



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

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Динамика численности антарктического криля в условиях
современных изменений климата.

Исполнитель Ужегова Анна Денисовна

(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)

«__» _____ 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Физико-географическое описание исследуемого района	5
2. Криль – биология, экология и промысел.....	8
2.1. Влияние закисления океана на экосистему криля	11
3. Методы анализа данных.....	13
3.1. Корреляционный анализ	13
3.2. Анализ тренда.....	14
3.3. Спектральный анализ.....	15
3.4. Взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция).....	17
3.5. Множественная линейная регрессия.....	19
4. Исследование влияния факторов среды на промысел криля	21
4.1. Описание исходных данных	21
4.2. Оценка взаимосвязи исследуемых характеристик.....	21
4.3. Временная изменчивость исследуемых характеристик	24
4.4. Циклическая структура выловов криля и его кормовой базы	30
4.5. Исследование отклика выловов криля на факторы среды	47
4.6. Оценка связи уловов криля с несколькими характеристиками	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	69

ВВЕДЕНИЕ

Исследование Антарктического криля *Euphausia superba* и влияния на него факторов окружающей среды является актуальной задачей в океанологии, поскольку данный вид является ключевым в экосистеме Южного океана и имеет высокое промысловое значение. Выявление закономерностей в изменчивости его популяции с другими характеристиками морской среды может позволить разработать наиболее точные прогностические модели его численности, что позволит более качественно заниматься управлением устойчивого крилевого промысла, не подвергая экосистему рискам. Кроме того, важно следить за реакцией крилевого сообщества на климатические изменения, особенно во время увеличения выловов из-за новых стран-участников в их промысле.

В данной работе рассмотрено воздействие изменения климата на выловы Антарктического криля *Euphausia superba* на акватории моря Скоша в 48 промысловом районе в целом и его подрайонах 48.1-2-3 по отдельности. В качестве параметров изменения климата были рассмотрены данные о температуре поверхности океана (для выявления реакции криля на аномалии температуры поверхности океана), концентрации хлорофилла (для исследования взаимодействия с кормовой базой – фитопланктоном), концентрации морского льда (поскольку криль входит в криопелагические сообщества) и парциальном давлении углекислого газа в воде (для оценки влияния окисления океана на криль). В связи с этим целью работы является выявление закономерностей в изменении численности Антарктического криля *Euphausia superba*, через влияние на него различных характеристик морской среды в условиях изменения климата. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить корреляционные матрицы для подрайонов и промыслового района в целом, выявить значимые связи выловов с другими характеристиками морской среды.

2. Рассчитать и проанализировать тренды для выловов криля и значимых характеристик.
3. Провести спектральный анализ для выловов криля и для наиболее значимой и влияющей на него характеристики.
4. Рассчитать и проанализировать ВКФ для выловов криля со значимыми характеристиками морской среды.
5. Рассчитать и проанализировать модель МЛР для криля со значимыми характеристиками морской среды.
6. Получить представление об изменчивости крилевых популяций в связи с влиянием на них различных факторов морской среды.

1. Физико-географическое описание исследуемого района

Море Скоша, Скотия (Scotia) – окраинное межостровное море в Атлантическом секторе Южного океана. Расположено между двумя материками – Южной Америкой и Антарктидой. Северная граница проходит по островам Южная Георгия, восточная по Южным Сандвичевым островам, южная по Южным Оркнейским островам и водами моря Уэдделла. На западе море соединяется с Тихим океаном через пролив Дрейка, образуя море между южной оконечностью Южной Америки и Антарктическим полуостровом (рисунок 1.1).

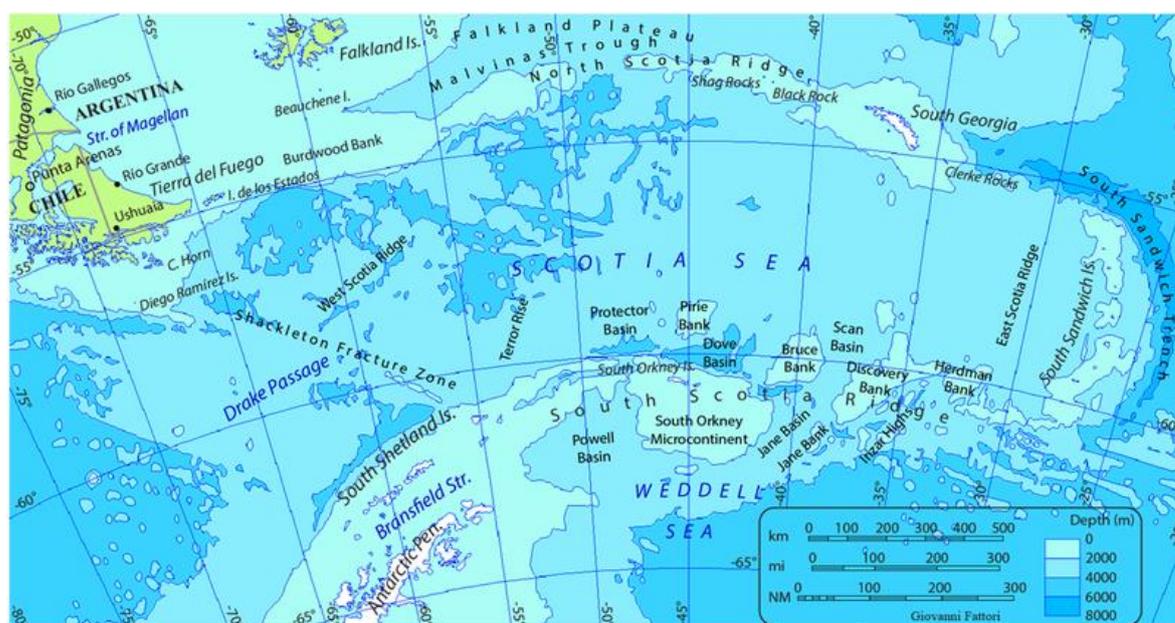


Рисунок 1.1. Физическая карта моря Скоша

Площадь водной поверхности моря Скоша составляет около 1,3 млн. км², средняя глубина 3096 м, наибольшая глубина 6022 м.

Течения определяются господствующими ветрами и циркуляцией вод сопредельных районов. Главный поток поступает через пролив Дрейка и движется на восток и северо-восток со средней скоростью 25 см/с [1].

Соленость воды почти не изменяется, составляет около 34‰.

Температурный режим имеет выраженный градиент в широтном направлении, повышаясь от юга к северу. Средняя температура поверхности южной части моря Скоша (в районе Южных Оркнейских островов) составляет около $-0,7^{\circ}\text{C}$, северной (в районе островов Южная Георгия) – $2,5^{\circ}\text{C}$. В целом, температура водной поверхности колеблется в пределах от $-1,8^{\circ}\text{C}$ до 6°C , понижаясь с глубиной.

Ледовый режим соответствует температурному, наибольшее количество и продолжительность пребывания морского льда сосредоточено в южной части моря, уменьшаясь к северной. Летом море полностью освобождается от льда, но из-за особенностей циркуляции в течение всего года в нем встречаются дрейфующие льды. Так же нередки айсберги.

Море Скоша является активной зоной рыбного промысла (в частности крилевого). Входит в 48 промысловый район на FAO (Food and Agriculture Organization) [2], занимая четыре его подрайона (рисунок 1.2).

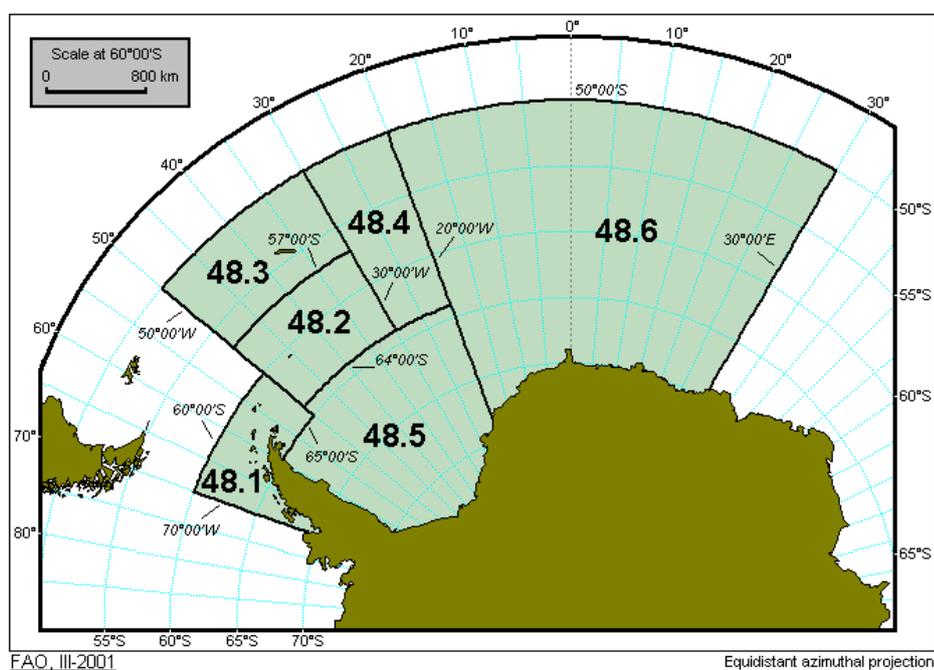


Рисунок 1.2. Антарктическая Атлантика - 48 промысловый район и его подрайоны на FAO

Антарктический полуостров или подрайон 48.1 занимает все западное побережье Антарктического полуострова от Земли Палмера до меридиана 70° з.д., ограничиваясь параллелью 60° ю.ш. С восточной стороны район ограничен меридианом 50° з.д. и параллелью 65° ю.ш. Является наиболее значимым в промысловом плане подрайоном среди остальных. Отличается высокой ледовитостью за счет постоянного притока дрейфующих льдов, скапливающихся вдоль берега полуострова и соответствующими низкими значениями температуры.

Южные Оркнейские острова или подрайон 48.2 представляет собой прямоугольник с крайними координатами 57° ю.ш. 50° з.д. и 64° ю.ш. 30° з.д. Второй по промысловой значимости подрайон. Отличается выраженной сезонностью физических характеристик воды.

Остров Южная Георгия или подрайон 48.3 представляет собой прямоугольник с крайними координатами 50° ю.ш. 50° з.д. и 57° ю.ш. 30° з.д. Отличается высокими значениями температуры воды (для моря Скоша) и наименьшей ледовитостью, за счет своего северного расположения.

Южные Сандвичевы острова или подрайон 48.4 представляет собой прямоугольник с крайними координатами 50° ю.ш. 30° з.д. и 64° ю.ш. 20° з.д. Практически незначимый в кривом промысле подрайон, в котором проводятся лишь разведочные экспедиции.

2. Криль – биология, экология и промысел

Антарктический криль *Euphausia superba* – зоопланктон фитопланктонофаг, относящийся к семейству эуфаузиид [3]. Представляет собой рачка небольшого размера. Является самым многочисленным видом своего семейства.

Его тело состоит из трех основных частей – головогруды, абдомена (грудной отдел) и брюшного отдела, с соответствующими грудными (торакоподами) и брюшными (плеоподами) конечностями, заканчивающегося тельсоном с парой ланцетовидных придатков. От основания грудных ног отходят пуки жабр. Окраска розоватая, передняя часть головогруды у активно питающихся рачков зеленоватая. Глаза темные, органы свечения на брюшных сегментах пурпурные (рисунок 2.1). Длина тела взрослой особи достигает 6 см, в среднем около 3-4 см. Самки обычно крупнее самцов [4]. Продолжительность жизни – до 6 лет. Головогрудь покрыта хитиновым панцирем (карапаксом), сросшим со всеми грудными сегментами. В головной части панцирь переходит в рострум [5].



Рисунок 2.1. Антарктический криль *Euphausia superba*

Криль *Euphausia superba* распространен циркумполярно во всем Южном океане. Имеет очень высокую численность и биомассу. Для него характерно образование очень крупных и плотных скоплений (стай), размером от нескольких метров до сотни квадратных километров [6], поэтому данный вид представляет очень высокий промысловый интерес. Вместе с тем, большая часть организмов обитает в водах Антарктики в разреженном одиночном состоянии.

Большая часть жизненного цикла *E. superba* проходит при отрицательных температурах от -1.8°C до -1.5°C . В районе острова Южная Георгия верхний температурный предел достигает 3.9°C [3]. Антарктический криль встречается, как правило, в верхнем 200-метровом слое воды. Хотя нередко бывает и на глубинах до 600 метров. Совершает суточные вертикальные миграции.

Спектр питания довольно широкий. Основной способ питания – хищничество и в меньшей степени – фильтрация. Питается главным образом фитопланктоном, в основном диатомовыми водорослями, как в толще воды, так и с подводной поверхности льда. Также поедает яйца, личинок, взрослых погибших или живых особей своего вида, других зоопланктонофагов.

Нерестится антарктический криль летом (с декабря по март). Процесс спаривания происходит при неполном созревании самок (за 1,5 - 2 месяца до созревания), самцы прикрепляют сперматофоры к теликуму. Затем, весной, во время массового цветения фитопланктона, рачки откармливаются, созревая перед нерестом. Пик нереста наблюдается обычно в середине февраля, в более теплые годы может раньше. Самка выметывает в среднем около 3000 икринок, но возможно и до 6000 – 8000 икринок [3-5]. Они опускаются на глубину до километра или на дно, где начинают свое личиночное развитие, постепенно переходя стадии роста, поднимаются к поверхности. Обычно развитие криля от икры до взрослой особи занимает около 7 месяцев. Промысловых размеров (от 3 см) антарктический криль достигает примерно на второй год жизни.

Исключительно важное значение криля заключается в том, что он является главным объектом питания для большинства обитающих в Южном океане морских хищников (пингвины, тюлени, киты, рыбы). При этом криль является основным потребителем первичной продукции (фитопланктона) в пределах своего ареала обитания. Благодаря чему, криль можно назвать "ключевым видом" в экосистеме Южного океана. Помимо этого, антарктический криль считается одним из наиболее многочисленных видов на планете, общая биомасса которого оценивается приблизительно в 379 млн. тонн [7].

Расширяющийся промысел в Южном океане привел к образованию в 1980 году комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ). С тех пор управление промыслом криля осуществляется в соответствии с предохранительным подходом. Этот подход учитывает роль криля, как ключевого вида, в экосистеме Антарктики, а также неопределенности, связанные с изменениями окружающей среды, в том числе в отношении изменения климата.

Поскольку жизненный цикл криля тесно связан с морским льдом, сокращение площади морского льда может привести к сокращению среды обитания, а следовательно и численности криля [8]. Кроме того, потепление приведет к тому, что площадь среды обитания, с оптимальной температурой для роста криля, будет сокращаться в сторону южного полюса.

Икра криля и некоторые виды фитопланктона оказались чувствительны к окислению океана [9, 10]. По прогнозам будущего распространения CO₂ в Южном океане, в АНТКОМ предположили, что в следующем столетии некоторые важные местообитания криля могут стать непригодными для его пополнения. Что может сильно отразиться на экосистеме Антарктики и соответствующему промыслу.

2.1. Влияние закисления океана на экосистему криля

Ожидается, что экосистемы Южного океана будут одними из тех, которые наиболее сильно пострадают от закисления океана из-за более высокой растворимости CO_2 и CaCO_3 в холодных водах, а так же из-за регионального апвеллинга глубоководных вод [11]. Область исследования воздействия закисления океана на живые организмы набирает популярность, однако научных работ на данную тематику до сих пор недостаточно, чтобы с уверенностью делать какие-либо точные выводы. Закисление океана, то есть увеличение растворенного в воде CO_2 , соответствующее понижение pH водной среды и снижение степени насыщения воды карбонатами кальция в океане может являться стрессором для организмов с кальциево-карбонатной структурой скелета.

По данным исследования [12] повышенное значение парциального давления углекислого газа в воде ($p\text{CO}_2$) положительно повлияло на скорость роста антарктических морских водорослей. При падении pH ниже 7,6 скорость роста значительно снижалась, однако, когда pH поддерживался постоянным, а $p\text{CO}_2$ увеличивалось, скорость роста морских водорослей увеличивалась более чем на 20% даже при значениях $p\text{CO}_2$, превышающих текущие уровни окружающей среды более чем в пять раз. Предполагается, что прогнозируемое увеличение $p\text{CO}_2$ в морской воде, связанное с окислением океана, не окажет неблагоприятного воздействия на сообщества морских водорослей.

Парциальное давление углекислого газа обычно увеличивается с глубиной. Таким образом, криль проводит большую часть своей жизни в условиях более высоких и более изменчивых значений $p\text{CO}_2$, чем организмы, живущие в поверхностных водах [11]. Результаты исследования [13] показывают, что эмбриональное развитие криля может быть остановлено при высоких уровнях $p\text{CO}_2$ (2000 μatm), но в работе также приводятся модельные данные ОСМIP-2, прогнозирующие максимально возможные значения $p\text{CO}_2$

в этот век до 1400 μatm , указывая на то, что достижение 2000 μatm вряд ли возможно. Очевидно, что криль оказался весьма устойчивым к повышенным значениям $p\text{CO}_2$. Однако предварительные результаты долгосрочных экспериментов с крилем, а также опубликованная информация о других видах ракообразных предполагают, что рост, выживаемость и пополнение молоди криля могут напрямую и/или косвенно зависеть от повышенного $p\text{CO}_2$ [11]. Поскольку криль регулярно производит новый экзоскелет на протяжении всей своей жизни, он зависит от физиологических и химических процессов, которые позволяют эффективно поглощать кальций и другие элементы из морской воды для формирования экзоскелета. Потенциальные эффекты закисления океана на кальцификацию экзоскелета ракообразных, могут влиять либо на осаждение CaCO_3 , либо препятствовать кальцификации нового экзоскелета после линьки.

