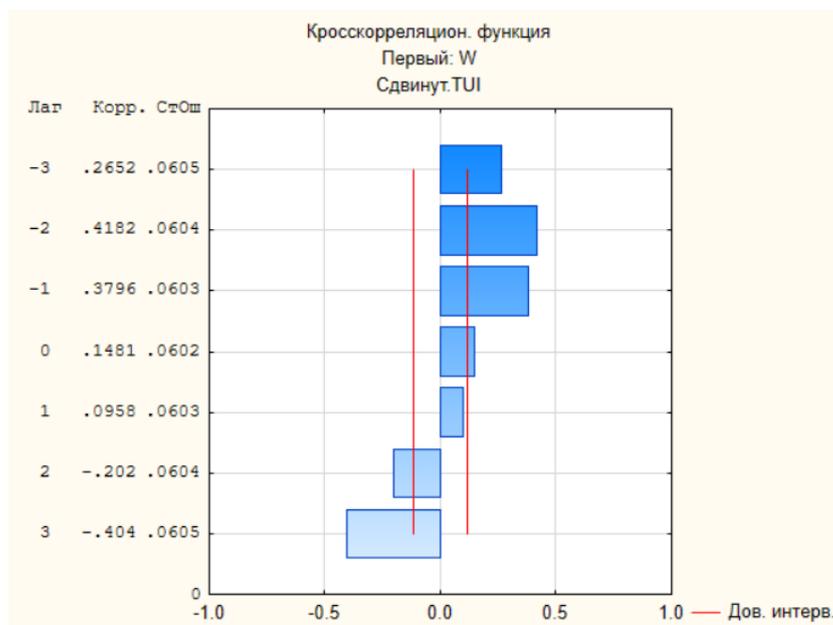


Рисунок 34. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и Термического индекса апвеллинга

ВКФ для  $W_E$  и концентрации хлорофилла имеет асинхронную связь, значимые коэффициенты корреляции выделяются в отрицательных направлениях на 1,2 и 3 сдвигах. Направление запаздывания говорит о более раннем наступлении  $W_E$  относительно концентраций хлорофилла. (Рис.35)

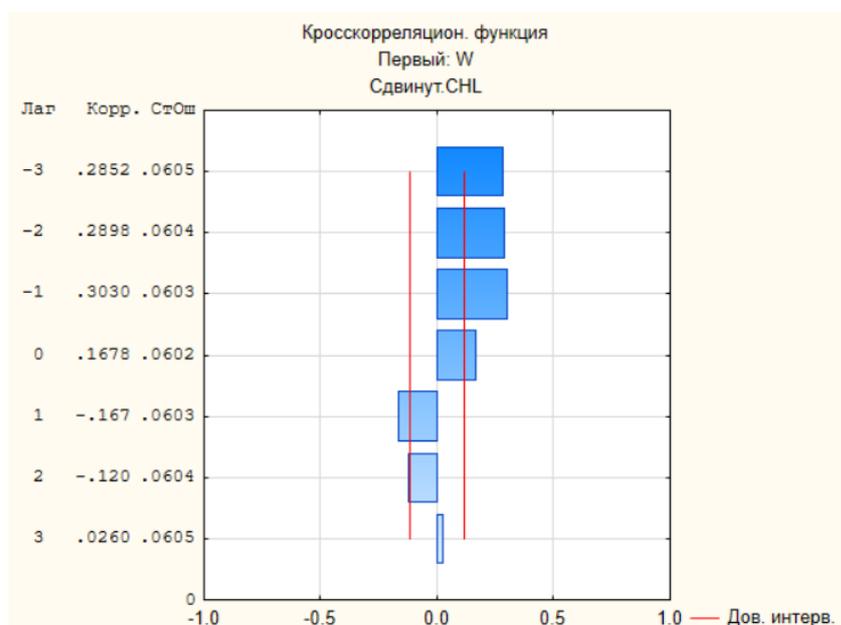


Рисунок 35. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и концентрации хлорофилла

Анализ взаимнокорреляционной функции между Экмановским апвеллинговым индексом и концентрацией хлорофилла может выявить временные зависимости и связи между этими двумя параметрами. Взаимная корреляция позволяет оценить, как одна временная серия связана с другой, что полезно для понимания механизмов апвеллинга и его влияния на биологическую продуктивность. Значимые коэффициенты корреляции отмечаются на сдвигах отличных от 0, что говорит нам о асинхронной связи. Максимальное значение коэффициента находится на 0 сдвиге. (Рис.36)

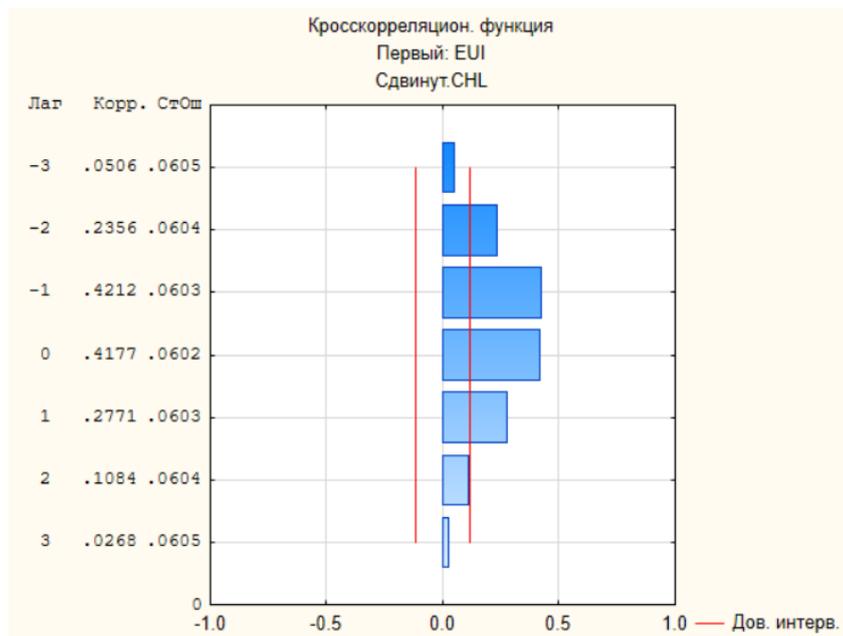


Рисунок 36. Взаимнокорреляционная функция Экмановского апвеллингового индекса и концентрации хлорофилла

ВКФ для EUI и TUI аналогична ВКФ тех же характеристик, но для Марокканского побережья. Направление запаздывания говорит нам о более раннем наступлении характеристики TUI. (Рис.37)

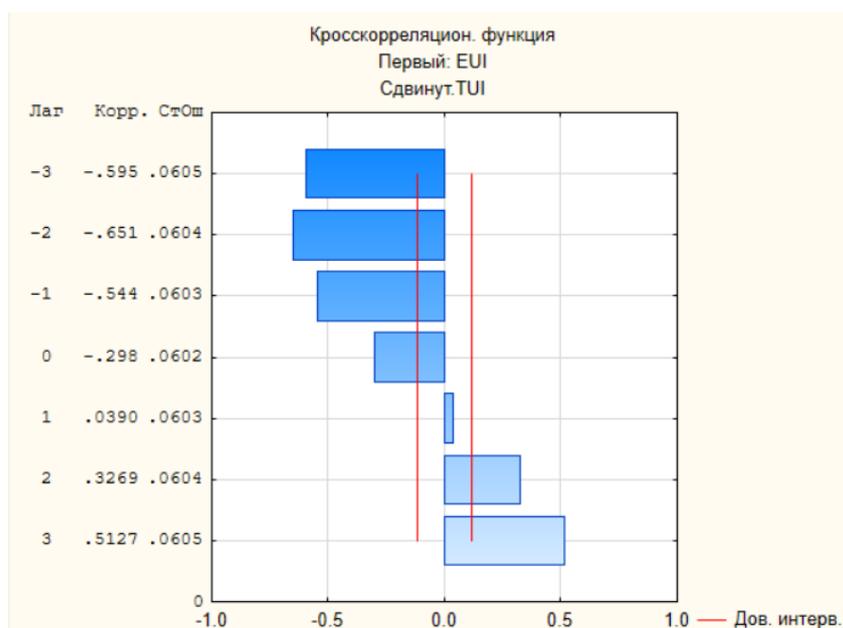


Рисунок 37. Взаимнокорреляционная функция Экмановского индекса апвеллинга и Термического индекса апвеллинга