Таким образом, развитие криля может быть затронуто закислением океана в ближайшем будущем. Поэтому важно продолжать наблюдения в данной сфере, для выявления возможного воздействия закисления океана на криль и экосистемы Южного океана в целом.

3. Методы анализа данных

3.1. Корреляционный анализ

Для оценки взаимосвязей между исследуемыми 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.

Если одному значению первой переменной соответствует одно и только одно значение второй переменной, тогда связь между ними является **функциональной**. В этом случае $|r| = 1$.

Если одному значению первой переменной соответствует любое значение второй переменной, тогда связь между ними является **абсолютно случайной** и $|r| = 0$.

В остальных случаях связь является **стохастической**, т.е. одному значению первой переменной соответствует некоторое значение второй переменной с определенной вероятностью, $0 < |r| < 1$.

Характер связи определяется по соотношению значений двух переменных. Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать – это прямая зависимость, тогда $r > 0$. Если при возрастании одной величины другая имеет тенденцию убывать – это обратная зависимость, тогда $r < 0$.

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 **корреляционной матрицы**.

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**. Для этого используется критерий Стьюдента, рассчитывается его эмпирическое значение t^* . Затем рассчитывается его критическое значение $t_{кр}$, при уровне значимости 5%. После чего они сравниваются.

Если $t^* > t_{кр}$, 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 коэффициент корреляции незначим, т.е. между двумя переменными статистически значимая линейная связь отсутствует.

Примечание: Всегда нужно помнить, что наличие значимой корреляции между двумя переменными не определяет причинно-следственных отношений между ними, т.е. не значит, что одна переменная зависит от другой! [14].

3.2. Анализ тренда

Тренд отражает наличие во временной изменчивости исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, существенно превышающим длину выборки [14]. Он может быть линейным или квадратичным, в зависимости от того, на какую часть длиннопериодного колебания попала выборка.

Основными характеристиками тренда являются:

Коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда) или его нелинейный аналог η^2 , характеризующий **вклад тренда** в общую дисперсию ряда. Вклад может быть *значительным* или *незначимым*. Это определяется на основании проверки на значимость коэффициента корреляции r или η . В случае их незначимости считается, что *тренда нет*.

Величина тренда – изменение характеристики по *линейному тренду* за определенный промежуток времени. Она равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики за единицу дискретности.

Для дальнейшего статистического анализа из временного ряда **тренд должен быть удален.**

3.3. Спектральный анализ

Если возникает задача выявить в исследуемом процессе только циклические составляющие, можно воспользоваться **спектральным или гармоническим анализом.**

В основе **гармонического анализа** лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т.е. на конечное число гармоник. **Гармониками** называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда.

Формула гармоника:

$$G_k = A_k * \cos(\omega_k * t - \varphi_k), \omega_k = 2\pi/T_k. \quad (3.1)$$

где T_k – период гармоника, ω_k – частота гармоника, A_k – амплитуда гармоника, φ_k – фаза гармоника, k – номер гармоника, t -время.

Характеристики гармоника определяются на основании *коэффициентов Фурье* a_k и b_k :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k \cdot t_i)]; \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k \cdot t_i)], \quad (3.2)$$

где x_i -исходный ряд, N -длина ряда, ω_k – частота гармоника, t_i -ряд времени $t_i = i, i = 1, 2, 3 \dots N$.

Характеристики гармоники определяются по следующим формулам:

Амплитуда гармоники:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (3.3)$$

Амплитуда гармоники показывает наибольшее отклонение характеристики от среднего значения в данном периоде.

Фаза гармоники:

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{a_k}{b_k} \pm \pi\right); \quad (3.4)$$

Фаза характеризует время наступления максимума на данном периоде.

Дисперсия гармоники:

$$D_k = \frac{A_k^2}{2}; \quad (3.5)$$

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда:

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}; \quad (3.6)$$

где D_y – дисперсия исходного ряда.

Вклад дисперсии гармоники в общую дисперсию ряда, по сути, является аналогом коэффициента детерминации, поэтому точно так же может быть проверен на значимость через критерий Стьюдента. При проверке можно сделать вывод о *значительном вкладе* в дисперсию ряда или *незначимости* гармоники [14].

Если потом соответствующие характеристики подставить в формулу гармоники, то можно рассчитать её значения на каждый момент времени.

Современные статистические программы («Statistica», «Past3» и т.п.) рассчитывают разложение Фурье методом БПФ (быстрого преобразования Фурье) при этом теряя информацию о некоторых характеристиках гармонических составляющих. По сути, в качестве результата там представляется зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты, и называется это **периодограммой** (или спектром). Тогда гармоники, имеющие большую дисперсию (и соответственно, амплитуду), будут представлены «пиками» на соответствующем графике спектра.

Чтобы *восстановить* исходный процесс по нескольким значимым гармоникам, необходимо прибегнуть к процедуре гармонического анализа на основе рассчитанной периодограммы. По таблицам и графикам периодограмм, полученных методом БПФ нужно определить периоды для пиков спектра, а потом для этих периодов провести гармонический анализ.

3.4. Взаимнокорреляционный анализ (кросскорреляция)

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.

Взаимная корреляция (кросскорреляция) – это корреляция двух статистических рядов друг с другом при разных сдвигах во времени. Принцип расчета взаимнокорреляционной функции (ВКФ) аналогичен расчету АКФ.

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 τ (сдвига) и соединить плавной кривой, получим **взаимнокорреляционную функцию**.

Так как ВКФ представляет собой совокупность коэффициентов корреляции, то их можно проверить на значимость или рассчитать *уровень значимости ВКФ* на каждом сдвиге, аналогично АКФ

Тогда все значения ВКФ, превышающие (по модулю) уровень значимости являются *значимыми*, а значения ВКФ между уровнями значимости статистически равны нулю.

Оценка асинхронной связи между двумя характеристиками. Если на ВКФ присутствует один значимый коэффициент корреляции на сдвиге $\tau = 0$, эти две характеристики связаны *синхронно*.

Если на ВКФ присутствуют один или несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит, эти две характеристики связаны *асинхронно*.

Если на ВКФ нет значимых коэффициентов корреляции, эти две характеристики линейно не связаны.

Направление запаздывания. Если асинхронные связи обнаружены, определяется *направление запаздывания*: какая характеристика изменяется раньше, а какая позже. Этому соответствуют разные направления сдвигов ВКФ (положительное или отрицательное).

Возможность прогноза. Если в ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, то теоретически, можно сделать прогноз. Тогда заблаговременность прогноза определится, как сдвиг, при котором коэффициент корреляции значим.

Модель прогноза. Основанный на ВКФ прогноз любой заблаговременности выполняется на основе модели парной линейной регрессии [14].

3.5. Множественная линейная регрессия

Чаще всего, любая физическая характеристика связана не с одной, а с *несколькими* другими физическими характеристиками. Тогда для определения этой связи можно рассчитать **множественную линейную регрессию (МЛР)** [13].

Общее уравнение связи переменных может быть сформулировано в виде:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_mX_m + b + \varepsilon, \quad (3.7)$$

где Y – зависимая переменная; X_i – i -тая независимая переменная ($i = 1 \div m$); a_i – коэффициент регрессии при i -той переменной; b – свободный член; ε – остатки модели.

Качество модели множественной линейной регрессии, так же как и для простой линейной регрессии, определяется по **параметрам (характеристикам) МЛР**. Модель считается качественной, если выполняются следующие условия:

1. Все коэффициенты регрессии значимы.
2. Коэффициент детерминации больше 0,70. Это свидетельствует о том, что независимых переменных достаточно для описания дисперсии исходного ряда.
3. Модель должна быть адекватна по F -критерию.
4. Стандартная ошибка модели должна быть меньше стандартного отклонения ряда зависимой переменной.

Коэффициенты регрессии и их значимость:

Для оценки значимости коэффициентов регрессии рассчитываются критерии Стьюдента:

$$t_{ai}^* = \frac{|a_i|}{\sigma_{ai}} \quad (3.8)$$

$$t_b^* = \frac{|b|}{\sigma_b} \quad (3.9)$$

где σ_{ai} и σ_b – стандартные случайные погрешности расчета коэффициентов a_i и b (рассчитываются совместно с расчетом коэффициентов).

Критическое значение $t_{кр}$ (α , ν) определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu = N - m - 1$, где N – длина ряда, m – количество независимых переменных.

Далее сравнивается t^* с $t_{кр}$ (по модулю).

Если $t^* > t_{кр}$ значит, соответствующий коэффициент регрессии значим.

Адекватность регрессионной модели:

Для оценки адекватности регрессионной модели используется критерий Фишера:

$$F^* = \frac{D_y}{D_\varepsilon} \cdot \frac{N}{m} \quad (3.10)$$

где D_y – дисперсия модели, D_ε – дисперсия остатков регрессии, N – длина ряда, m – количество независимых переменных.

Критическое значение $F_{кр}$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu_1 = m$, $\nu_2 = N - m - 1$.

Далее сравнивается F^* с $F_{кр}$ и если $F^* > F_{кр}$ то это означает адекватность регрессионной модели.

4. Исследование влияния факторов среды на промысел криля

4.1. Описание исходных данных

В работе использовались данные среднегодовых значений выловов криля (в тоннах), суммарной концентрации хлорофилла до глубины 200 метров (в мг/м³), концентрации морского льда (от 0 до 1) и парциального давления углекислого газа в воде (в Па) в 48 промысловом районе (по FAO) и его подрайонах 48.1-2-3, за период с 1993 по 2019 года.

Данные по выловам криля брались с сайта комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ) [7].

Данные концентрации хлорофилла, морского льда и парциального давления углекислого газа в воде брались с сайта морского сервиса программы Коперникус [15].

4.2. Оценка взаимосвязи исследуемых характеристик

Для рядов исходных значений были рассчитаны корреляционные матрицы по подрайонам (таблицы 4.1-4). Все коэффициенты корреляции проверялись на значимость по критерию Стьюдента, значимые коэффициенты корреляции в матрицах отмечены желтым цветом.

Из таблиц 4.1-4 видно, что во всех подрайонах наблюдается значимая прямая связь между выловами криля (K_{gr}) и концентрацией хлорофилла (Chl). В данном случае концентрацией хлорофилла в воде выражена биомасса фитопланктона, которым питается криль. Также во всех подрайонах наблюдается значимая прямая связь между концентрацией хлорофилла Chl и парциальным давлением углекислого газа в воде (pCO_2), при этом коэффициент корреляции у них выше, чем у выловов криля и концентрации

хлорофилла. Высокий коэффициент можно объяснить схожестью трендов характеристик.

Таблица 4.1 - Корреляционная матрица для подрайона 48.1 (Антарктический полуостров)

48.1	<i>Kri</i>	<i>Chl</i>	<i>pCO2</i>	<i>T</i>	<i>Ice</i>
<i>Kri</i>	1				
<i>Chl</i>	0,361	1			
<i>pCO2</i>	0,474	0,804	1		
<i>T</i>	-0,249	-0,309	-0,269	1	
<i>Ice</i>	0,240	0,081	0,264	-0,494	1

Таблица 4.2 - Корреляционная матрица для подрайона 48.2 (Южные Оркнейские острова)

48.2	<i>Kri</i>	<i>Chl</i>	<i>pCO2</i>	<i>T</i>	<i>Ice</i>
<i>Kri</i>	1				
<i>Chl</i>	0,517	1			
<i>pCO2</i>	0,492	0,770	1		
<i>T</i>	0,344	-0,114	-0,055	1	
<i>Ice</i>	-0,365	-0,003	-0,063	-0,852	1

Таблица 4.3 - Корреляционная матрица для подрайона 48.3 (Южная Георгия)

48.3	<i>Kri</i>	<i>Chl</i>	<i>pCO2</i>	<i>T</i>	<i>Ice</i>
<i>Kri</i>	1				
<i>Chl</i>	0,401	1			
<i>pCO2</i>	0,320	0,922	1		
<i>T</i>	-0,398	0,048	0,123	1	
<i>Ice</i>	0,158	-0,320	-0,365	-0,315	1

Таблица 4.4 - Корреляционная матрица для 48 промышленного района.

48	<i>Kri</i>	<i>Chl</i>	<i>pCO2</i>	<i>T</i>	<i>Ice</i>
<i>Kri</i>	1				
<i>Chl</i>	0,668	1			
<i>pCO2</i>	0,766	0,876	1		
<i>T</i>	-0,180	-0,093	-0,051	1	
<i>Ice</i>	0,212	0,088	0,136	-0,615	1

У подрайонов 48.1 и 48.2 (таблицы 4.1-2 соответственно) выявляется значимая связь между выловами криля K_{ri} и парциальным давлением углекислого газа в воде pCO_2 . Она же выражается и в общем промысловом районе. Однако в подрайоне 48.3 не выявляется. Вероятно, это выражается косвенное влияние фитопланктона (концентрации хлорофилла) на выловы криля, которые подрайоне 48.3 ниже.

У подрайона 48.2 (таблица 4.2) выявлена значимая обратная связь между выловами криля K_{ri} и концентрация морского льда I_{ce} . По-видимому, именно в подрайоне Южных Оркнейских островов криль в наибольшей степени зависит от ледовых условий, вероятнее всего из-за выраженной сезонности в данном подрайоне.

У подрайона 48.3 (таблица 4.3) выявлена значимая обратная связь между выловами криля K_{ri} и температурой поверхности океана T . По-видимому, именно в подрайоне острова Южная Георгия криль в наибольшей степени зависит от температурного режима.

В общем 48 промысловом районе (таблица 4.4.) выявляются значимые прямые связи между выловами криля K_{ri} , концентрацией хлорофилла Chl и парциальным давлением углекислого газа в воде pCO_2 . Также между концентрацией хлорофилла Chl и парциальным давлением углекислого газа в воде pCO_2 и обратная связь между температурой поверхности океана T и концентрацией морского льда I_{ce} . Значимой взаимосвязи выловов криля с температурой поверхности океана и концентрацией морского льда не выявляется.

В целом для криля видно, что существует значимая связь между его промыслом с концентрацией хлорофилла и в меньшей степени парциального давления углекислого газа. Также в северном подрайоне 48.3 с температурой поверхности океана и в южном подрайоне 48.2 с концентрацией морского льда.

4.3. Временная изменчивость исследуемых характеристик

Для исходных рядов среднегодовых значений были получены уравнения регрессии линейного и нелинейного трендов. Затем были построены графики временного хода исходного ряда, на который были нанесены рассчитанные значения линейного и нелинейного трендов.

Во всех подрайонах наблюдается положительный тренд выловов криля (рисунок 4.1-3), он же наблюдается и в общем промышленном районе (рисунок 4.4). Нелинейный тренд во всех подрайонах указывает на ускорение роста характеристики примерно с 2005 года. Наиболее выраженные тренды в подрайоне 48.1: оба значимы, но предпочтительнее будет нелинейный тренд, т.к. у него наибольший коэффициент корреляции и он лучше описывает ход исходной характеристики. Аналогично и в подрайонах 48.2-3. Интересно, что значимость нелинейного тренда падает от юга к северу, то есть увеличение промысла криля в северных широтах выражено более линейно, нежели в южных широтах.

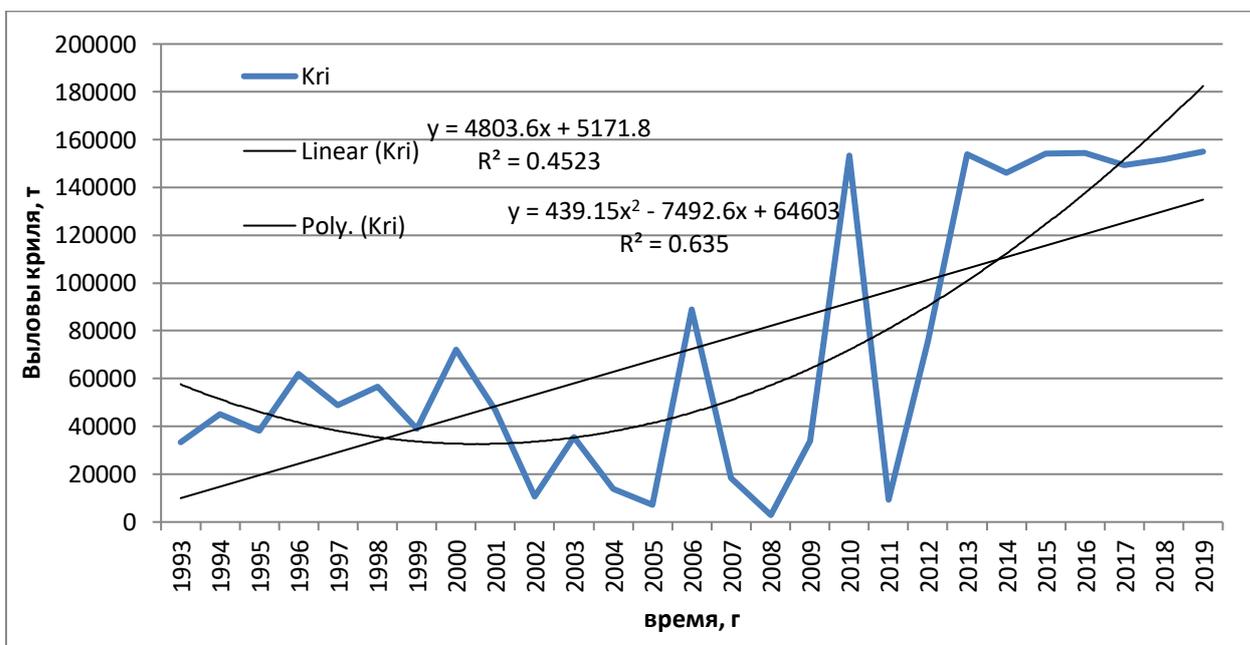


Рисунок 4.1 Среднегодовая изменчивость значений выловов криля в подрайоне 48.1 и его линейный и нелинейный тренды