Анализ ВКФ TUI и концентраций хлорофилла выявил асинхронную связь. Направление запаздывания говорит нам о более раннем наступлении характеристики TUI относительно концентраций хлорофилла. Максимальные значения значимой корреляции отмечается на положительном сдвиге 3. (Рис.38)

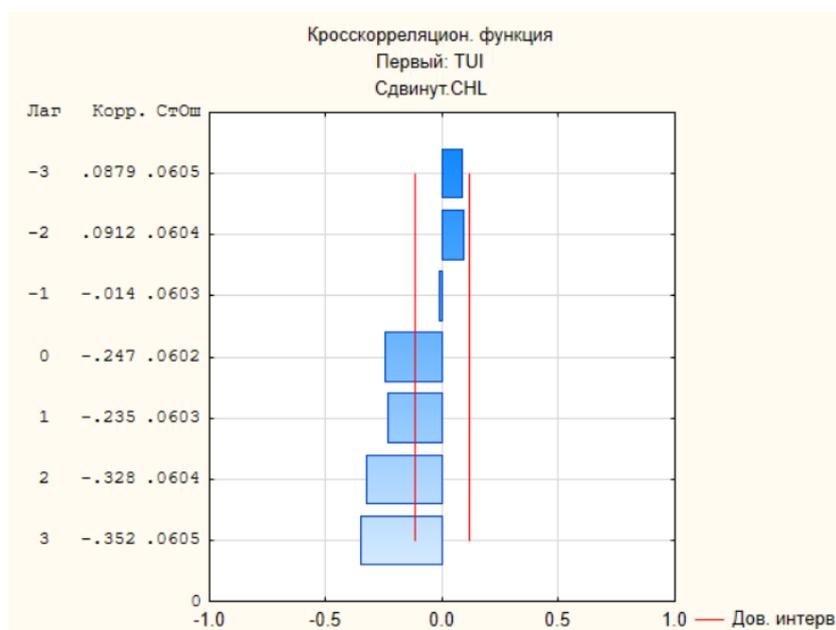


Рисунок 38. Взаимнокорреляционная функция Термического индекса апвеллинга и концентрации хлорофилла

*Апвеллинговая зона побережья Сахары*

Анализируя ВКФ для  $W_E$  и EUI выделяется асинхронный тип связи. С максимальным значением коэффициента корреляции на положительном сдвиге в 3 месяца. Направление запаздывания говорит о том что характеристика  $W_E$  изменяется раньше EUI. (Рис.39)

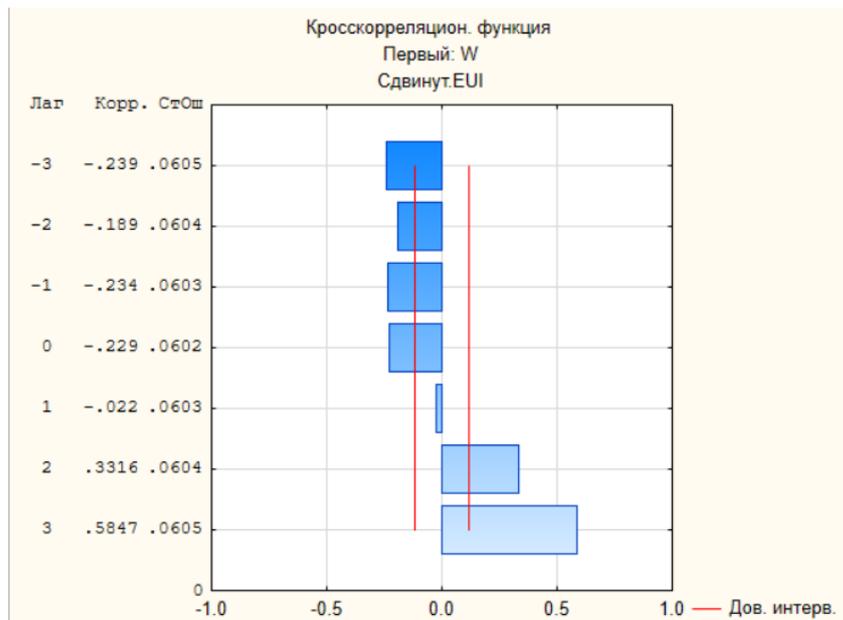


Рисунок 39. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и  
Экмановского индекса апвеллинга

Для ВКФ  $W_E$  и TUI существует асинхронная связь с максимальными значениями корреляции на отрицательных сдвигах что говорит нам о том, что направления запаздывания выглядит как раннее изменение характеристики TUI относительно изменению  $W_E$ . (Рис.40)

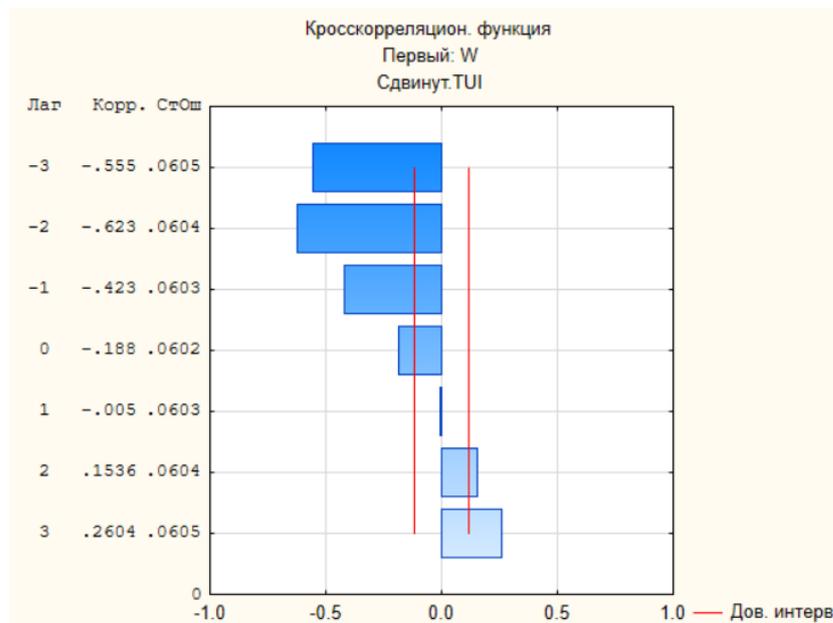


Рисунок 40. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и TUI

На ВКФ  $W_E$  и концентраций хлорофилла нас интересует только отрицательные сдвиги функции. Максимальный значимый коэффициент корреляции находится на сдвиге в один месяц (отрицательная шкала). Направление запаздывания отражает наступление изменений характеристики  $W_E$  относительно изменений концентрации хлорофилла. (Рис.41)

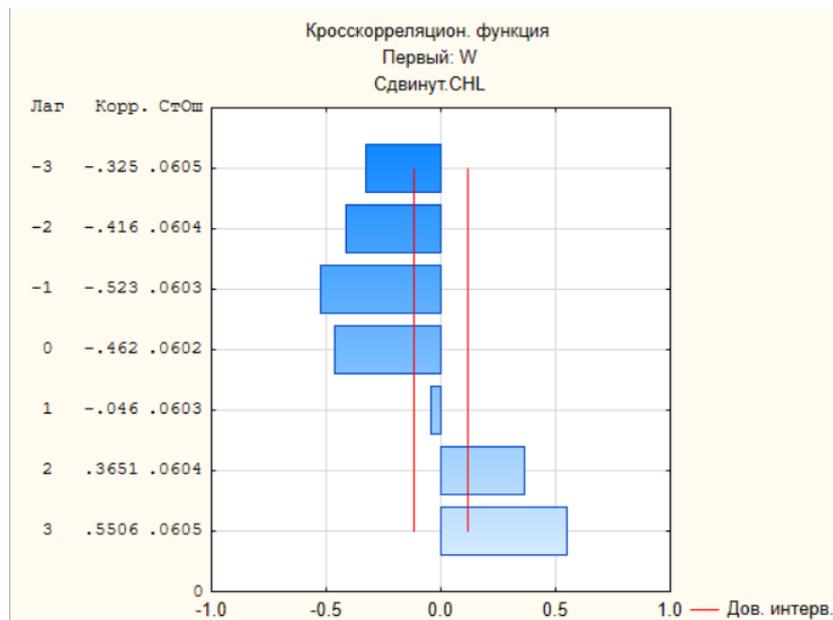


Рисунок 41. Взаимнокорреляционная функция Экмановской накачки и концентраций хлорофилла

ВКФ для EUI и TUI связь асинхронная. Значимые коэффициенты выделяются как на отрицательном, так и на положительном сдвиге, но его максимальные значения отмечаются на положительном сдвиге в один месяц. Направление запаздывания для этой апвеллинговой зоны говорит нам о раннем изменении характеристики EUI относительно TUI. (Рис.42)

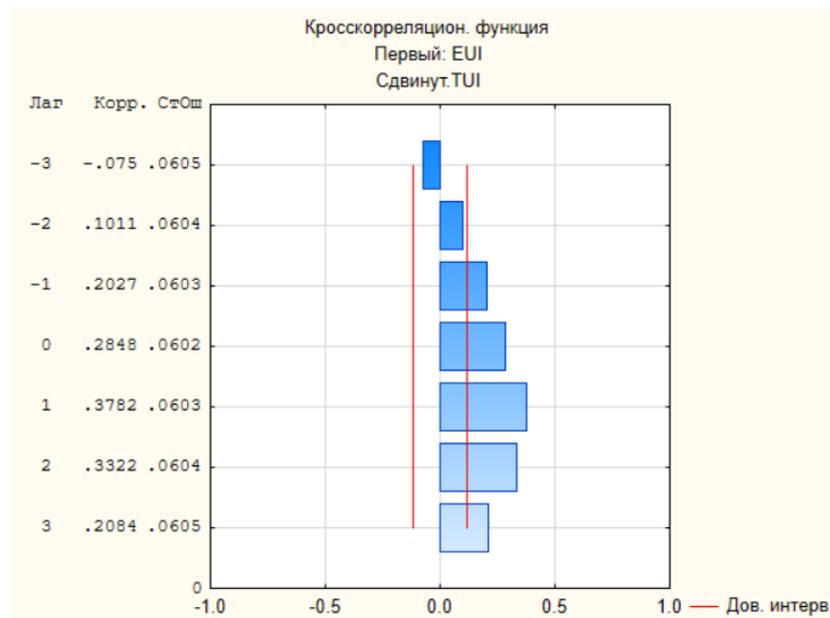


Рисунок 42. Взаимнокорреляционная функция Экмановского индекса апвеллинга и TUI

Для ВКФ EUI и концентрации хлорофилла физический смысл имеет анализ только отрицательных сдвигов функции. Максимальные коэффициенты корреляции находятся на нулевом и первом (отрицательном) сдвиге. По направлению запаздывания можно судить о раннем изменении характеристики EUI относительно концентрациям хлорофилла. (Рис.43)

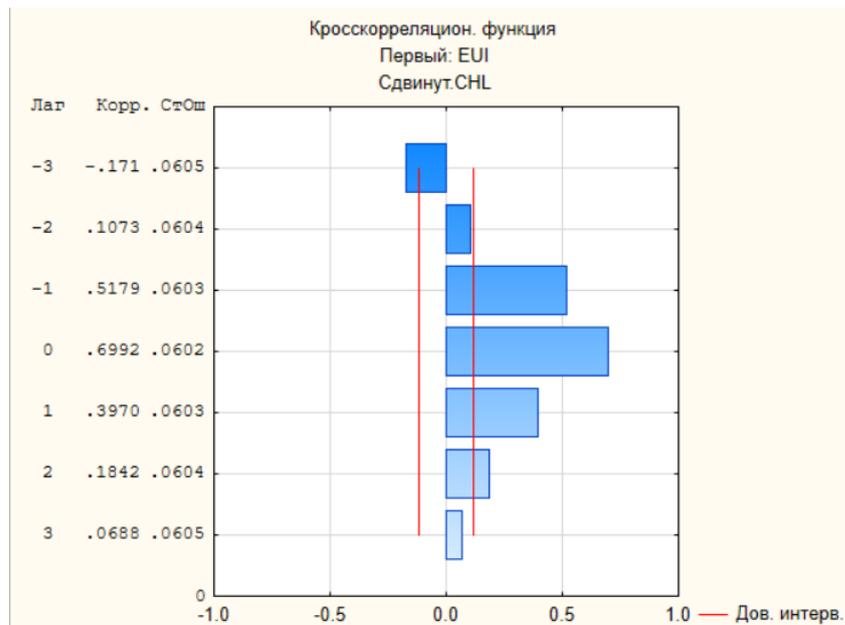


Рисунок 43. Взаимнокорреляционная функция Экмановского индекса апвеллинга и концентраций хлорофилла

Для ВКФ TUI и концентрации хлорофилла физический смысл имеет анализ только отрицательных сдвигов функции. Максимальные коэффициенты корреляции находятся на нулевом и первом и втором (отрицательном) сдвиге. По направлению запаздывания можно судить о раннем изменении характеристики TUI относительно концентрациям хлорофилла. (Рис.44)

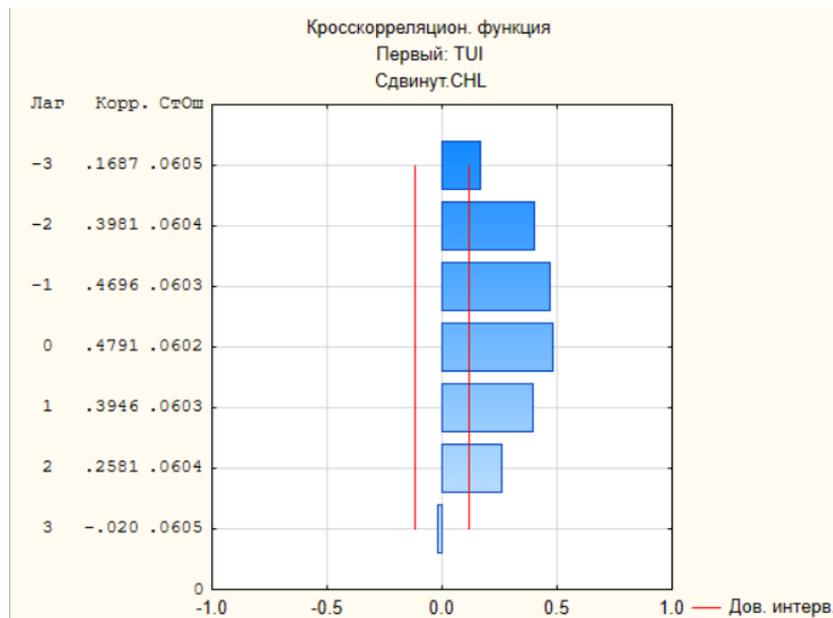


Рисунок 44. Взаимнокорреляционная функция TUI и концентрации хлорофилла

ВКФ между характеристиками апвеллинга и уловами промысловых видов не представлены ввиду малых длин годовых рядов этих характеристик.