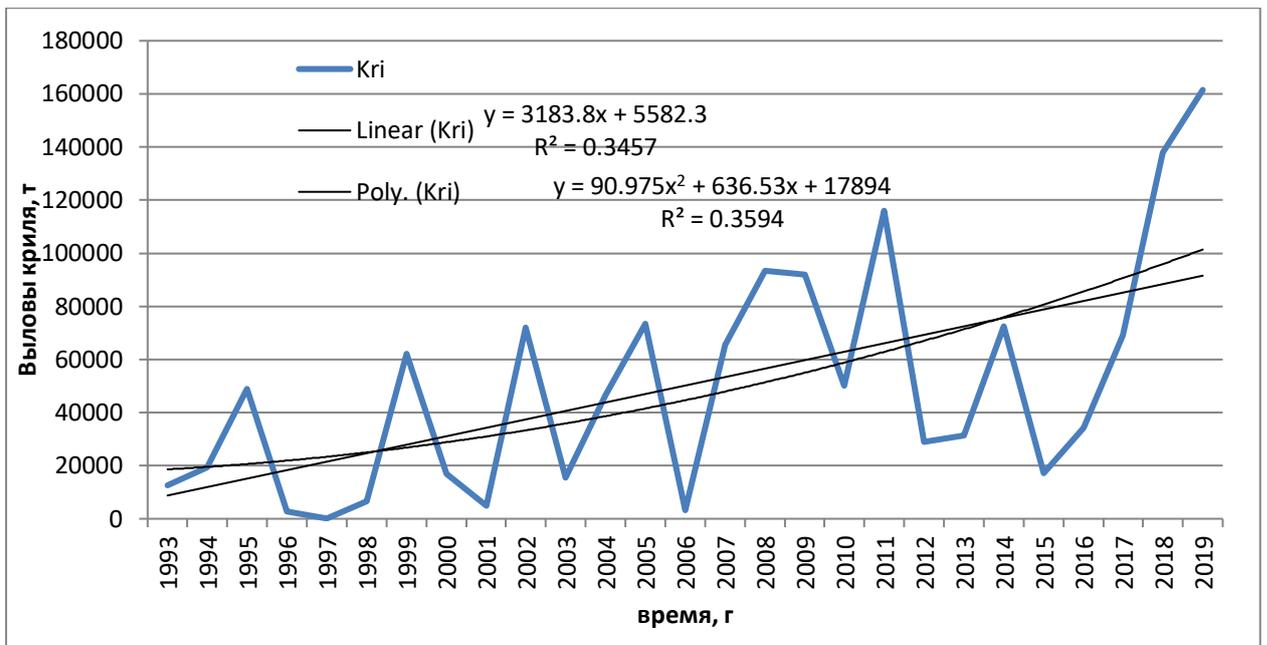


Рисунок 4.2. Среднегодовая изменчивость значений выловов криля в подрайоне 48.2 и его линейный и нелинейный тренды

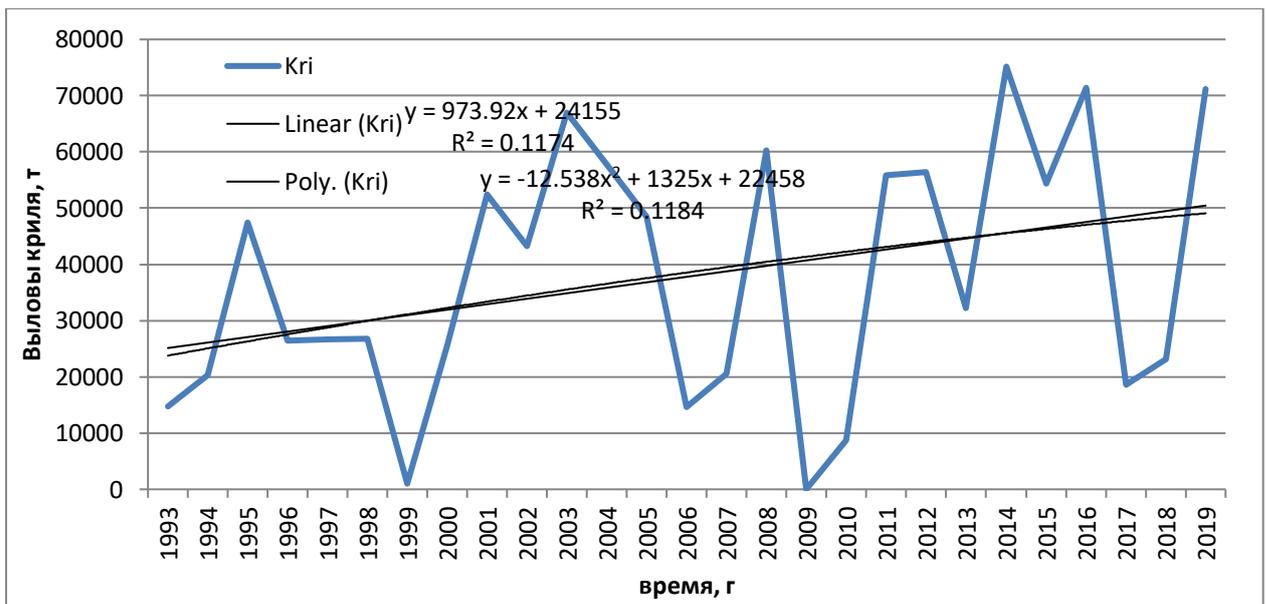


Рисунок 4.3. Среднегодовая изменчивость значений выловов криля в подрайоне 48.3 и его линейный и нелинейный тренды

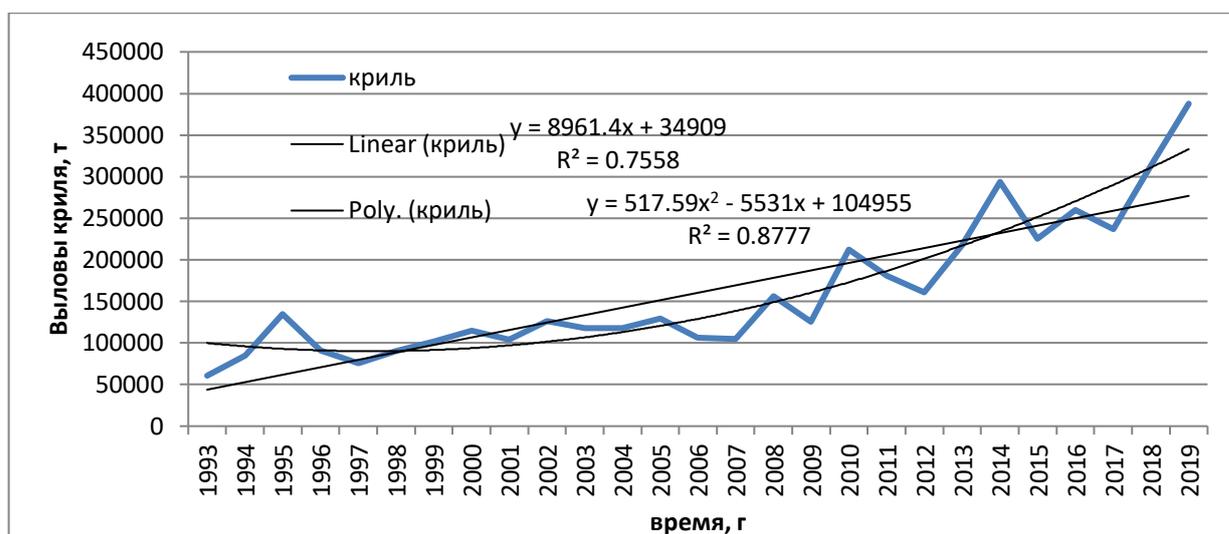


Рисунок 4.4. Среднегодовая изменчивость значений выловов криля в 48 промышленном районе и его линейный и нелинейный тренды

Во всех подрайонах наблюдается положительный тренд концентрации хлорофилла в воде (рисунок 4.5-7), он же наблюдается и в общем промышленном районе (рисунок 4.8). Нелинейный тренд во всех подрайонах указывает на замедление роста характеристики примерно с 2012 года. Наиболее выраженные тренды в подрайоне 48.1: оба значимы, но предпочтительнее будет нелинейный тренд, т.к. у него наибольший коэффициент корреляции и он лучше описывает ход исходной характеристики. Аналогично и в подрайонах 48.2-3.

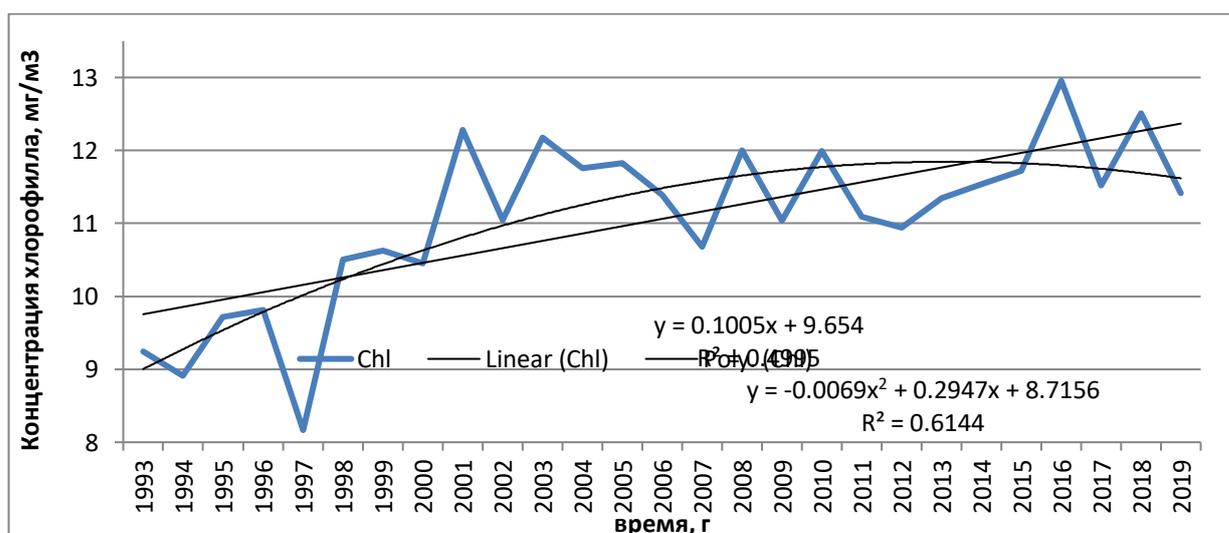


Рисунок 4.5. Среднегодовая изменчивость значений концентрации хлорофилла в подрайоне 48.1 и его линейный и нелинейный тренды

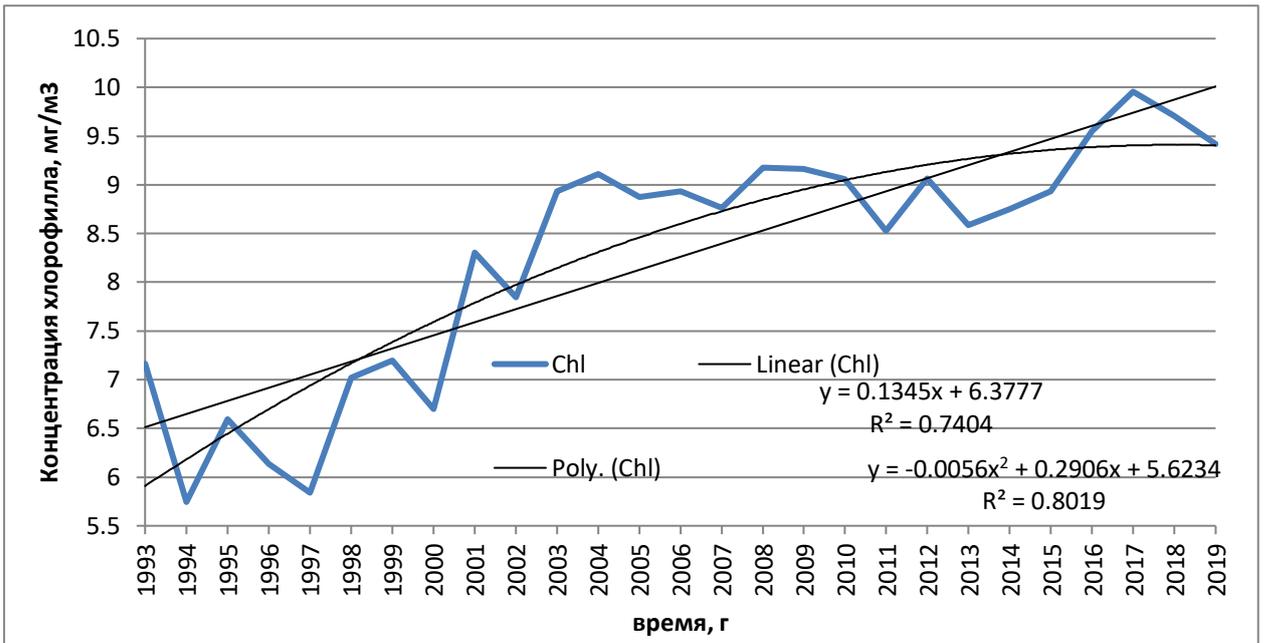


Рисунок 4.6. Среднегодовая изменчивость значений концентрации хлорофилла в подрайоне 48.2 и его линейный и нелинейный тренды

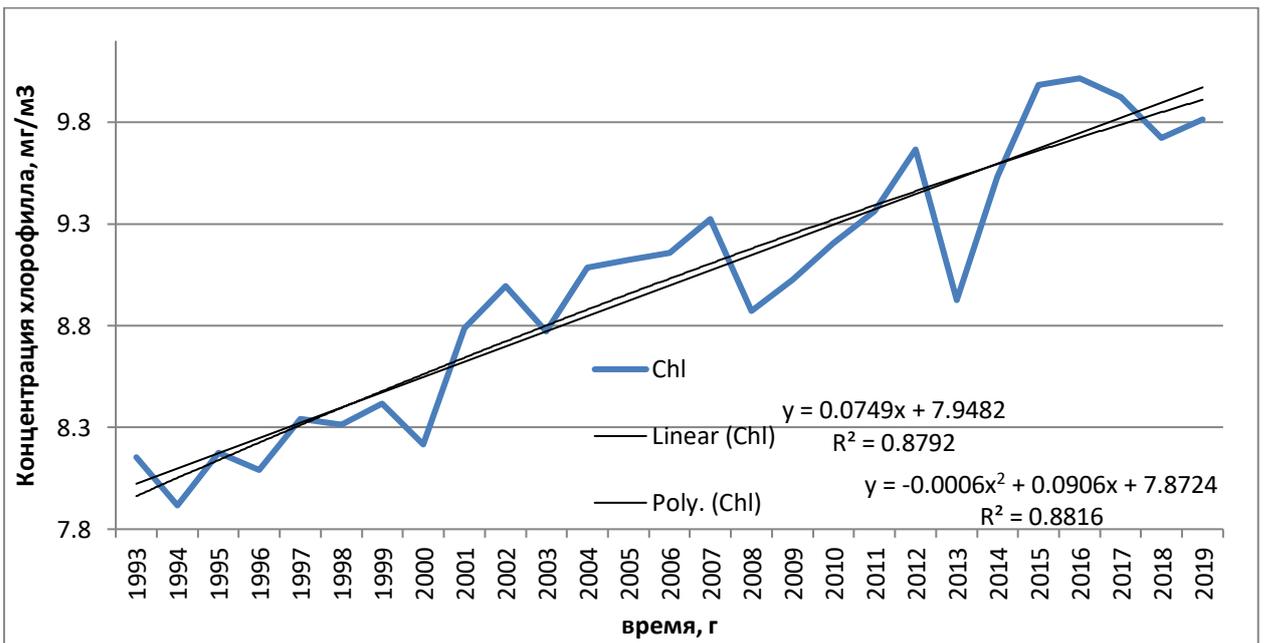


Рисунок 4.7. Среднегодовая изменчивость значений концентрации хлорофилла в подрайоне 48.3 и его линейный и нелинейный тренды

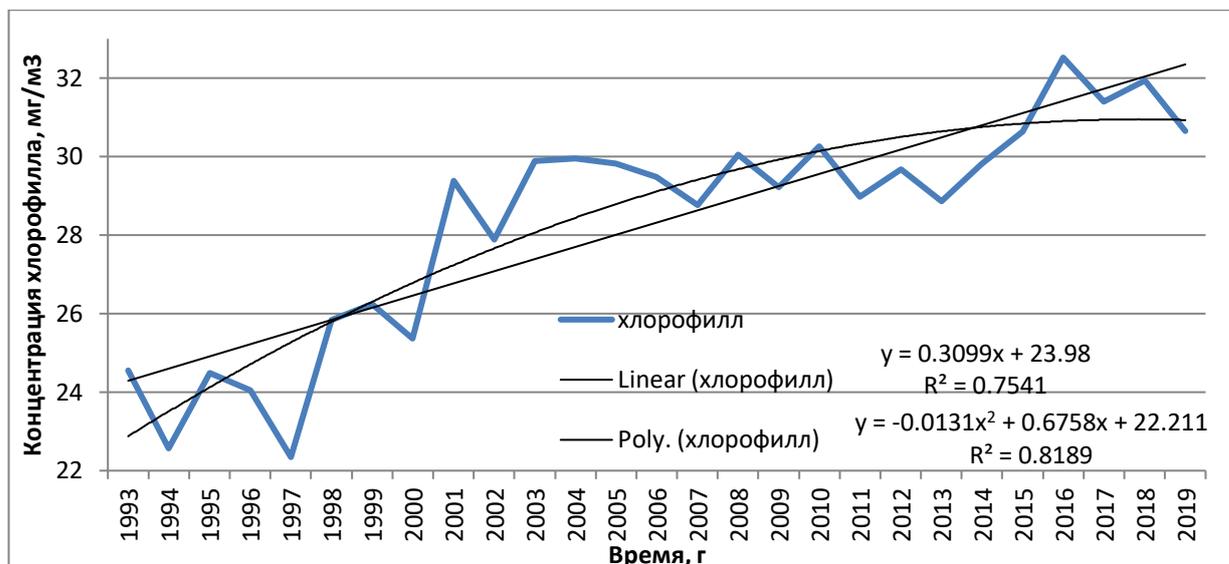


Рисунок 4.8. Среднегодовая изменчивость значений концентрации хлорофилла в 48 промышленном районе и его линейный и нелинейный тренды.