### 3.5 Результаты кластеризации для характеристик апвеллинга

Классификация иерархическим методом Уорда с использованием евклидовой метрики проводилась в ПО “STATISTICA”. Была составлена и стандартизирована матрица четырех характеристик апвеллинга во всех исследуемых районах, а именно годовых значений TUI, EUI, концентрации хлорофилла,  $W_E$ . Результатом классификации стала горизонтальная дендрограмма (Рис 45), описывающая объединение характеристик в кластеры, исходя из которой выбирается количество кластеров для классификации итерационным методом k-means. Классификация производилась для 66 строк.

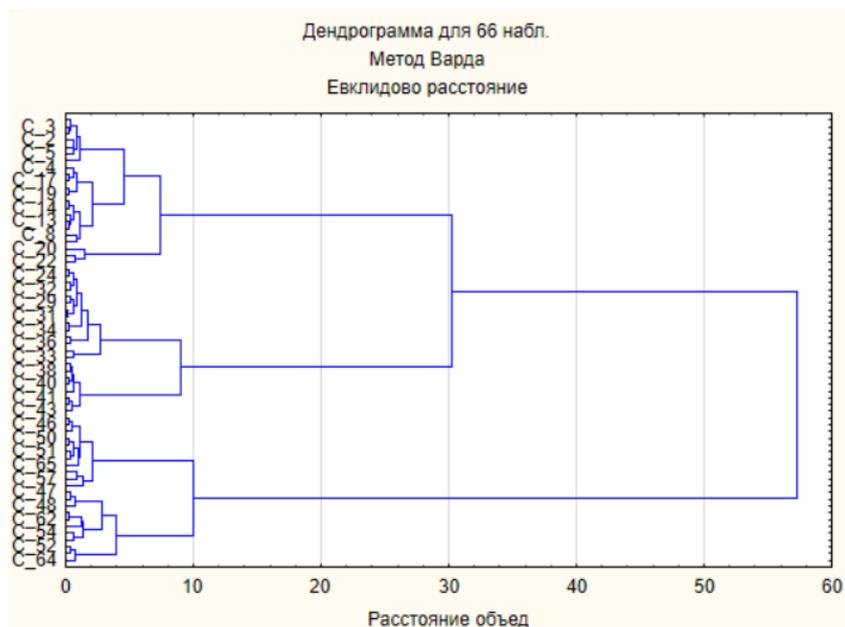


Рисунок 45. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга

Анализ методом k-means с установленным разделением на три кластера указывает на сохраняющуюся во времени различную интенсивность апвеллинговых зон, так как каждый кластер содержит только данные об одной из исследуемых зон.

Первый кластер, описывающий изменчивость характеристик апвеллинга у Марокканского побережья, отличается высокими значениями Термического апвеллингового индекса, в то время как остальные характеристики имеют самые низкие значения.

Второй кластер характеризующий апвеллинговую зону Канарских островов отличается максимальными значениями Экмановской накачки по сравнению с другими кластерами и средними значениями для других характеристик. Вероятно, это связано с положительным влиянием Канарских островов, присутствие которых недалеко от северо-западного побережья Африки возмущает как атмосферный, так и океанический поток.[2]

Третий кластер описывающий апвеллинговую зону побережья Сахары имеет низкие значения TUI и  $W_E$ , но характеризуется большой концентрацией хлорофилла и высокими значениями EUI.

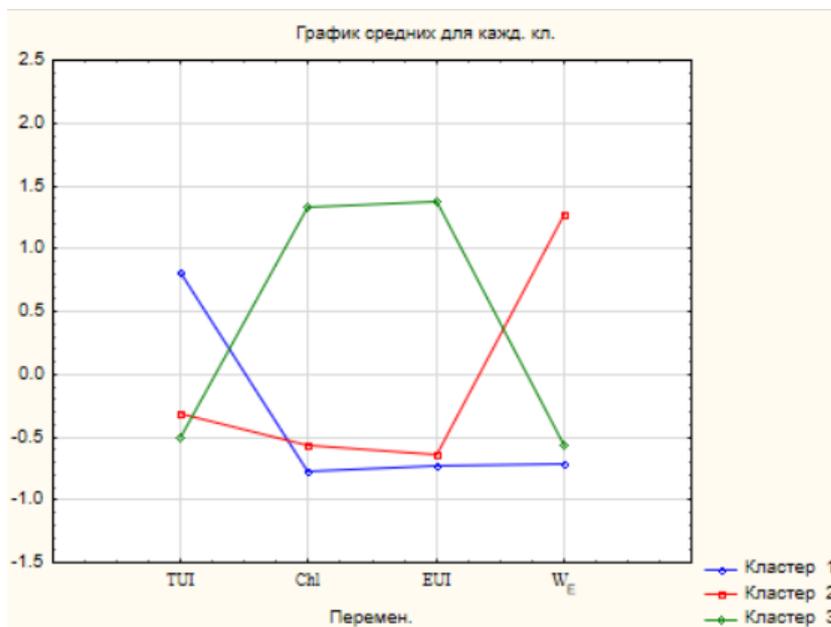


Рисунок 46. График стандартизированных средних для каждого класса

### 3.6 Результат кластеризации для уловов промысловых видов с характеристиками апвеллинга

По аналогии с предыдущей главой, но уже с добавлением в матрицу уловов разделенных по промысловым видам, производится классификация и описание кластеров.

#### Связь уловов Африканской скумбрии с индексами апвеллинга

Результат классификации методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы суммарных уловов и характеристик апвеллинга представлен дендрограммой (рис.47).