Как видно на рисунке 4.9 тренды указывают на положительный рост парциального давления углекислого газа в воде. Оба тренда значимы, но нелинейный тренд будет предпочтительнее, так как у него наибольший коэффициент корреляции. Нелинейный тренд указывает на замедление роста характеристики примерно с 2007 года, что схоже с трендами концентрации хлорофилла.

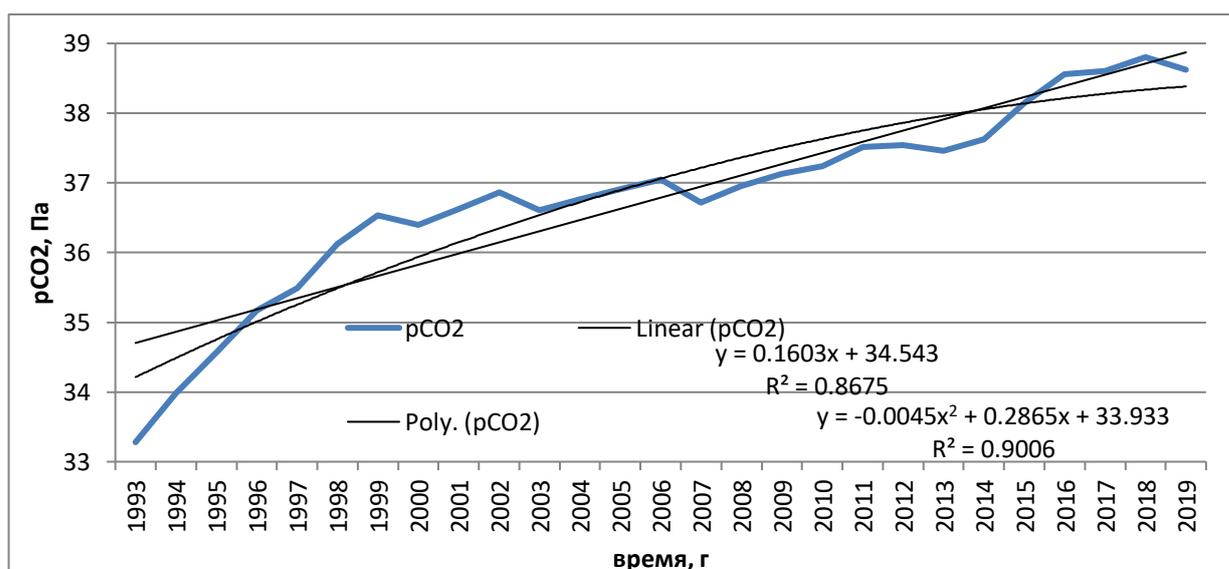


Рисунок 4.9. Среднегодовая изменчивость значений парциального давления углекислого газа в воде в 48 промышленном районе и его линейный и нелинейный тренды

Как видно на рисунке 4.10 среднегодовая температура поверхности океана мало изменяется за весь промежуток времени. Вклад трендов в общую дисперсию ряда незначим. В этом случае считается, что трендов нет.

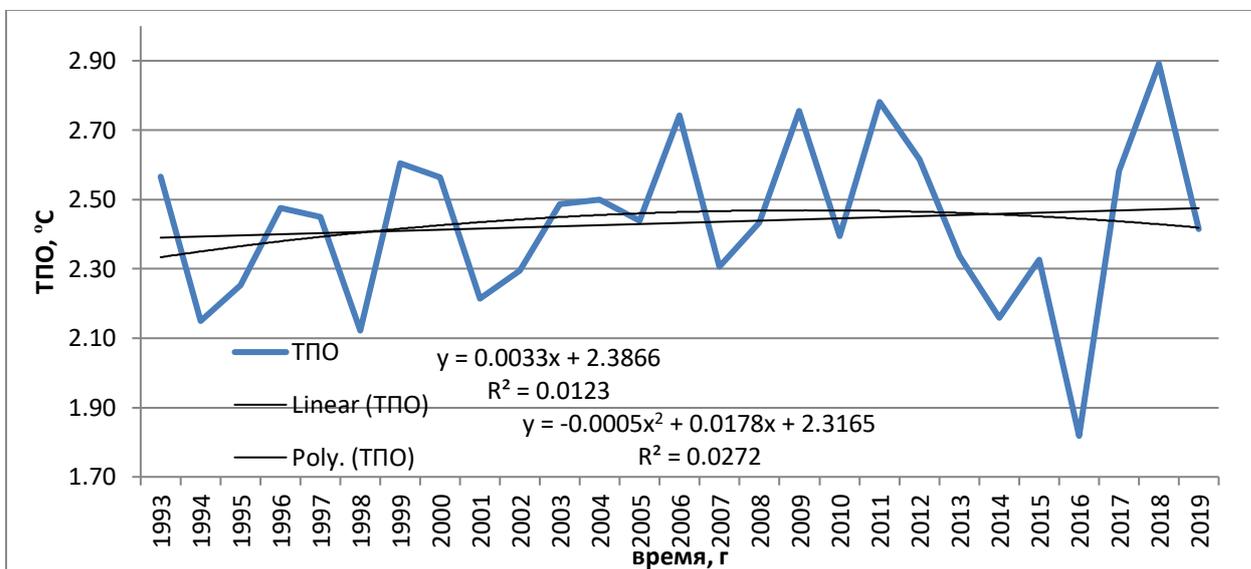


Рисунок 4.10. Среднегодовая изменчивость значений температуры поверхности океана в подрайоне 48.3 и его линейный и нелинейный тренды

Как видно на рисунке 4.11 вклад трендов в общую дисперсию ряда незначим. В этом случае считается, что трендов нет.

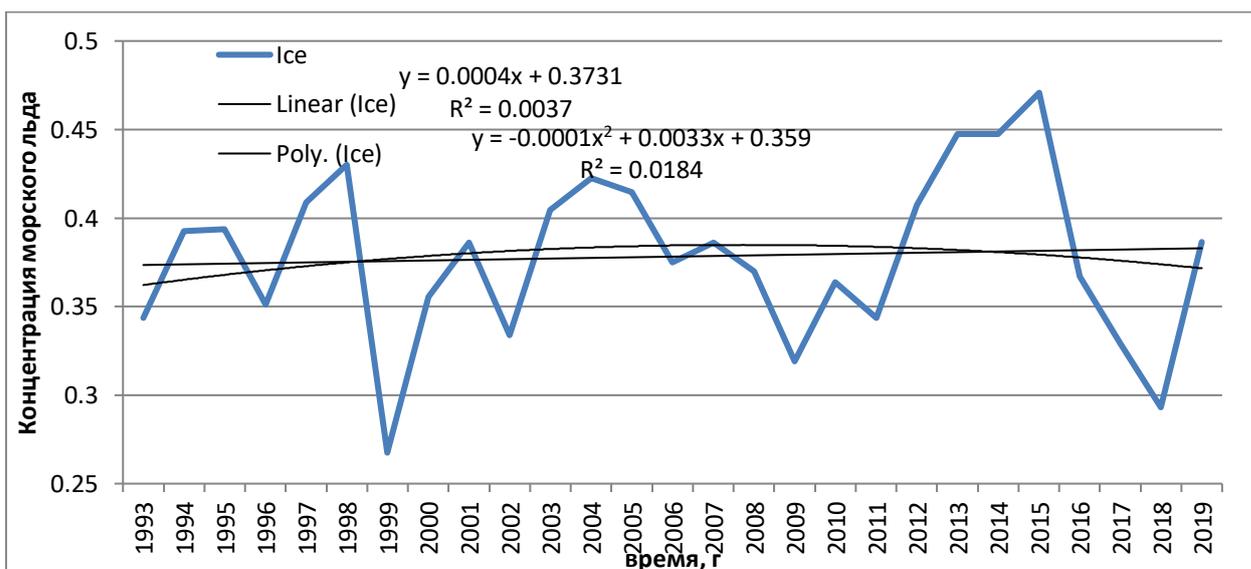


Рисунок 4.11. Среднегодовая изменчивость значений концентрации морского льда в подрайоне 48.2 и его линейный и нелинейный тренды

4.4. Циклическая структура выловов криля и его кормовой базы

Из рядов исходных значений выловов криля (Kri) и концентрации хлорофилла (Chl) были удалены нелинейные тренды. По получившимся рядам отклонений (AKri и AChl соответственно) с помощью программы Past3 были построены периодограммы (рисунки 4.12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26). По ним выделялись гармоники и рассчитывались их характеристики. Затем по формулам гармоник, как сумме значимых гармоник восстанавливались ряды отклонений, и строились их совмещенные графики.

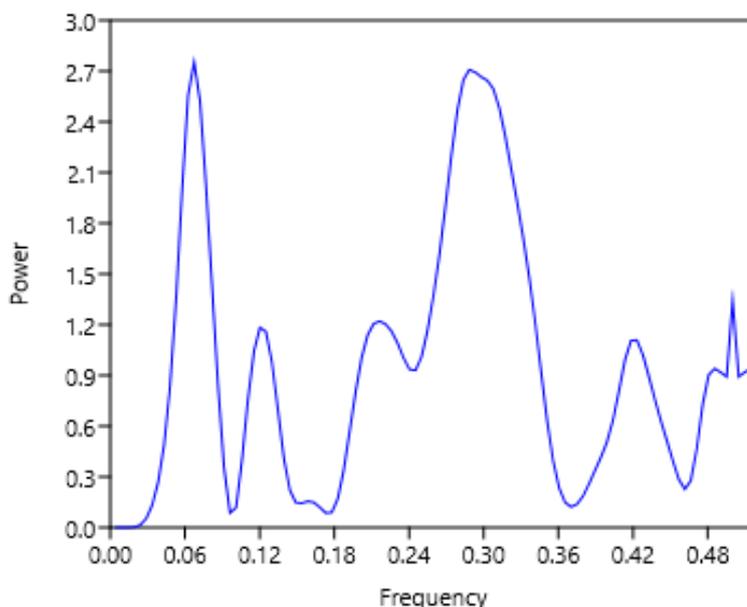


Рисунок 4.12. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений выловов криля в подрайоне 48.1

Как видно из рисунка 4.12 на периодограмме выделяется 6 пиков. Они соответствуют 6 выявленным у данной характеристики циклическим колебаниям, т.е. 6 гармоникам.

Как видно из таблицы 4.5, среди выявленных гармоник были обнаружены три значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с

периодами 14,86, 3,47, и 2 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 14,86 годовом периоде это 21004 тонн, на 3,47 годовом 21533 тонны, на 2 летнем 17512 тонн. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 14,86 годовом периоде – 6,98 лет, на 3,47 годовом – 0,46 лет, на 2 летнем – $1,43E-15$ года. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 52%.

Таблица 4.5 - Характеристики гармоник для ряда АКгі в подрайоне 48.1

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
Частота, 1/год	0,07	0,29	0,50
Период, год	14,86	3,47	2,00
А, т	21004,81	21533,70	17512,89
Фаза, лет	6,98	0,46	-1,43E-15
Вклад гармоники в ряд АКгі	0,19	0,20	0,13
Эмпирический к-т Стьюдента	2,67	2,77	2,08
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06

Как видно из рисунка 4.13 гармоники неплохо описывают ряд остатков значений вылова криля. Дисперсия суммы гармоник почти совпадает с дисперсией ряда остатков, ход характеристики почти всегда соблюдается. Хуже всего описывается 2008 год и время после 2013 года, хотя к 2019 году гармоники также описывают понижение характеристики.

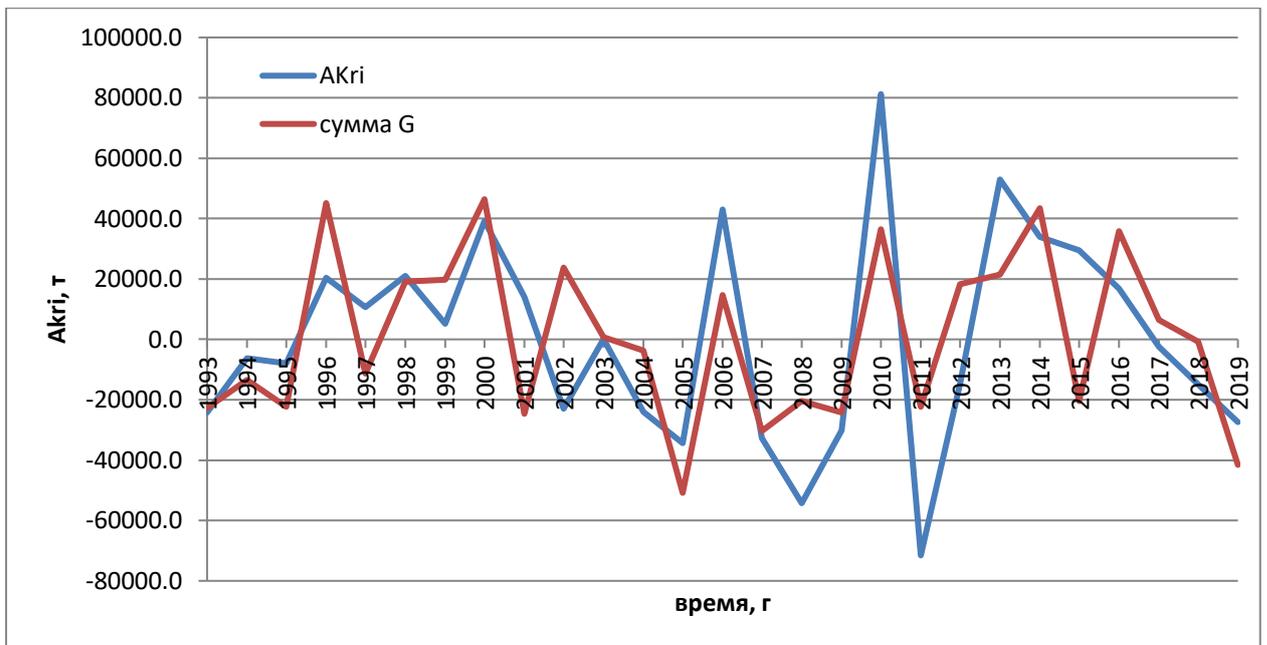


Рисунок 4.13. График исходных и восстановленных значений АКри в подрайоне 48.1

Как видно из рисунка 4.14 в подрайоне 48.2 на периодограмме для ряда среднегодовых отклонений выловов криля выделяется 7 пиков. Они соответствуют 7 выявленным у данной характеристики циклическим колебаниям, т.е. 7 гармоникам.

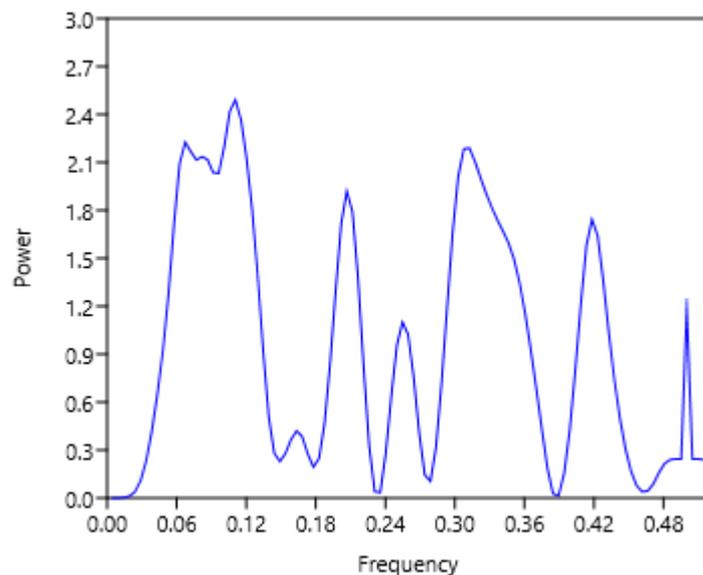


Рис 4.14. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений выловов криля в подрайоне 48.2

Как видно из таблицы 4.6, среди выявленных гармоник было обнаружено четыре значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающих циклы с периодами 14,86, 9,04, 4,84 и 3,2 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 14,86 годовом периоде это 19067 тонн, на 9,04 годовом 20861 тонны, на 4,84 годовом 18257 тонн, на 3,2 годовом 19549 тонн. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 14,86 годовом периоде – 7,32 лет, на 9,04 годовом – 0,16 года, на 4,84 годовом – 2,32 года, на 3,2 годовом – 0,07 года. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 64%.

Таблица 4.6 - Характеристики гармоник для ряда АКгі в подрайоне 48.2

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4
Частота, 1/год	0,07	0,11	0,21	0,31
Период, год	14,86	9,04	4,84	3,20
А, т	19067,24	20861,80	18257,16	19549,75
Фаза, лет	7,32	-0,16	2,32	0,07
Вклад гармоники в ряд АКгі	0,154	0,18	0,14	0,16
Эмпирический к-т Стьюдента	2,32	2,63	2,18	2,40
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06	2,06

Как видно из рисунка 4.15 гармоники хорошо описывают ход ряда остатков вылова криля. Единственное время, которое гармоники не описали это 2019 год. Стоит отметить, что, не смотря на высокий вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда, получившийся график почти никогда точно не попадает в экстремумы ряда остатков.

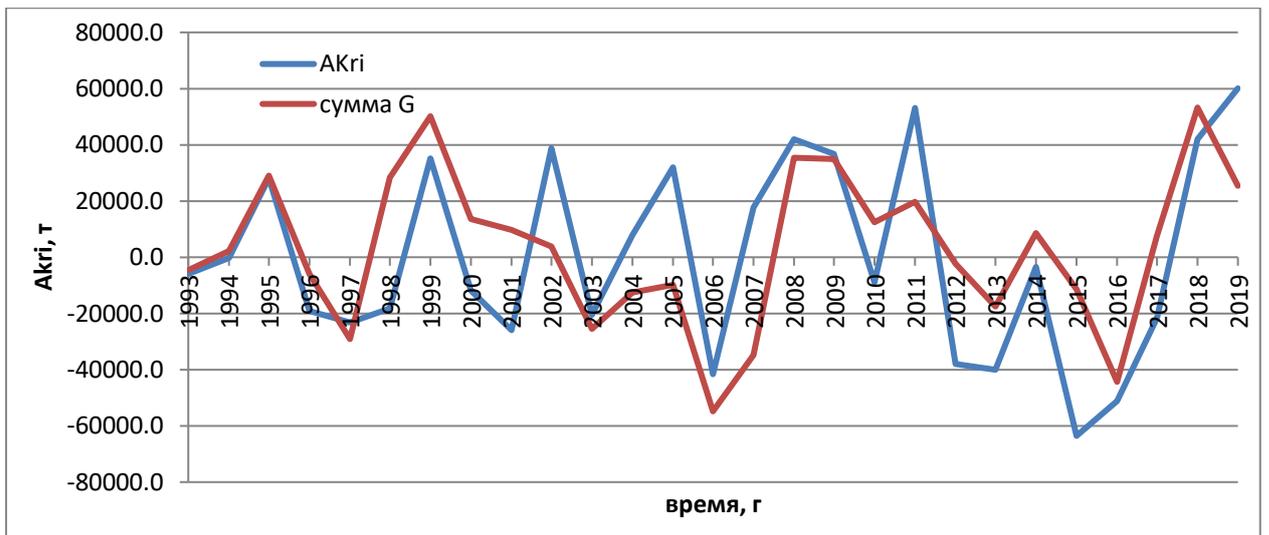


Рисунок 4.15. График исходных и восстановленных значений АКri в подрайоне 48.2

Как видно из рисунка 4.16 в подрайоне 48.3 на периодограмме для ряда среднегодовых отклонений выловов криля выделяется четыре пика. Они соответствуют 4 выявленным у данной характеристики гармоникам.

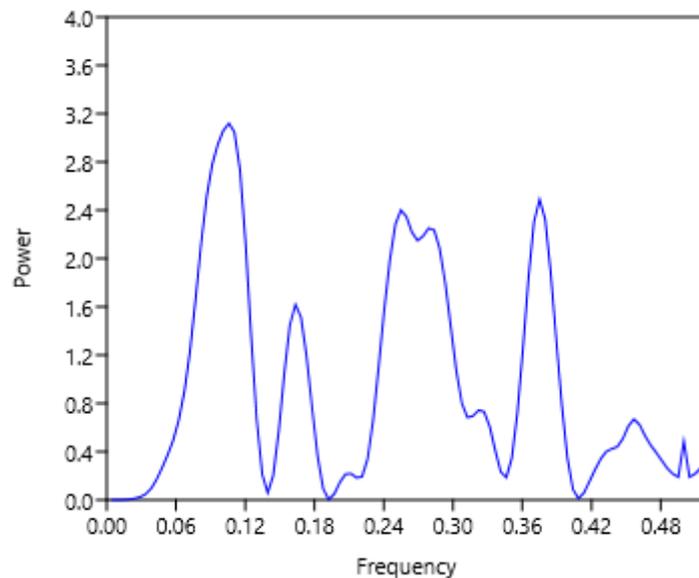


Рисунок 4.16. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений выловов криля в подрайоне 48.3

Как видно из таблицы 4.7, среди выявленных гармоник было обнаружено четыре значимые гармоники (у которых эмпирический

коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с периодами 9,45, 3,92, 3,59 и 2,67 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 9,45 годовом периоде это 14743 тонны, на 3,92 годовом 12567 тонн, на 3,59 годовом – 12214 тонн, на 2,67 годовом 12807 тонн. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 9,45 годовом периоде – 2,22 лет, на 3,92 годовом – 0,08 года, на 3,59 годовом – 1,71 лет, на 2,67 годовом – 0,28 года. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 77%.

Таблица 4.7 - Характеристики гармоник для ряда АКгі в подрайоне 48.3

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4
Частота, 1/год	0,11	0,25	0,28	0,38
Период, год	9,45	3,92	3,59	2,67
А, т	14743,55	12567,22	12214,04	12807,66
Фаза, лет	2,22	-0,08	1,71	0,28
Вклад гармоника в ряд АКгі	0,242	0,176	0,166	0,183
Эмпирический к-т Стьюдента	3,24	2,54	2,44	2,61
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06	2,06

Как видно из рисунка 4.17 гармоники неплохо описывают ряд остатков выловов криля. Местами гармоники на год позже описывают минимальные значения, как в 2006-07 годах, в 2009-10 годах, хотя в 2017-18 годах гармоники правильно описали минимум. Дисперсия гармоник и ряда остатков почти полностью совпадают.

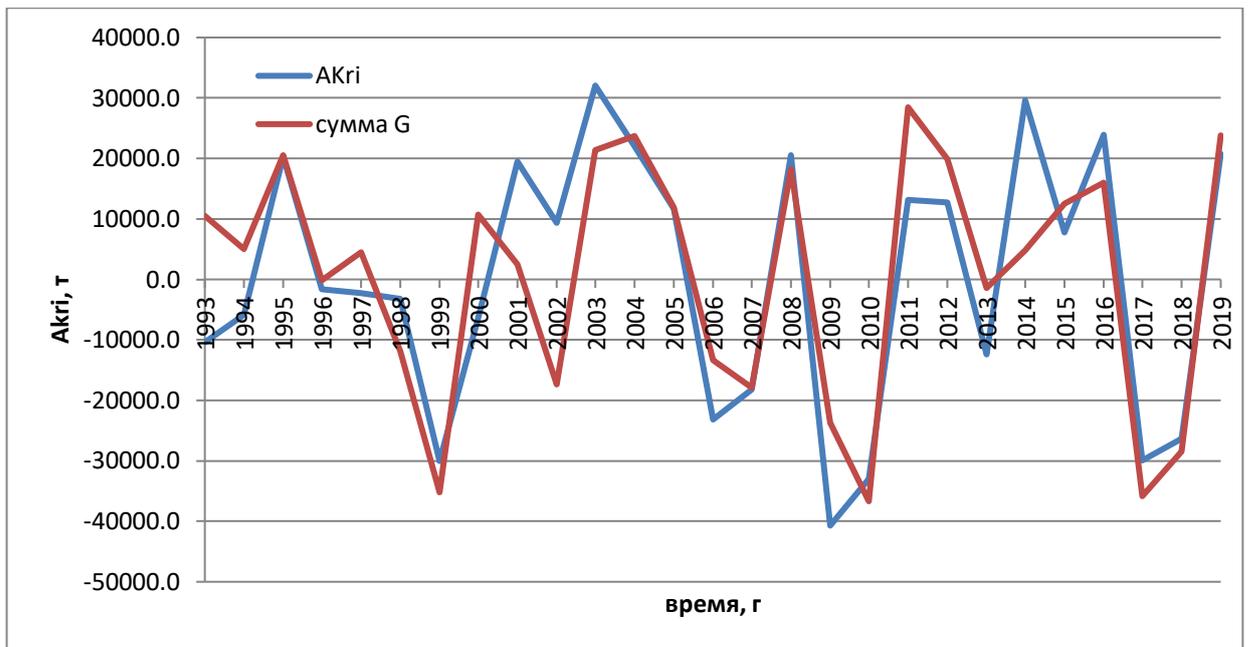


Рисунок 4.17. График исходных и восстановленных значений АКri в подрайоне 48.3

Как видно из рисунка 4.18 в 48 промышленном районе на периодограмме для ряда среднегодовых отклонений выловов криля выделяется 8 пиков. Они соответствуют 8 выявленным у данной характеристики гармоникам.

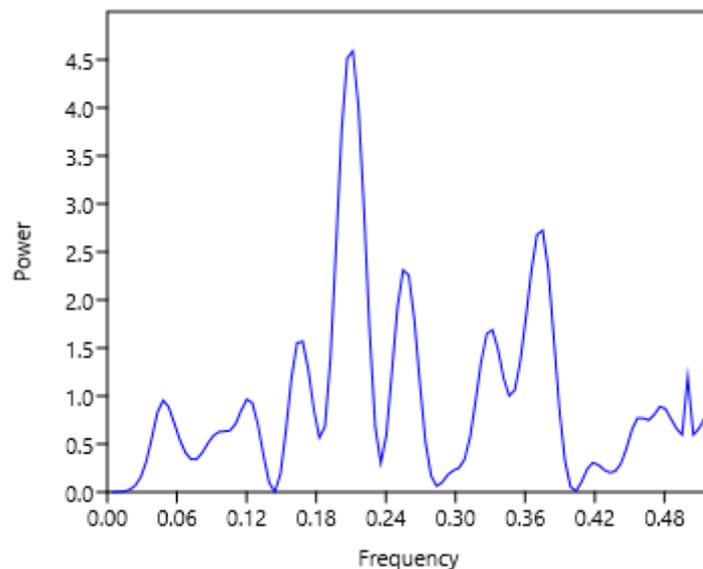


Рисунок 4.18. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений выловов криля в 48 промышленном районе.

Как видно из таблицы 4.8, среди выявленных гармоник было обнаружено три значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с периодами 4,73, 3,92, и 2,67 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 4,73 годовом периоде это 10626 тонн, на 3,92 годовом 16854 тонны, на 2,67 годовом 17838 тонн. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 4,73 годовом периоде – 3,27 лет, на 3,92 годовом – 2,9 лет, на 2,67 годовом – 0,02 года, т.е. примерно 7 дней. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 72%.

Таблица 4.8 - Характеристики гармоник для ряда АКгi в 48 районе.

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
Частота, 1/год	0,21	0,25	0,38
Период, год	4,73	3,92	2,67
A, тонны	10626,95	16854,46	17838,71
Фаза, лет	3,27	2,90	0,02
Вклад гармоники в ряд откл Кгi	0,35	0,17	0,19
Эмпирический к-т Стьюдента	4,58	2,52	2,74
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06

Как видно из рисунка 4.19 гармоники неплохо описывают ряд остатков криля. Ход соблюдается, дисперсия гармоник близка к дисперсии ряда остатков. Лучше всего гармоники описывают резкие и крайние изменения исходной характеристики. Гармоники совсем не описали изменения в 2015-16 годах, и пик в 2002 году.

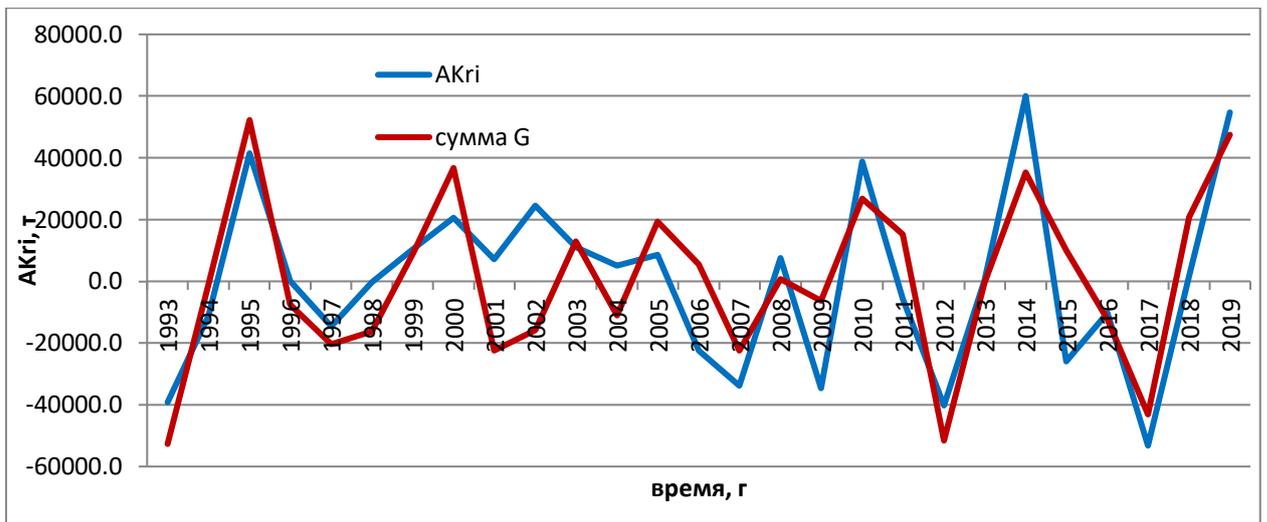


Рисунок 4.19. График исходных и восстановленных значений АКгi в 48 промышленном районе

В итоге для ряда остатков вылова криля у подрайона 48.1 выделяется 3 гармоника (периоды 14,86, 3,47, и 2 года), у подрайона 48.2 – 4 гармоника (периоды 14,86, 9,04, 4,84 и 3,2 года), у подрайона 48.3 – 4 гармоника (периоды 9,45, 3,92, 3,59 и 2,67 года), а в общем 48 промышленном районе 3 гармоника (периоды 4,73, 3,92, и 2,67 года).

Как видно, наибольший вклад в циклические изменения в общем районе оказывает подрайон 48.3, также видно, что гармоника с периодом почти в 5 лет, помимо общего района, выявляется только в подрайоне 48.2, то есть значимость циклических составляющих подрайонов увеличивается с движением на север.

Стоит отметить, что долгопериодные колебания характеристики, выявленные во всех подрайонах, не выявляются в общем промышленном районе.

Как видно из рисунка 4.20 в подрайоне 48.1 на периодограмме для ряда среднегодовых отклонений концентрации хлорофилла (AChl) выделяется 6 пиков. Они соответствуют 6 выявленным у данной характеристики циклическим колебаниям, т.е. 6 гармоникам.

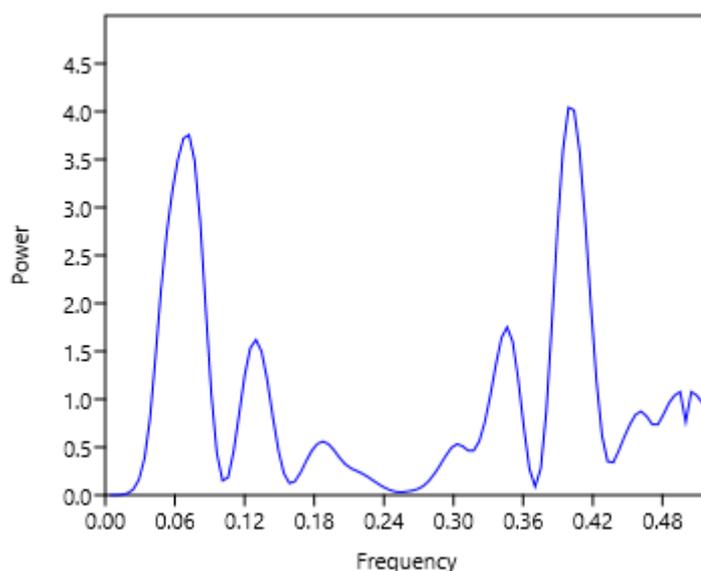


Рисунок 4.20. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений концентрации хлорофилла в подрайоне 48.1

Как видно из таблицы 4.9, среди выявленных гармоник было обнаружено три значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с периодами 13,87, 2,89, и 2,51 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 13,87 годовом периоде это 0,53 мг/м³, на 2,89 годовом 0,36 мг/м³, на 2,51 годовом 0,54 мг/м³. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 13,87 годовом периоде – 2,66 лет, на 2,89 годовом – 0,61 лет, на 2,51 годовом – 1,13 лет. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 71%.

Таблица 4.9 - Характеристики гармоник для ряда АСhl в подрайоне 48.1

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
Частота, 1/год	0,07	0,35	0,40
Период, год	13,87	2,89	2,51
А, мг/м ³	0,53	0,36	0,54
Фаза, лет	-2,66	0,61	1,13
Вклад гармоники в ряд АСhl	0,28	0,13	0,30
Эмпирический к-т Стьюдента	3,73	2,062	3,92
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06

На рисунке 4.21 показано, что гармоники в целом хорошо описывают ход ряда отклонений концентрации хлорофилла в воде. Дисперсия гармоник почти равна дисперсии отклонений. Гармоники плохо описали временной промежуток с 2004 по 2007 года.