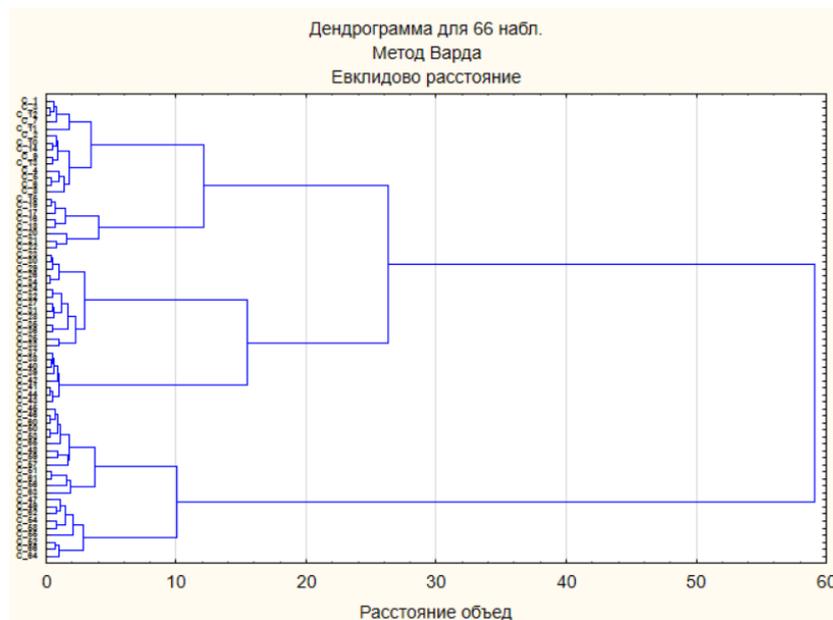


Рисунок 47. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга и суммарных уловов

Исходя из дендрограммы было принято решение выделить 6 кластеров методом k-means. Первый и третий кластер отличающийся максимальными уловами включают в себя данные для Марокканской зоны с 2014 по 2021 год (Первый кластер) и данные для зоны Канарских островов (третий кластер) за тот же самый промежуток времени. Так же примечательно что 3 кластер обладает самыми высокими значениями  $W_E$ . Четвертый кластер в основном включающий данные о Марокканской зоне апвеллинга с 2000 по 2013 год и одно значение для Канарской зоны за 2010 год и второй кластер содержащий в себе только данные Канарской зоне апвеллинга с 2000 по 2013 год имеют средние значения уловов, но самые низкие средние концентрации хлорофилла и EUI. Пятый и Шестой кластер представляют собой сугубо данные о Сахарской зоне апвеллинга с разделением на выборку с 2000 по 2013 и 2014 по 2021 год, аналогично с делением остальных районов. Аналогичные ситуации наблюдаются при разделении на классы для каждого отдельного вида. (Приложение А)

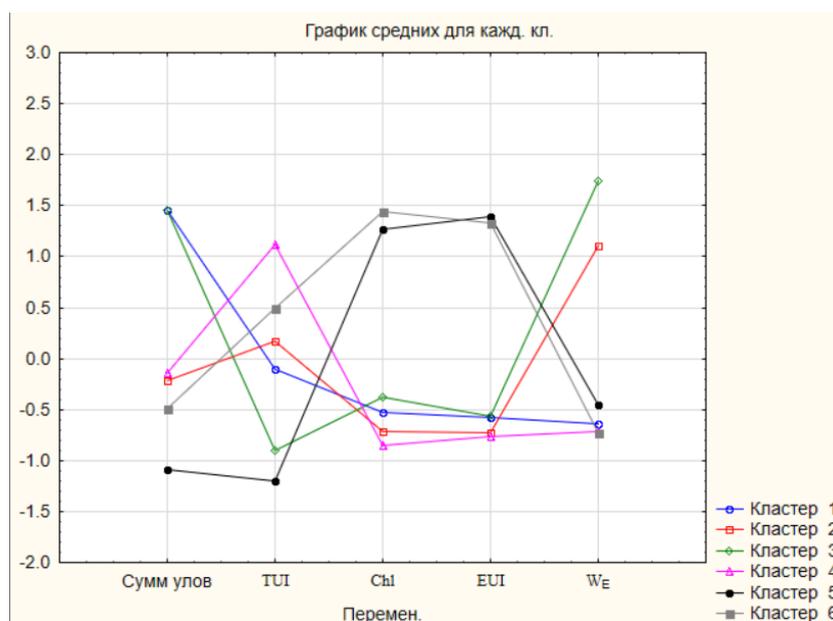


Рисунок 48. График средних стандартизированных значений исходной матрицы для 6 кластеров, выделенных методом k-means

Схожая процедура была проведена с уловами каждого отдельного вида для выявления общих характеристик кластеров. Данные были разделены на 6 кластеров методом K-средних. Распределение кластеров в пространстве и времени приведены в таблицах. (Приложение Б) Для характеристики каждого кластера далее приведены таблицы средних значений для каждого вида. Ряды для кластеризации были стандартизированы, это означает, что средние значения каждого ряда приравнены к нулю.

#### Описание кластеров для Африканской скумбрии (Таб.4)

Первый из 6 кластеров разделенный методом K-средних для уловов Африканской скумбрии и характеристик апвеллинга в основном отражает временной ход характеристик в Канарской зоне апвеллинга с 2000 по 2012 год. (Приложение Б) Кластер включает в себя достаточно низкие значения концентрации хлорофилла, Экмановских индексов апвеллинга уловов данного

вида за этот временной период. Значения  $W_E$  и TUI в этом кластере выше среднего.

Второй кластер для уловов Африканской скумбрии в основном описывает временной ход характеристик и уловов в Марокканской зоне апвеллинга с 2012 по 2021 (кроме 2019 г.), а также за 2007 год. (Приложение Б) Его выделяют высокие значения уловов данного вида и характеристики TUI, а также низкие значения остальных параметров.

Третий кластер вобрал в себя динамику изменения уловов и характеристик на Марокканской апвеллинговой зоне с 2000 по 2011 год. (За исключение значений 2008г. так как они находятся во втором кластере). (Приложение Б). Данный период характеризуется самыми высокими значениями TUI, и самыми низкими значениями как уловов, так и других характеристик.

Четвертый кластер включает в себя значения Сахарской зоны апвеллинга за 2002, 2004, 2007,2009,2010,2013,2017,2018,2019 и 2021 годы. (Приложение Б) Данные годы в этой зоне выделяются высокими значениями концентрации хлорофилла, EUI и TUI, близкими к средним за весь исследуемый период значениями уловов и низкими значениями  $W_E$ .

Пятый кластер включает в себя значения как Марокканской (2018 г.), так и Канарской зон апвеллинга (с 2013 по 2021 год). Имеет самые высокие значения уловов и  $W_E$ , низкие значения TUI, EUI, а также концентрации хлорофилла.

Шестой кластер, как и четвертый включает в себя значения на Сахарской зоне апвеллинга за 2000,2001,2003,2005,2006,2008,2011,2012,2014,2015,2016 и 2020 годы. Характеризуется низкими уловами, значениями TUI и  $W_E$ . Средние значения концентрации хлорофилла и EUI для данного кластера являются высокими.

Таблица 4. Средние значения кластеров для Африканской скумбрии

перемен.	Средн.класт. (Таблица данных9)					
	Кластер Но. 1	Кластер Но. 2	Кластер Но. 3	Кластер Но. 4	Кластер Но. 5	Кластер Но. 6
Африк.скумб	-0.601155	0.998379	-0.731901	-0.109117	1.318952	-0.51802
TUI	0.272968	0.283468	1.246871	0.433760	-0.904808	-1.28236
Chl	-0.748535	-0.577768	-0.915432	1.434967	-0.385277	1.25679
EUI	-0.754958	-0.597601	-0.808829	1.342947	-0.540835	1.38887
W <sub>E</sub>	1.015314	-0.644185	-0.887081	-0.701529	1.542372	-0.45065

#### Описание кластеров для Европейского анчоуса (Таб.5)

Первый кластер, полученный кластеризацией методом K-средних матрицы характеристик апвеллинга и уловов Европейского анчоуса отображает временной ход исследуемых значений на Марокканской апвеллинговой зоне за период с 2019 по 2021 год. Среднее значение в кластере для стандартизированных уловов высоко, что говорит о достаточно высоких значениях уловов за данный период, TUI имеет самые низкие значения, концентрации хлорофилла, EUI и W<sub>E</sub> тоже являются низкими.

Второй кластер включает значения Марокканской зоны за период с 2000 по 2018 год. Кластер, аналогично 3 кластеру для уловов Африканской ставриды включающий в себя похожий временной ряд, характеризуется низкими значениями уловов, концентрации хлорофилла, EUI и W<sub>E</sub>. Значения TUI являются самыми высокими для данного разбиения по сравнению с другими кластерами.

Третий кластер отражающий временной ход с 2014 по 2021 год в Сахарской зоне апвеллинга, имеет наименьшие значения уловов данного вида, а также низкие значения TUI и W<sub>E</sub>. Отличительной особенностью кластера являются самые высокие значения концентрации хлорофилла и EUI.

В свою очередь четвертый кластер данного разбиения включил в себя значения Канарской апвеллинговой зоны за период с 2000 по 2010 год. Кластер

характеризуется низкими значениями уловов, концентрации хлорофилла и EUI. Значения  $W_E$  в кластере высоки.

Пятый кластер, аналогично четвертому отобразил временной ход характеристик для Канарской зоны, но за период с 2011 по 2021 год. Значения уловов близки к среднему. Значения TUI, EUI и концентрация хлорофилла для кластера достаточно низкие, в то время как значения  $W_E$  наиболее высоки.

Шестой кластер, включивший в себя Сахарскую зону апвеллинга со значениями за период с 2000 по 2012 год, характеризуется наибольшими уловами, достаточно низкими значениями TUI и  $W_E$ . Значения концентрации хлорофилла и EUI аналогично с 3 кластером в рассматриваемом разбиении высоки.

Таблица 5. Средние значения кластеров для Европейского анчоуса

перемен.	Средн.класт. (Таблица данных10)					
	Кластер Но. 1	Кластер Но. 2	Кластер Но. 3	Кластер Но. 4	Кластер Но. 5	Кластер Но. 6
Евр.анч	0.38611	-0.248263	-1.31688	-0.432882	0.109368	1.459171
TUI	-1.12740	0.948712	-0.26087	0.341674	-0.668271	-0.669454
Chl	-0.33353	-0.796480	1.48554	-0.787486	-0.421375	1.235486
EUI	-0.44664	-0.725453	1.43510	-0.787494	-0.573633	1.321544
$W_E$	-0.54727	-0.777120	-0.58456	0.955159	1.665765	-0.550925

Описания кластеров для Европейской сардины (Таб.6)

Первый кластер включивший в себя временной ход характеристик (с 2000 по 2018 г) Марокканской апвеллинговой зоны и значения (за 2010 год) Канарской зоны, характеризуется высокими значениями TUI и уловов Европейской сардины. Значения концентрации хлорофилла, EUI и  $W_E$  в данном кластере являются одними из самых низких.

Второй кластер включил в себя значения Канарской зоны апвеллинга за период с 2000 по 2013 годы (кроме значений за 2010г.). Значения уловов и TUI

в данном кластере близки к средним, значения концентрации хлорофилла и EUI аналогично первому кластеру рассматриваемого разложения являются низкими. Значения  $W_E$  близки к максимальным.

Третий кластер (Сахарская зона апвеллинга со значениями за 2000,2001,2002,2003,2005,2006,2008,2011,2012,2013,2014,2015,2016,2018 и 2020) схож с 6 кластером для Японской ставриды и 6 для Африканской скумбрии. Характеризуется самыми низкими значениями уловов и TUI. Значения  $W_E$  для кластера так же достаточно низки. EUI и концентрации хлорофилла для данной акватории и времени самые высокие.

Четвертый кластер (Марокканская зона за период с 2019 по 2021 год.) аналогичный первому для Европейского анчоуса содержит в себе самые высокие значения уловов рассматриваемого вида и самые низкие значения TUI. Остальные характеристики ниже средних.

Пятый кластер характеризующий период с 2014 по 2021 год для Канарской зоны апвеллинга, описан близкими к максимальным значениям уловами и  $W_E$ , а также низкими значениями TUI, EUI концентрациями хлорофилла.

Шестой кластер (Сахарская зона, 2004,2007,2009,2010,2017,2019,2021 годы) включил в себя близкие к минимальным значениям уловы и  $W_E$ , и высокие значения TUI, EUI и концентраций хлорофилла.

Таблица 6. Средние значения кластеров для Европейской сардины

перемен.	Средн.класт. (Таблица данных11)					
	Кластер Но. 1	Кластер Но. 2	Кластер Но. 3	Кластер Но. 4	Кластер Но. 5	Кластер Но. 6
Евр.сард	0.564465	0.306755	-1.33546	1.12702	1.151029	-1.11922
TUI	0.971474	0.171808	-1.08734	-1.12740	-0.903752	0.75133
Chl	-0.807490	-0.711969	1.34565	-0.33353	-0.378150	1.32091
EUI	-0.739453	-0.725331	1.41888	-0.44664	-0.567205	1.25896
$W_E$	-0.710876	1.104663	-0.48305	-0.54727	1.740220	-0.73962

## Описание кластеров для Японской ставриды (Таб.7)

Первый кластер, схожий с кластером для Африканской скумбрии (зона Сахарского апвеллинга за 2002,2004,2007,2009,2010,2013,2017,2019,2021 годы) характеризуется высокими значениями уловов Японской ставриды, TUI, концентрации хлорофилла и EUI. Значения  $W_E$  в данный период одни из самых минимальных.

Второй кластер (Марокканская зона, 2003,2005,2007,2008,2008,2009,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2020,2021) описан высокими значениями TUI. Остальные характеристики значительно ниже среднего.

Третий кластер содержит данные о Канарской зоне апвеллинга за период с 2000 по 2013 год. Имеет близкие к минимуму значения уловов рассматриваемого вида, EUI, концентрации хлорофилла. Значения  $W_E$  и TUI выше среднего.

Четвертый кластер (Марокканская зона за 2019 год и Канарская зона, период с 2014 по 2021 год) характеризуется низкими значениями уловов, характеристик TUI, EUI и концентрациями хлорофилла. Значения  $W_E$ , близки к максимуму.

Пятый кластер включил в себя данные о Марокканской зоне за 2000,2001,2002,2004,2006,2010,2011 годы. Имеет высокие значения TUI, и низкие остальных параметров.

Шестой кластер (Данные о Сахарской зоне апвеллинга за 2000,2001,2003,2005,2006,2008,2011,2012,2014,2015,2016,2018,2020 годы) описан высокими значениями уловов, концентрации хлорофилла, EUI. Значения TUI минимальны.

Таблица 7. Средние значения кластеров для Японской ставриды

перемен.	Средн.класт. (Таблица данных12)					
	Кластер Но. 1	Кластер Но. 2	Кластер Но. 3	Кластер Но. 4	Кластер Но. 5	Кластер Но. 6
Яп. став	1.237552	-0.546259	-0.648582	-0.50095	-0.670491	1.13783
TUI	0.535099	0.442666	0.259817	-1.01522	1.478991	-1.22051
Chl	1.377305	-0.635287	-0.733733	-0.36794	-0.993346	1.31042
EUI	1.307911	-0.626390	-0.745339	-0.53201	-0.871953	1.40959
$W_E$	-0.712650	-0.681246	1.064885	1.52382	-0.951757	-0.46225

Исходя из анализа методом К-средних для уловов как отдельных видов рыб, так и их суммы можно прийти к выводу что при совокупности факторов наиболее сильно влияющим на промысел в Марокканской апвеллинговой зоне является TUI, чем он ниже, тем больше уловы, как отдельных видов, так и суммарных и  $W_E$ . Уловы в зоне апвеллинга у Канарских островов в большей степени зависят от TUI и  $W_E$ , и в меньшей от концентрации хлорофилла и EUI. Уловы в зоне апвеллинга у побережья Сахары находятся под влиянием  $W_E$ . Стоит отметить, что почти во всех случаях уменьшение среднего значения TUI, то есть увеличение разницы между температурой апвеллинговой и оффшорной зоны, положительно влияет на значения уловов промысловых видов. В целом, данный вывод не противоречит корреляционным матрицам представленным ранее. (Таб.1-3)

## Заключение

В данной работе были рассчитаны несколько индексов апвеллинга отражающих связь колебаний климата на интенсивность данного явления, а следовательно, оказывающих влияние на промысел на акватории.