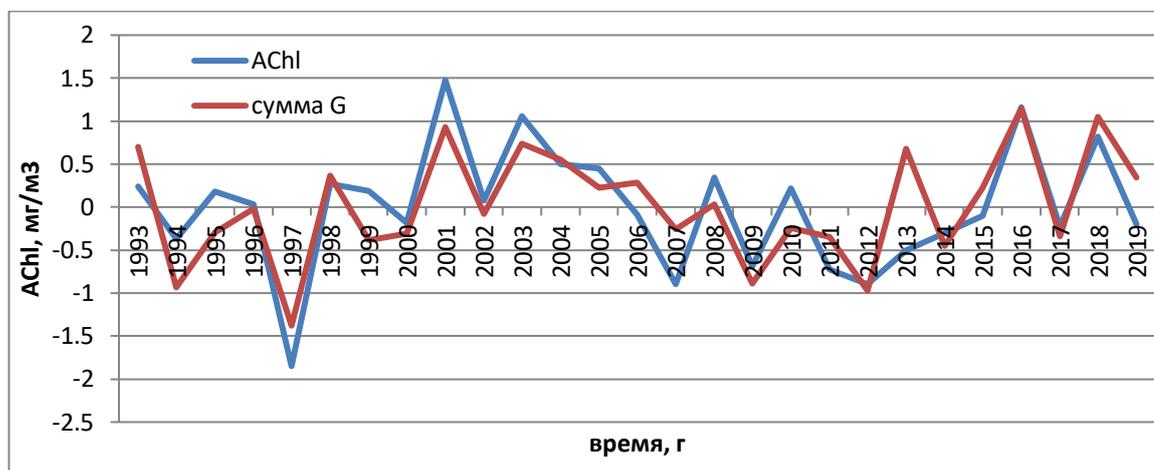


Рисунок 4.21. График исходных и восстановленных значений AChl в подрайоне 48.1

Как видно из рисунка 4.22 в подрайоне 48.2 на периодограмме для ряда среднегодовых значений отклонений концентрации хлорофилла (AChl) выделяется 7 пиков. Они соответствуют 7 выявленным у данной характеристики гармоникам.

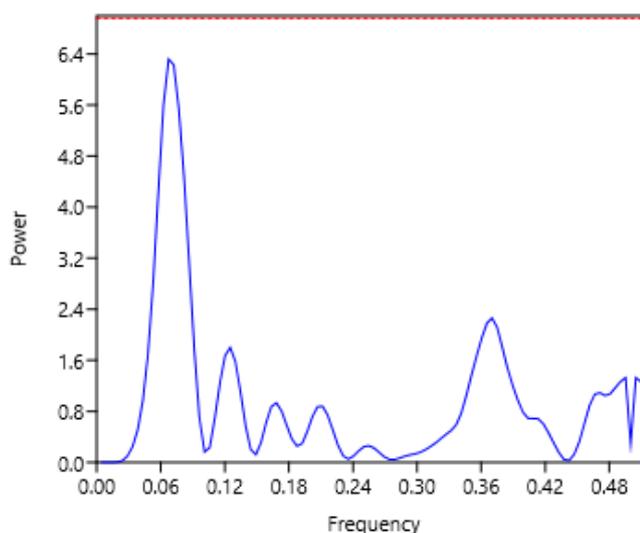


Рисунок 4.22. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений Chl в подрайоне 48.2

Как видно из таблицы 4.10, среди выявленных гармоник было обнаружено две значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с периодами 14,86 и 2,7 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 14,86 годовом периоде это 0,52 мг/м³, а на 2,7 годовом 0,32 мг/м³. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 14,86 годовом периоде – 1,8 лет, а на 2,7 годовом – 0,87 лет. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 61%.

Таблица 4.10 - Характеристики гармоник для ряда AChl в подрайоне 48.2

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2
Частота, 1/год	0,067	0,37
Период, год	14,86	2,70
A, мг/м ³	0,52	0,32
Фаза, лет	-1,80	0,87
Вклад гармоники в ряд откл Chl	0,44	0,17
Эмпирический к-т Стьюдента	5,92	2,46
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06

На рисунке 4.23 показано, что гармоники неплохо описывают ряд отклонений концентрации хлорофилла в воде. Хорошо описываются долгопериодные колебания. Мелкопериодные зачастую ошибаются, как в 2005-07 годах, 2014-16 годах.

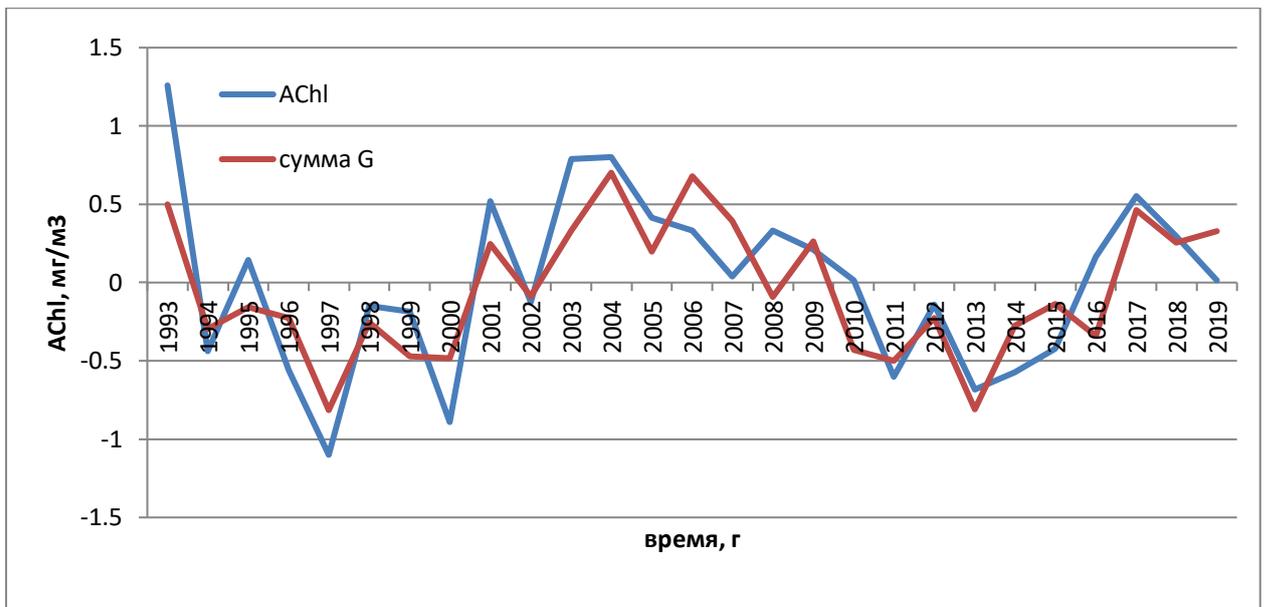


Рисунок 4.23. График исходных и восстановленных значений AChl в подрайоне 48.2

Как видно из рисунка 4.24 в подрайоне 48.3 на периодограмме для ряда среднегодовых значений отклонений концентрации хлорофилла (AChl) выделяется 5 пиков. Они соответствуют 5 выявленным у данной характеристики гармоникам.

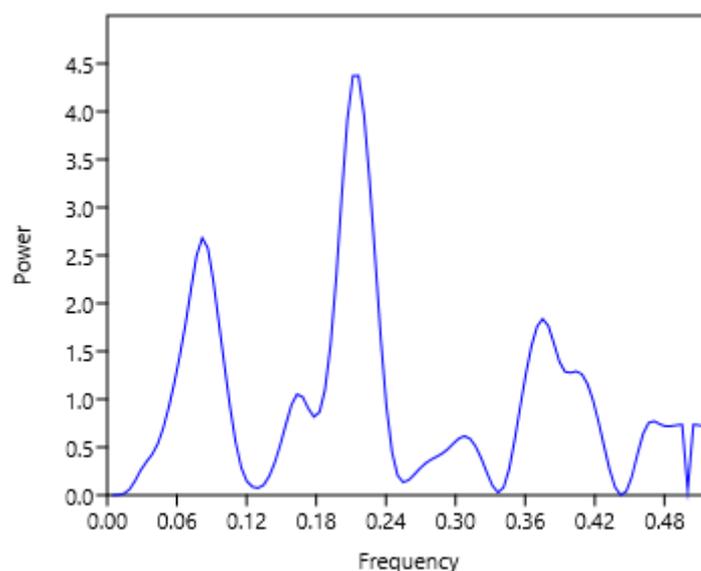


Рисунок 4.24. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений концентрации хлорофилла в подрайоне 48.3

Как видно из таблицы 4.11, среди выявленных гармоник было обнаружено три значимые гармоник (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), описывающие циклы с периодами 12,24, 4,62 и 2,67 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 12,24 годовом периоде это 0,14 мг/м³, а на 4,62 годовом 0,18 мг/м³, на 2,67 годовом 0,11 мг/м³. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 12,24 годовом периоде – 0,4 года, на 4,62 годовом – 0,58 лет, на 2,67 годовом – 1,31 лет. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 64%.

Таблица 4.11 – Характеристики гармоник для ряда AChl в подрайоне 48.3

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
Частота, 1/год	0,082	0,22	0,38
Период, год	12,24	4,622	2,67
A, мг/м ³	0,14	0,18	0,11
Фаза, лет	-0,40	0,58	1,31
Вклад гармоник в ряд AChl	0,19	0,32	0,13
Эмпирический к-т Стьюдента	2,68	4,16	2,084
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06

На рисунке 4.25 показано, что гармоники неплохо описывают ряд отклонений концентрации хлорофилла в воде. Дисперсия гармоник близка к дисперсии отклонений. Ход характеристик соблюдается, за исключением 1995, 2004-05 и 2017 годов.

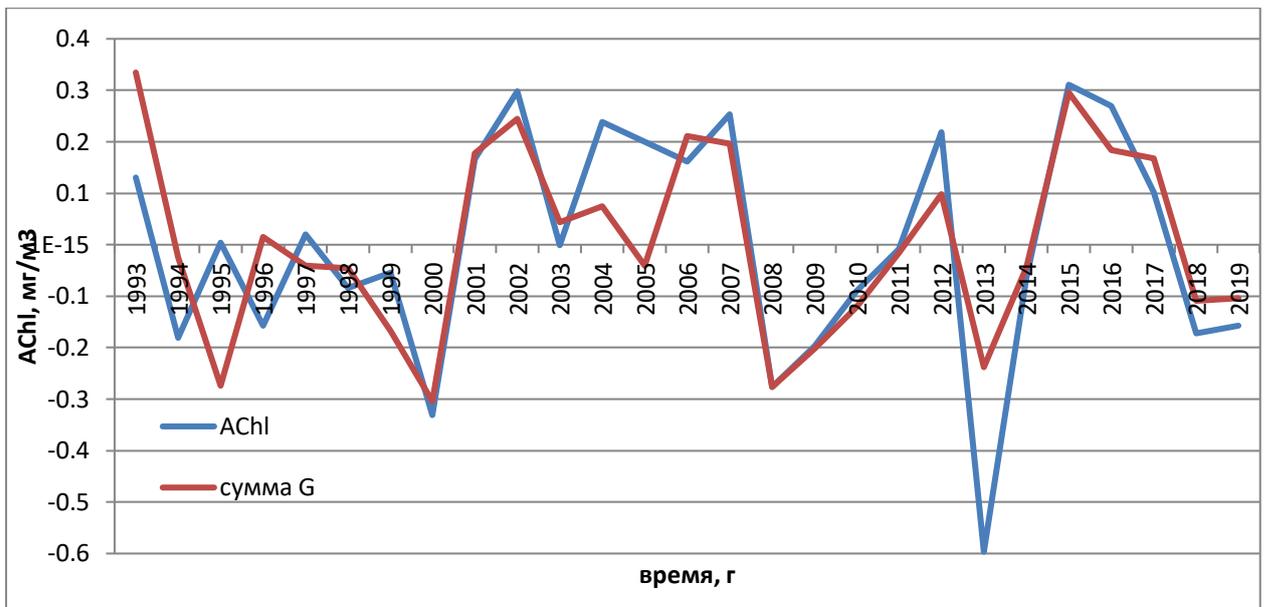


Рисунок 4.25. График исходных и восстановленных значений AChl в подрайоне 48.3

Как видно из рисунка 4.26 в 48 промышленном районе на периодограмме для ряда среднегодовых значений отклонений концентрации хлорофилла (AChl) выделяется 6 пиков. Они соответствуют 6 выявленным у данной характеристики гармоникам.

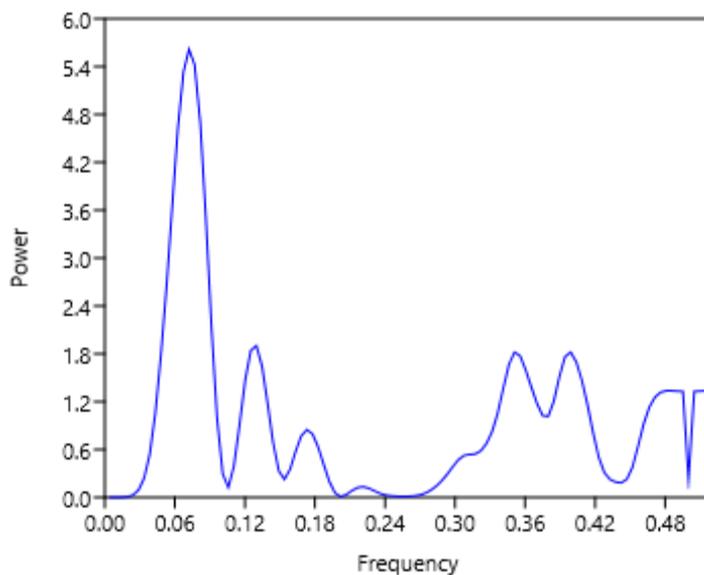


Рисунок 4.26. Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений Chl в 48 промышленном районе

Как видно из таблицы 4.12, среди выявленных гармоник было обнаружено четыре значимые гармоники (у которых эмпирический коэффициент Стьюдента больше критического), выделенные гармоники описывают четыре цикла с периодами 13,87, 7,7, 2,85 и 2,51 года. Амплитуды гармоник показывают, что наибольшие отклонения характеристик от среднего значения на 13,87 годовом периоде это 1,09 мг/м³, на 7,7 годовом 0,63 мг/м³, на 2,85 годовом 0,63 мг/м³, 2,51 годовом 0,64 мг/м³. Фазы гармоник характеризуют время наступления максимума на 13,87 годовом периоде – 1,8 лет, на 7,7 годовом – 5,58 лет, на 2,85 годовом – 0,65 года, на 2,51 годовом – 1,15 лет. Суммарный вклад дисперсии гармоник в общую дисперсию ряда 83%.

Таблица 4.12 – Характеристики гармоник для ряда AChI в 48 районе

Характеристики	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3	Гармоника 4
Частота, 1/год	0,07	0,13	0,35	0,40
Период, год	13,87	7,70	2,85	2,51
A, мг/м ³	1,09	0,63	0,63	0,64
Фаза, лет	-1,80	5,58	0,65	1,15
Вклад гармоники в ряд АТПО	0,41	0,137	0,138	0,140
Эмпирический к-т Стьюдента	5,44	2,14	2,15	2,18
Критический к-т Стьюдента	2,06	2,06	2,06	2,06

На рисунке 4.27 показано, что гармоники хорошо описывают ряд отклонений концентрации хлорофилла в воде. Дисперсия суммы гармоник близка к дисперсии отклонений. Ход характеристики соблюдается, за исключением 2000, 2005, 2012-14 годов.

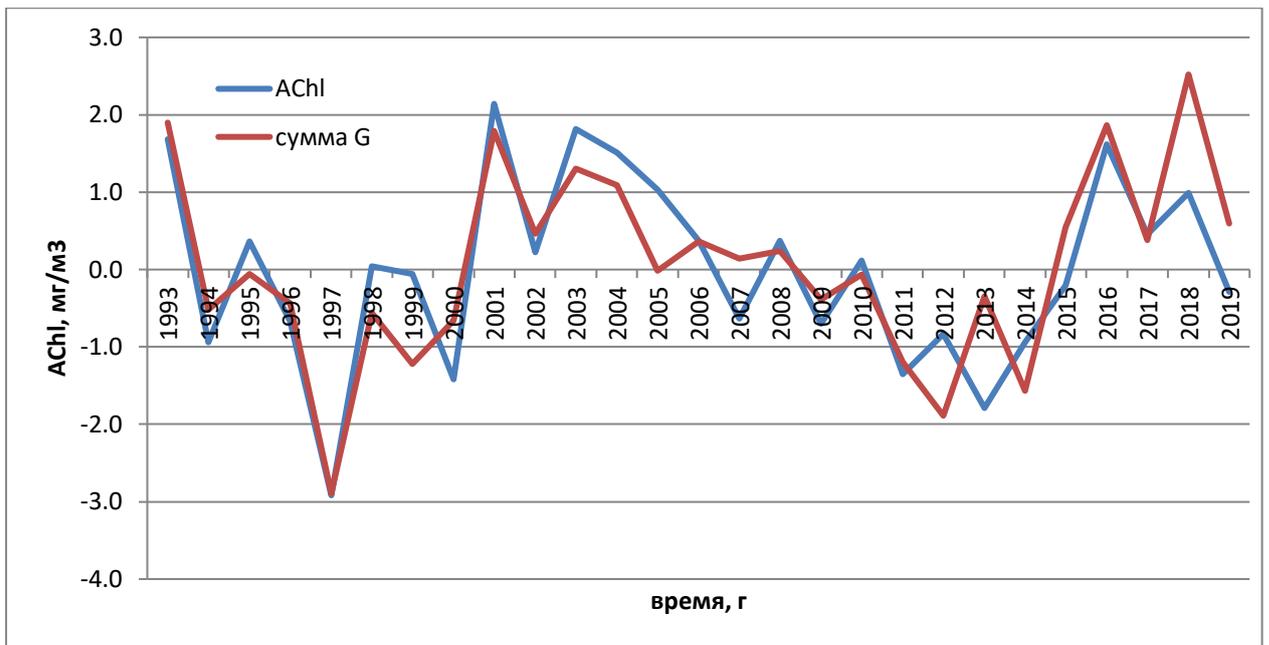


Рисунок 4.27. График исходных и восстановленных значений AChl в 48 промышленном районе

В итоге для ряда отклонений концентрации хлорофилла в воде у подрайона 48.1 выделяется 3 гармоники (периоды 13,87, 2,89, и 2,51 года), у подрайона 48.2 – 2 гармоники (периоды 14,86 и 2,7 года), у подрайона 48.3 - 3 гармоники (периоды 12,24, 4,62 и 2,67 года), а в общем 48 промышленном районе 4 гармоники (периоды 13,87, 7,7, 2,85 и 2,51 года).