С помощью литературных источников и базы данных FAO FishstatJ были выбраны основные промысловые виды рыб за последние десятилетия.

С помощью карт среднеквадратичных отклонений концентраций хлорофилла и вертикальной скорости подъема воды выбраны и обоснованы районы круглогодичного апвеллинга.

Рассчитаны корреляционные матрицы годовых значений характеристик апвеллинга и уловов отдельных промысловых видов рыб в выбранных районах. Все коэффициенты корреляции проверены на значимость.

Были построены Взаимнокорреляционные функции по среднемесячным значениям для оценки связей между характеристиками апвеллинга.

Кластерный анализ выявил наиболее и наименее продуктивные зоны апвеллинга во времени исходя из матриц годовых значений уловов и характеристик апвеллинга. Также была произведена кластеризация для каждого выбранного промыслового вида. Выявлены общие тенденции и связи подтвержденные корреляционным анализом.

## Приложение А

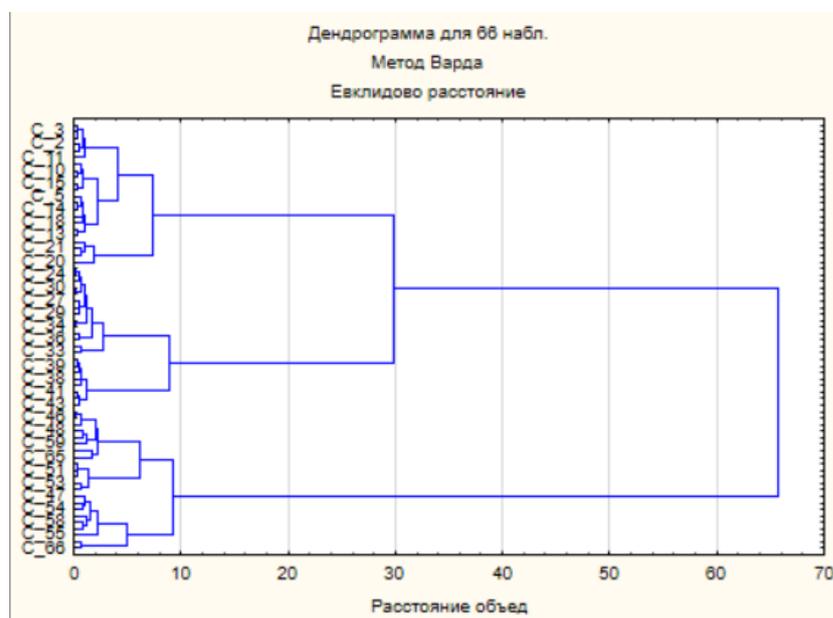


Рисунок А1. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга и уловов Японской ставриды

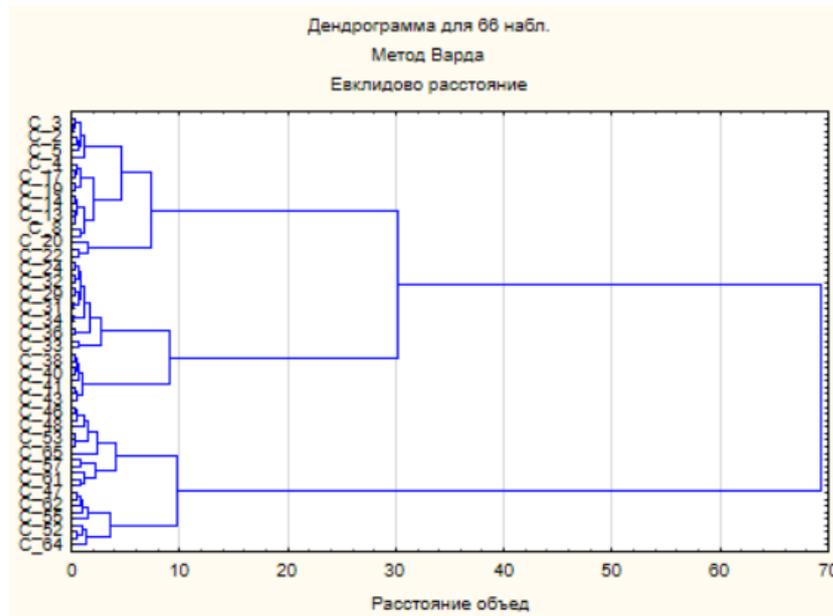


Рисунок А2. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга и уловов сардинелл

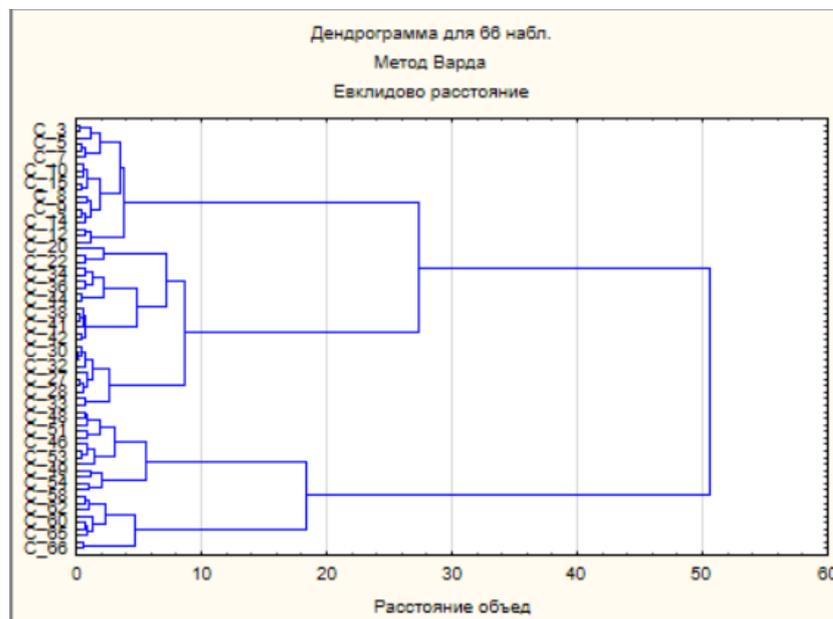


Рисунок А3. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга и уловов Европейского анчоуса