Как видно, наибольший вклад в циклические изменения в общем районе оказывает подрайон 48.1, то есть значимость циклических составляющих подрайонов увеличивается с движением на юг.

Стоит отметить, что выявленная в общем 48 промышленном районе гармоника с периодом 7,7 лет не выявляется ни в одном из подрайонов. Вероятно, она может являться следствием наложения нескольких гармоник друг на друга.

Анализ выявленных циклических колебаний

Колебания порядка 3-5 лет могут быть отражением влияния долгопериодной адвекции из юго-западной части Тихого океана, а также

воздействия Эль-Ниньо/Южной осцилляции [16]. Поскольку оба явления могут влиять на температуру поверхности моря и на ледовый режим.

Долгопериодные колебания, выраженные в квази-15-летней гармонике, могут быть отражением влияния антарктической осцилляции (Southern Annular Mode (SAM)) на исследуемую характеристику [17, 18], которая влияет на температурный режим, ледовитость и циркуляцию вод Южного океана.

Такие крупномасштабные и долгопериодные явления как Южная и Антарктическая осцилляция влияют на экосистему криля, преимущественно порождая аномалии ТПО в пределах Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и влияя на ледовитость. Также их влияние на скорость установившихся меридиональных ветров, может повлиять на интенсивность переноса криля течениями из мест его воспроизводства к крайней границе ареала его обитания [16].

Таким образом, получается, что все выявленные циклические составляющие в рядах выловов криля и концентрации хлорофилла, отражают физическую роль в изменчивости исследуемых характеристик.

4.5. Исследование отклика выловов криля на факторы среды

Из среднегодовых значений рядов выловов криля и концентрации хлорофилла была рассчитана взаимокорреляционная функция (ВКФ) (рисунок 4.28, 30, 32, 34). По ней определялась возможность прогноза и при ее наличии, рассчитывались модели регрессии. После чего строился совмещенный график исходных значений выловов криля и модельных значений.

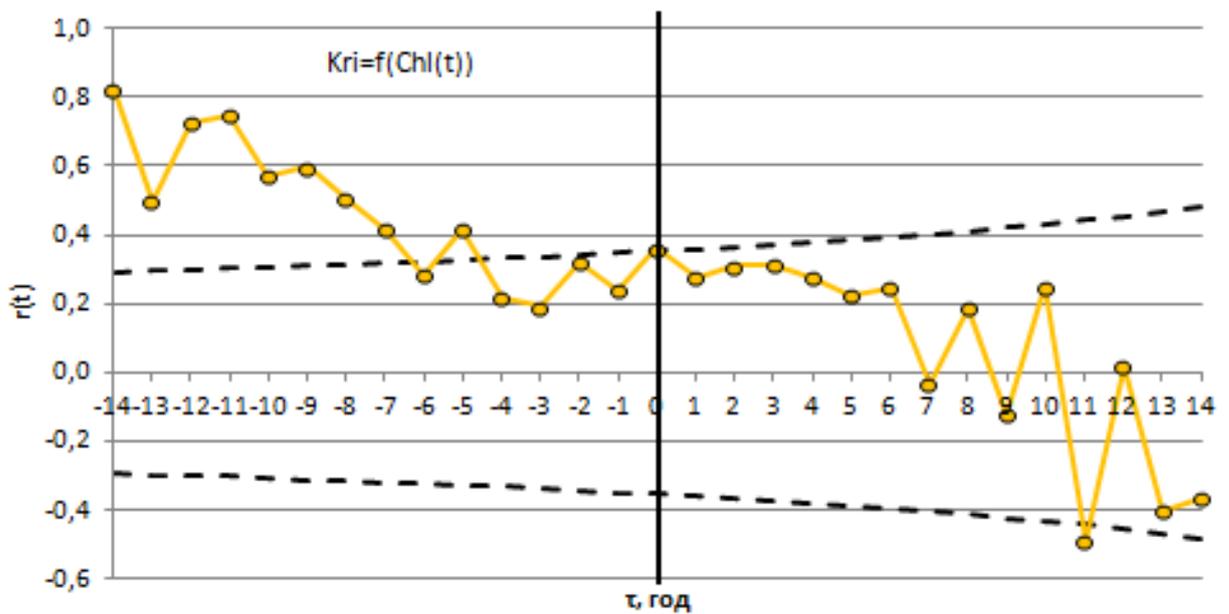


Рисунок 4.28. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и Chl в подрайоне 48.1

Пунктирной линией на рисунке 4.28 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и Chl связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель будет строиться для K_{ri} . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 14 лет, следовательно, оптимальнее всего делать прогноз K_{ri} в зависимости от Chl с заблаговременностью 14 лет, однако сложно сказать каким образом выражается столь долгое запаздывание, поэтому так же будет рассчитана модель прогноза, на ближайшем значимом сдвиге, то есть с заблаговременностью 5 лет.

Модель прогноза с заблаговременностью 14 лет:

$$K_{ri+14} = 41196 * Chl_i - 328152 + \varepsilon \quad (4.1)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=4,79$; $t_b=-3,61 > t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 68% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=22,93 > F_{кр}=4,84$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 38736 т, что меньше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 56694$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 14 лет не будет оправдан.

Модель прогноза с заблаговременностью 5 лет:

$$Kri_{i+5}=23013*Chl_i - 170974 + \varepsilon \quad (4.2)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались незначимыми ($t_a=2,04$; $t_b=-1,39 > t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 17% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель неадекватна ($F^*=4,17 > F_{кр}=4,35$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 57030 т, что больше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 56694$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 5 лет не будет оправдан.

Вклад концентрации хлорофилла в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.1 при сдвиге в 5 лет составляет 20%, 14 лет – 82%

Как видно из рисунка 4.29 модели плохо описывают исходный ряд. Модель прогноза с заблаговременностью 5 лет описывает только промежуток с 1997 по 2007 года, далее ошибается. Для модели прогноза с заблаговременностью 14 лет ход соблюдается, но с 2012 года модель начинает ошибаться. Прогнозируют незначительные колебания на уровне резко возросших значений выловов в 2013-19 годах.

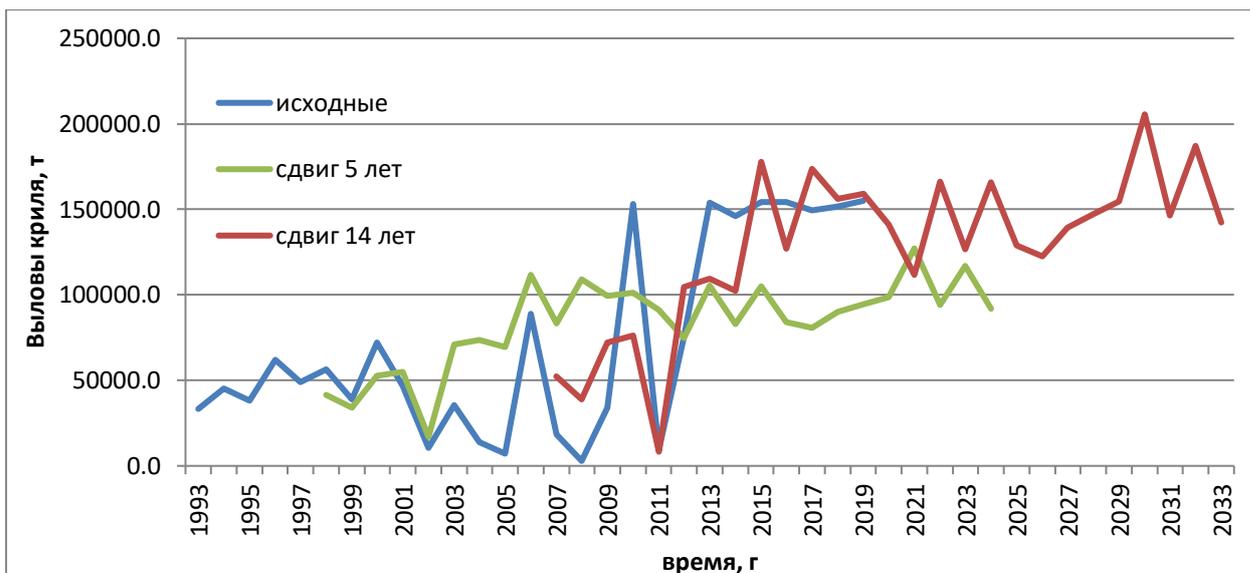


Рисунок 4.29. Совмещенный график исходных и модельных значений промысла криля в подрайоне 48.1

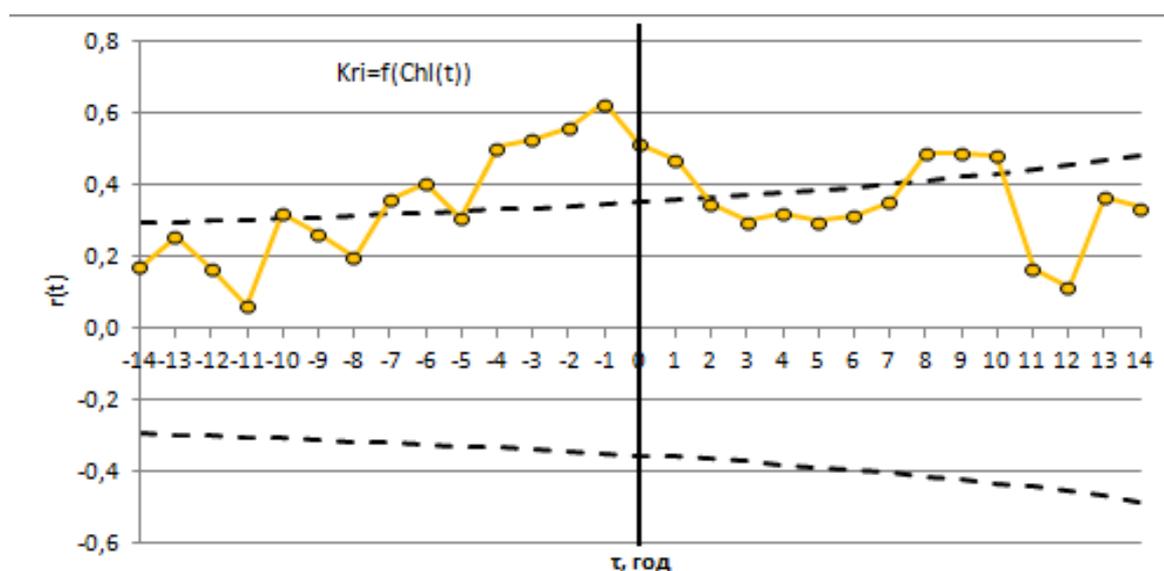


Рисунок 4.30. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и Chl в подрайоне 48.2

Пунктирной линией на рисунке 4.30 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и ChI связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель будет строиться для K_{ri} . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 1 год, следовательно, оптимальнее всего делать прогноз K_{ri} в зависимости от ChI с заблаговременностью 1 год.

Модель прогноза с заблаговременностью 1 год:

$$K_{ri+1} = 21774 * ChI_i - 127307 + \varepsilon \quad (4.3)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a = 3,94$; $t_b = (-2,78) > t_{кр} = 2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 39% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^* = 15,56 > F_{кр} = 4,26$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 34310 т, что меньше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 42979$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 1 год не будет оправдан. Вклад концентрации хлорофилла в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.2 при сдвиге в 1 год составляет 39%.

Как видно из рисунка 4.31 модель плохо описывает исходный ряд. Модель пропускает большую часть колебаний исходной характеристики, сглаживая график. Прогнозирует уменьшение значений выловов криля.

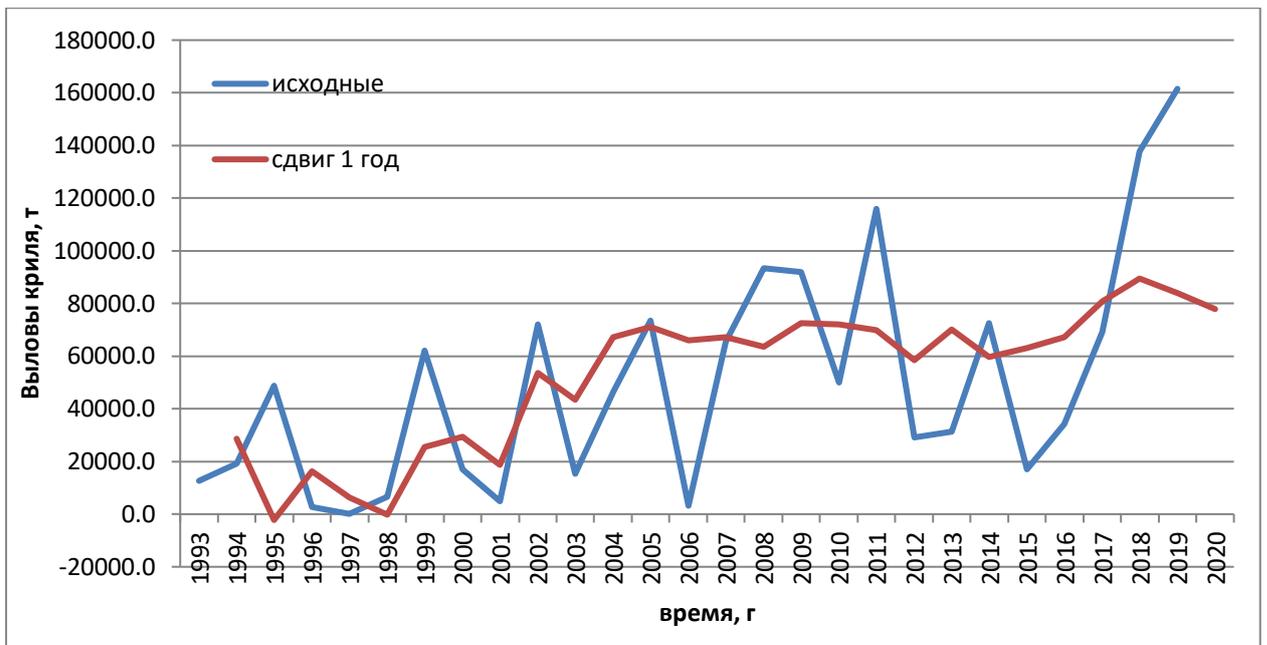


Рисунок 4.31. Совмещенный график исходных и модельных значений промысла криля в подрайоне 48.2

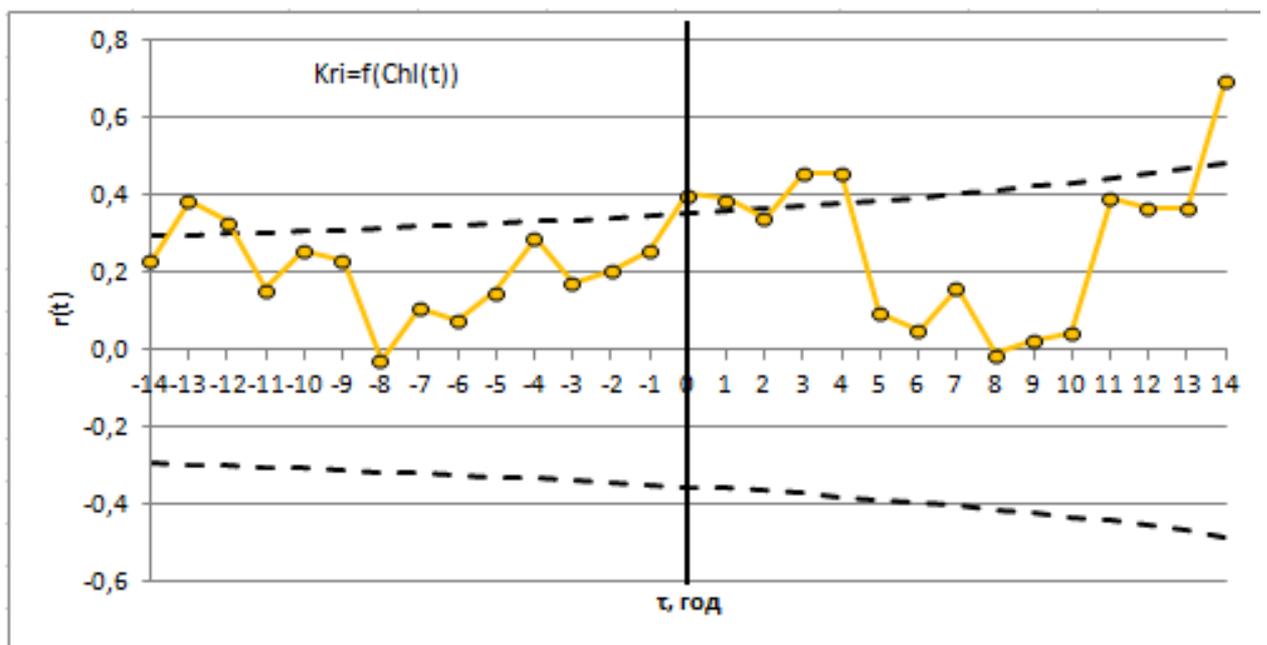


Рисунок 4.32. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости Kr_i и Chl в подрайоне 48.3

Пунктирной линией на рисунке 4.32 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит Kr_i и Chl связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель

будет строиться для Kr_i . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 13 лет, следовательно, оптимальнее всего делать прогноз Kr_i в зависимости от Chl с заблаговременностью 13 лет.

Модель прогноза с заблаговременностью 13 лет:

$$Kri_{i+13}=23124*Chl_i - 157290 + \varepsilon \quad (4.4)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались незначимыми ($t_a=1,45$; $t_b=(-1,15)$ меньше $t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 15% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель неадекватна ($F^*=2,09$ меньше $F_{кр}=4,75$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 24901 т, что больше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 22558$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 13 лет не будет оправдан. Вклад концентрации хлорофилла в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.3 при сдвиге в 13 лет составляет 15%.