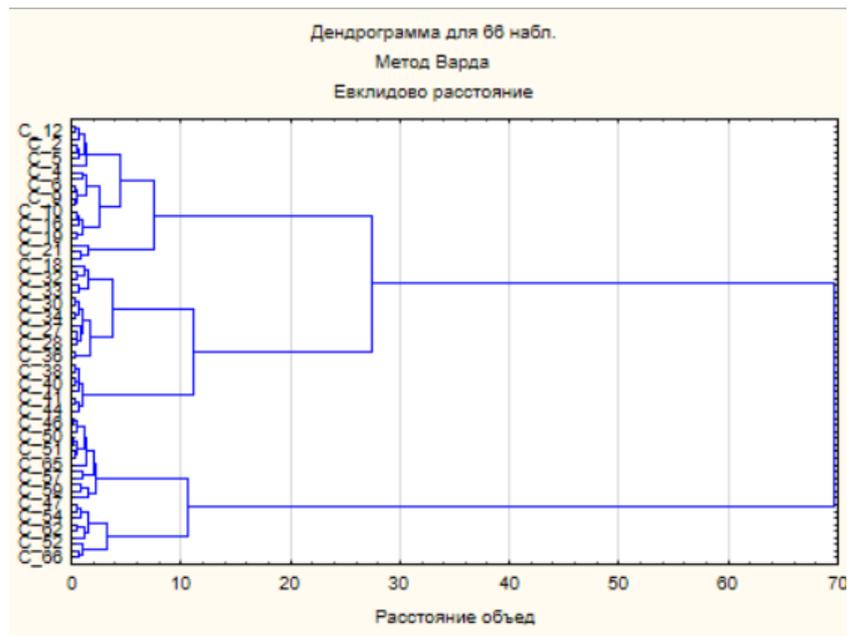


Рисунок А4. Горизонтальная дендрограмма методом Уорда с использованием евклидовой метрики для стандартизированной матрицы характеристик апвеллинга и уловов Европейской сардины

## Приложение Б

Таблица Б1. Номера кластеров для Марокканской зоны апвеллинга

Годы	Марокканская зона апвеллинга						
	Номер данных	Африканская скумбрия	Европейский анчоус	Европейская сардина	Японская ставрида	Сардинеллы	Суммарные уловы
2000	1	3	2	1	5	5	4
2001	2	3	2	1	5	5	4
2002	3	3	2	1	5	5	4
2003	4	3	2	1	2	2	4
2004	5	3	2	1	5	5	4
2005	6	3	2	1	2	1	4
2006	7	3	2	1	5	5	4
2007	8	2	2	1	2	2	4
2008	9	3	2	1	2	1	4
2009	10	3	2	1	2	2	4
2010	11	3	2	1	5	5	4
2011	12	3	2	1	5	5	4
2012	13	2	2	1	2	1	4
2013	14	2	2	1	2	1	4
2014	15	2	2	1	2	2	1
2015	16	2	2	1	2	1	1
2016	17	2	2	1	2	2	1
2017	18	2	2	1	2	1	1
2018	19	2	2	1	2	2	1
2019	20	5	1	4	4	4	1
2020	21	2	1	4	2	2	1
2021	22	2	1	4	2	4	1

Таблица Б2. Номера кластеров для Канарской зоны апвеллинга

Годы	Канарская зона апвеллинга						
	Номер данных	Африканская скумбрия	Европейский анчоус	Европейская сардина	Японская ставрида	Сардинеллы	Суммарные уловы
2000	23	1	4	2	3	3	2
2001	24	1	4	2	3	3	2
2002	25	1	4	2	3	1	2
2003	26	1	4	2	3	3	2
2004	27	1	4	2	3	3	2
2005	28	1	4	2	3	3	2
2006	29	1	4	2	3	3	2
2007	30	1	4	2	3	3	2
2008	31	1	4	2	3	3	2
2009	32	1	4	2	3	3	2
2010	33	1	4	1	3	1	4
2011	34	1	5	2	3	3	2
2012	35	1	5	2	3	3	2
2013	36	5	5	2	3	3	2
2014	37	5	5	5	4	3	3
2015	38	5	5	5	4	3	3
2016	39	5	5	5	4	3	3
2017	40	5	5	5	4	3	3
2018	41	5	5	5	4	3	3
2019	42	5	5	5	4	3	3
2020	43	5	5	5	4	3	3
2021	44	5	5	5	4	3	3

Таблица Б3. Номера кластеров для апвеллинговой зоны у побережья Сахары

Годы	Зона апвеллинга у побережья Сахары						
	Номер данных	Африканская скумбрия	Европейский анчоус	Европейская сардина	Японская ставрида	Сардинеллы	Суммарные уловы
2000	45	6	6	3	6	6	5
2001	46	6	6	3	6	6	5
2002	47	4	6	3	1	6	6
2003	48	6	6	3	6	6	5
2004	49	4	6	6	1	6	6
2005	50	6	6	3	6	6	5
2006	51	6	6	3	6	6	5
2007	52	4	6	6	1	6	6
2008	53	6	6	3	6	6	5
2009	54	4	6	6	1	6	6
2010	55	4	6	6	1	6	6
2011	56	6	6	3	6	6	5
2012	57	6	6	3	6	6	5
2013	58	4	3	3	1	6	5
2014	59	6	3	3	6	6	5
2015	60	6	3	3	6	6	5
2016	61	6	3	3	6	6	5
2017	62	4	3	6	1	6	6
2018	63	4	3	3	6	6	6
2019	64	4	3	6	1	6	6
2020	65	6	3	3	6	4	5
2021	66	4	3	6	1	6	6

## Источники

1. G Hempel and K Sherman Large Marine Ecosystems of the World Trends in Exploitation, Protection, and Research Series. Large Marine Ecosystems Series Volume: 12. Elsevier, 2003
2. Mason, E., F. Colas, J. Molemaker, A. F. Shchepetkin, C. Troupin, J. C. McWilliams, and P. Sangrà (2011), Seasonal variability of the Canary Current: A numerical study, J. Geophys. Res., 116, C06001.
3. Л.А. Духова, В.В. Сапожников. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // Труды ВНИРО / Водные биологические ресурсы. - 2014 г. Том 152
4. А. Н. Серебренников. Улучшенная методика определения индексов прибрежных апвеллингов по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №5
5. А. Н. Серебренников. Методика пространственного разделения апвеллинга по характеру сезонной изменчивости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №2.
6. The Sea, Volume 14, edited by Allan R. Robinson and Kenneth H. Brink. 2004 by the President and Fellows of Harvard College
7. Hailegeorgis, D., Lachkar, Z., Rieper, C., and Gruber, N.: A Lagrangian study of the contribution of the Canary coastal upwelling to the nitrogen budget of the open North Atlantic, Biogeosciences, 2021
8. Valdés, L.1 and Déniz-González, I.1 (eds). Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. IOC-UNESCO, Paris.2015
9. Гуцин, А.В. Промысловая фауна океанических вод Северо-Западной Африки / А.В. Гуцин, Л.И. Перова. – Калининград: АтлантНИРО, 2011. – 180 с.

10. Copernicus Services (CMEMS) – электронные данные. Режим доступа: <http://marine.copernicus.eu> – свободный. Дата обращения 2024 год
11. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации».– СПб, изд. РГГМУ, 2017.
12. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник, – издание 2, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 424 с.
13. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. СПб: РГГМИ, 1992 – 96
14. Боровиков В. Программа STATISTICA для студентов и инженеров. – М. Компьютер Пресс, 2001. – 301 с
15. В.А.Горчаков, А.Ю.Дворников, В.А.Рябченко, С.С.Пугалова. МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОСИСТЕМЫ В КАНАРСКОМ АПВЕЛЛИНГЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ), Фундам. прикл. гидрофиз. 2013г
16. Vazquez, R., Parras-Berrocal, I., Cabos, W. et al. Assessment of the Canary current upwelling system in a regionally coupled climate model. *Clim Dyn* 58, 69–85 (2022)