Как видно из рисунка 4.33 модель плохо описывает исходный ряд, указывая лишь на положительный тренд исходных значений. Прогнозирует рост показателя без выраженных колебаний.

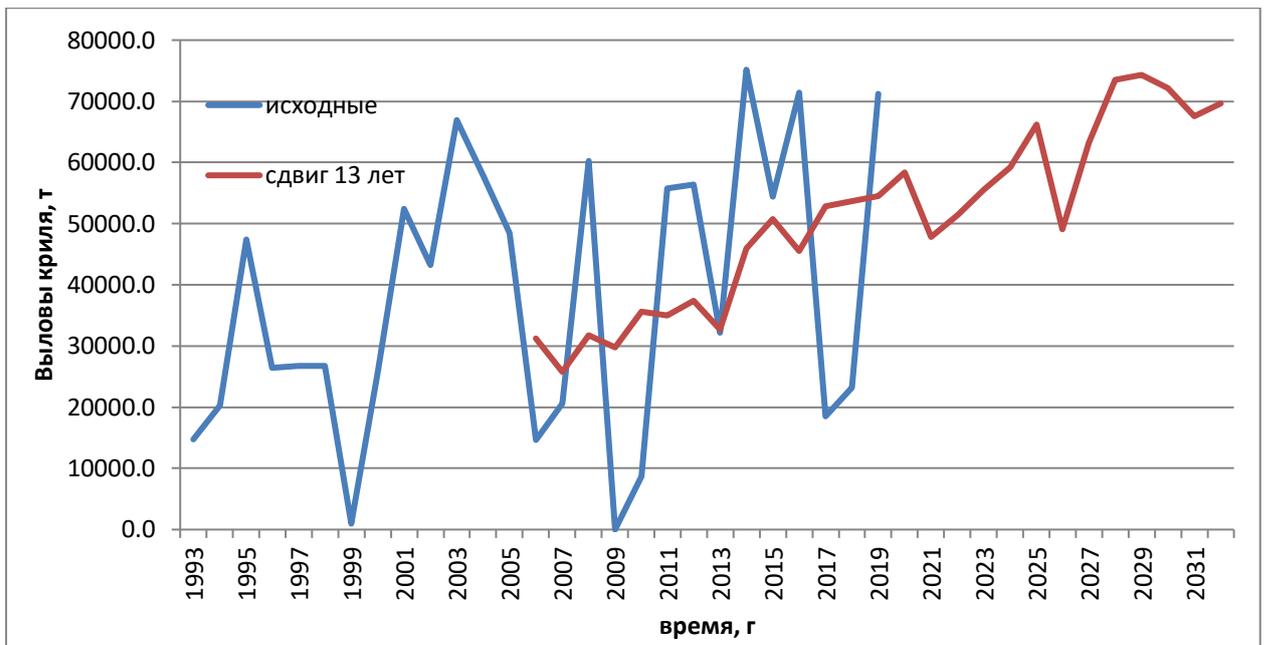


Рисунок 4.33. Совмещенный график исходных и модельных значений промысла криля в подрайоне 48.3

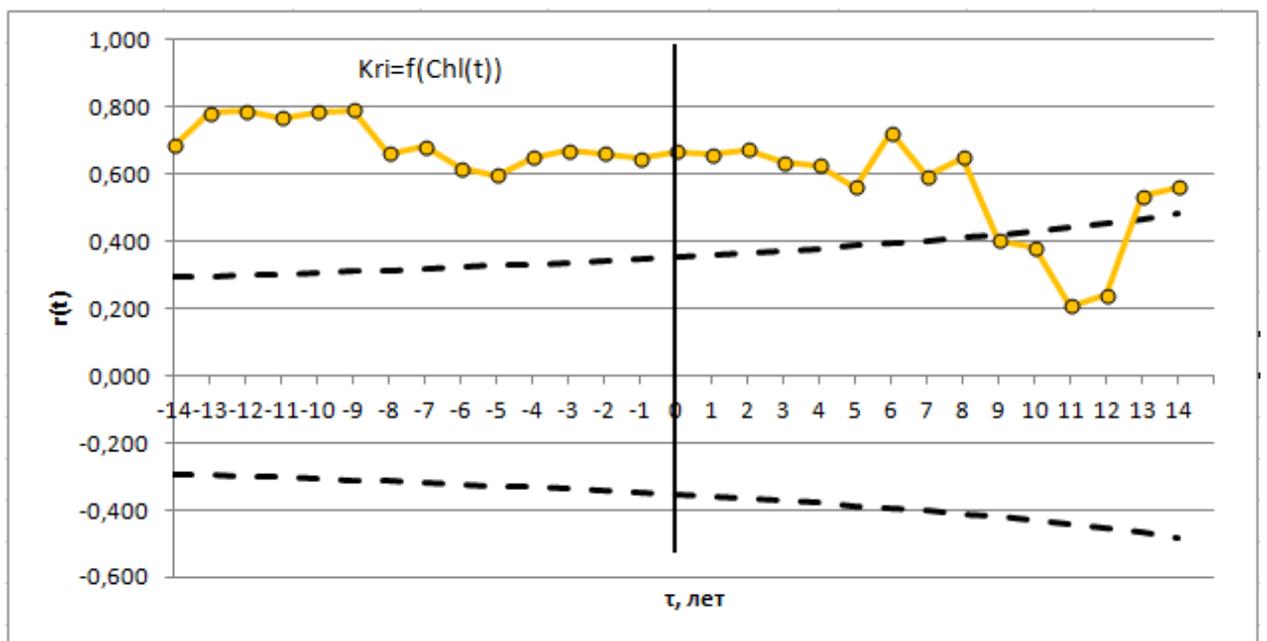


Рисунок 4.34. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и Chl в 48 промысловом районе

Пунктирной линией на рисунке 4.34 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и Chl связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель

будет строиться для K_{ri} . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 9 лет, следовательно, оптимальнее всего делать прогноз K_{ri} в зависимости от Chl с заблаговременностью 9 лет, однако сложно сказать каким образом выражается столь долгое запаздывание, поэтому так же будет рассчитана модель прогноза, на ближайшем значимом сдвиге, то есть с заблаговременностью 1 год.

Модель прогноза с заблаговременностью 1 год:

$$K_{ri+1}=18387*Chl_i - 354859 + \varepsilon \quad (4.5)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=4,16$; $t_b=-2,83 > t_{kp}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 42% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=17,33 > F_{kp}=4,26$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 62942 т, что меньше чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 81816$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 1 год не будет оправдан.

Модель прогноза с заблаговременностью 9 лет:

$$K_{ri+9}=23198*Chl_i - 438758 + \varepsilon \quad (4.6)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=5,18$; $t_b=-3,58$; $t_{kp}=2,06$).

Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 63% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=26,79 > F_{кр}=4,49$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 51390 т, что меньше чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 81816$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 9 лет не будет оправдан.

Вклад концентрации хлорофилла в дисперсию выловов криля в 48 промышленном районе при сдвиге в 1 год составляет 38%, в 9 лет 63%.

Как видно из рисунка 4.35 модели плохо описывают исходный ряд. Модель прогноза с заблаговременностью 1 год прогнозирует уменьшение выловов криля к 2020 году. Модель прогноза с заблаговременностью 9 лет прогнозирует продолжение повышения выловов криля, но с меньшей интенсивностью.

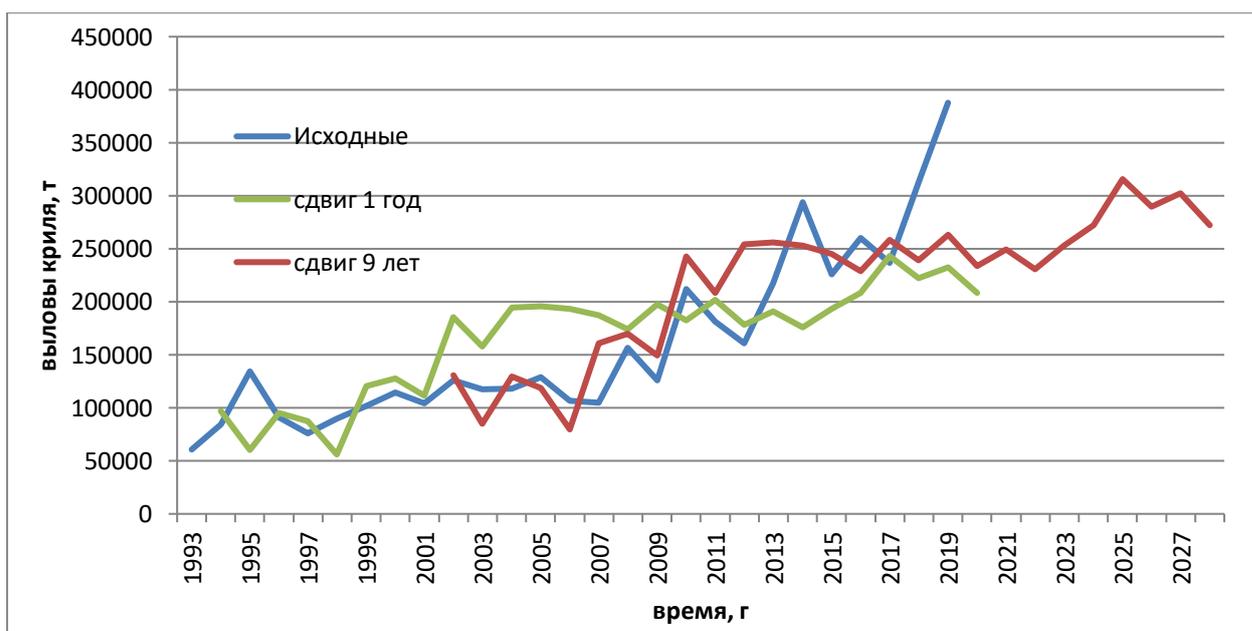


Рисунок 4.35. Совмещенный график исходных и модельных значений ряда K_{ri} в 48 промышленном районе

Итого в каждом подрайоне были выявлены значимые коэффициенты корреляции, но все построенные по ним модели прогноза плохого качества, это означает, что они не будут оправдываться. Аналогично и во всем 48 промышленном районе. Таким образом, понятно, что данных о концентрации хлорофилла недостаточно для описания изменчивости выловов криля.

Далее в работе была рассчитана ВКФ для выловов криля с парциальным давлением углекислого газа в воде в 48 промышленном районе (рисунок 4.36).

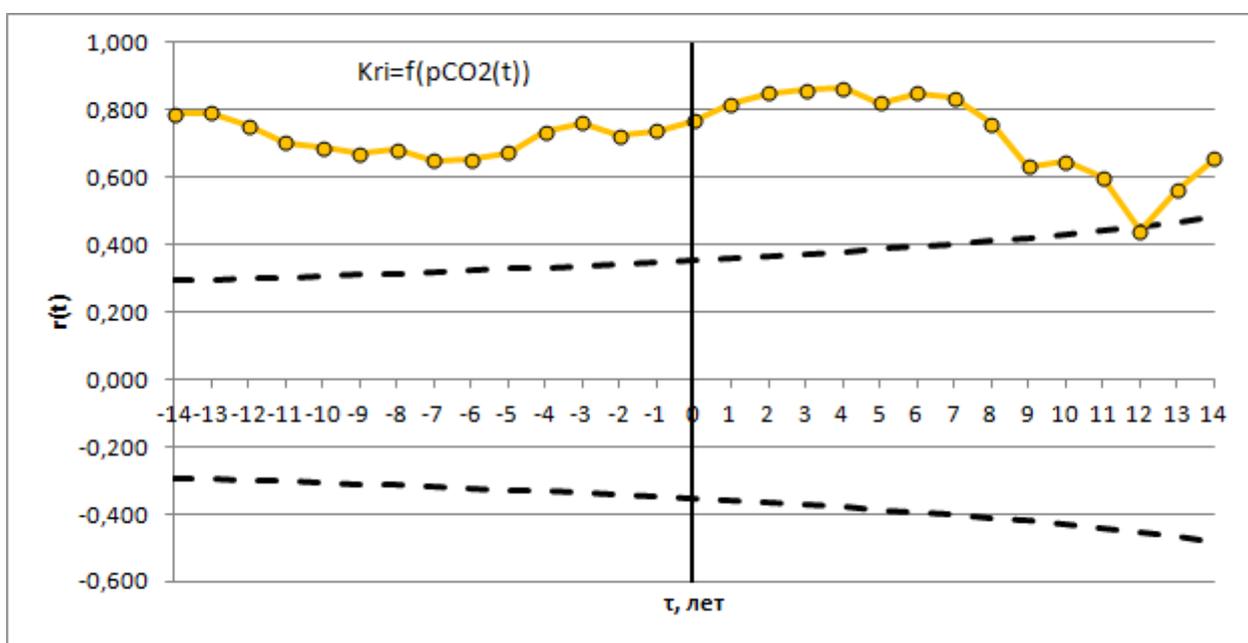


Рисунок 4.36. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и pCO_2 в 48 промышленном районе.

Пунктирной линией на рисунке 4.36 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и pCO_2 связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель будет строиться для K_{ri} . Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 13 лет, однако сложно сказать каким образом выражается столь долгое запаздывание, поэтому будет рассчитана модель прогноза на ближайшем значимом сдвиге, то есть с заблаговременностью 1 год, так же 3

года, поскольку коэффициент корреляции на сдвиге в 3 года выше соседних значений в ВКФ.

Модель прогноза с заблаговременностью 1 год:

$$Kri_{i+1}=44516 * pCO_{2i} - 1470299 + \varepsilon \quad (4.7)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=5,36$; $t_b=-4,82 > t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 55% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о парциальном давлении углекислого газа (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=28,76 > F_{кр}=4,26$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 55704 т, что меньше чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 81816$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 1 год не будет оправдан.

Модель прогноза с заблаговременностью 3 года:

$$Kri_{i+3}=49899 * pCO_{2i} - 1655145 + \varepsilon \quad (4.8)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=5,54$; $t_b=-5,02 > t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 58% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о парциальном давлении углекислого газа (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых

переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=30,67 > F_{кр}=4,30$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 54424 т, что меньше чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 81816$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 3 года не будет оправдан.

Вклад pCO_2 в дисперсию выловов криля в 48 промышленном районе при сдвиге в 1 год составляет 53%, в 3 года 59%.

Как видно из рисунка 4.37 модели плохо описывают исходный ряд. Обе прогнозируют рост выловов, но с меньшей интенсивностью. В целом модельные графики сильно сглаживают исходные значения.

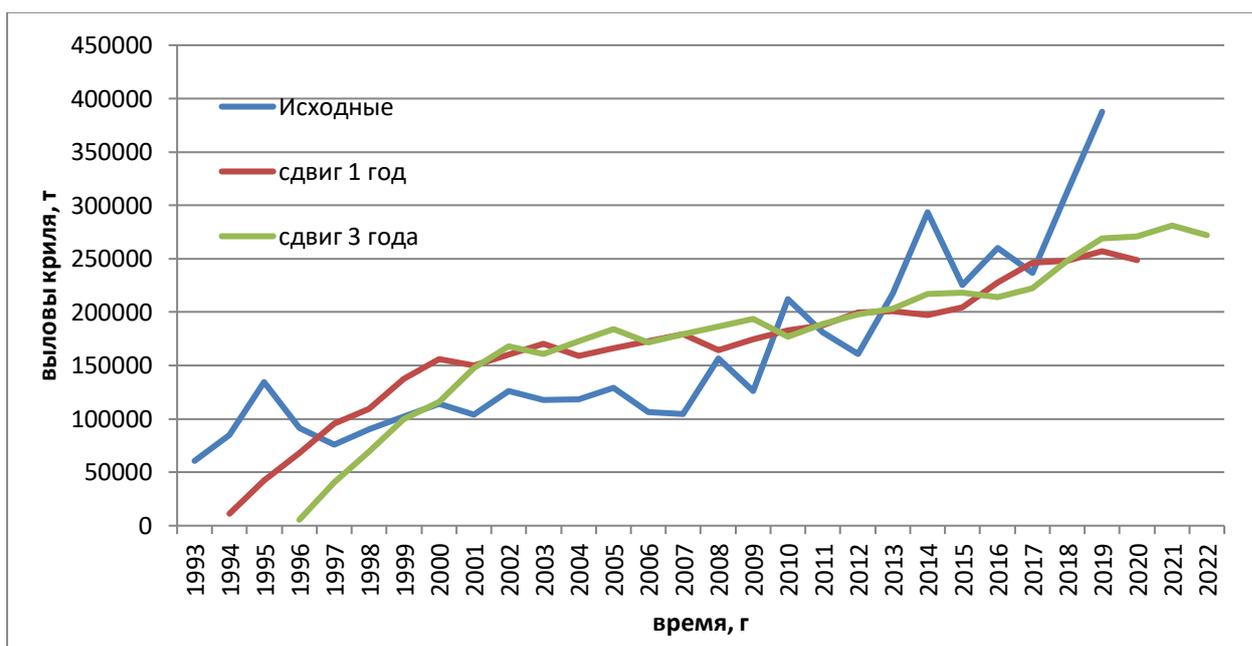


Рисунок 4.37. Совмещенный график исходных и модельных значений ряда Kri (48 район)

Несмотря на высокие значения значимых коэффициентов корреляции, все построенные по ним модели прогноза плохого качества, это означает, что они не будут оправдываться. Таким образом, понятно, что данных о

парциальном давлении углекислого газа в воде недостаточно для описания изменчивости выловов криля.

Также была рассчитана ВКФ для выловов криля с температурой поверхности океана для подрайона 48.3 (рисунок 4.38), поскольку корреляционный анализ показал, что в этом подрайоне их взаимосвязь значимее, чем в остальных.

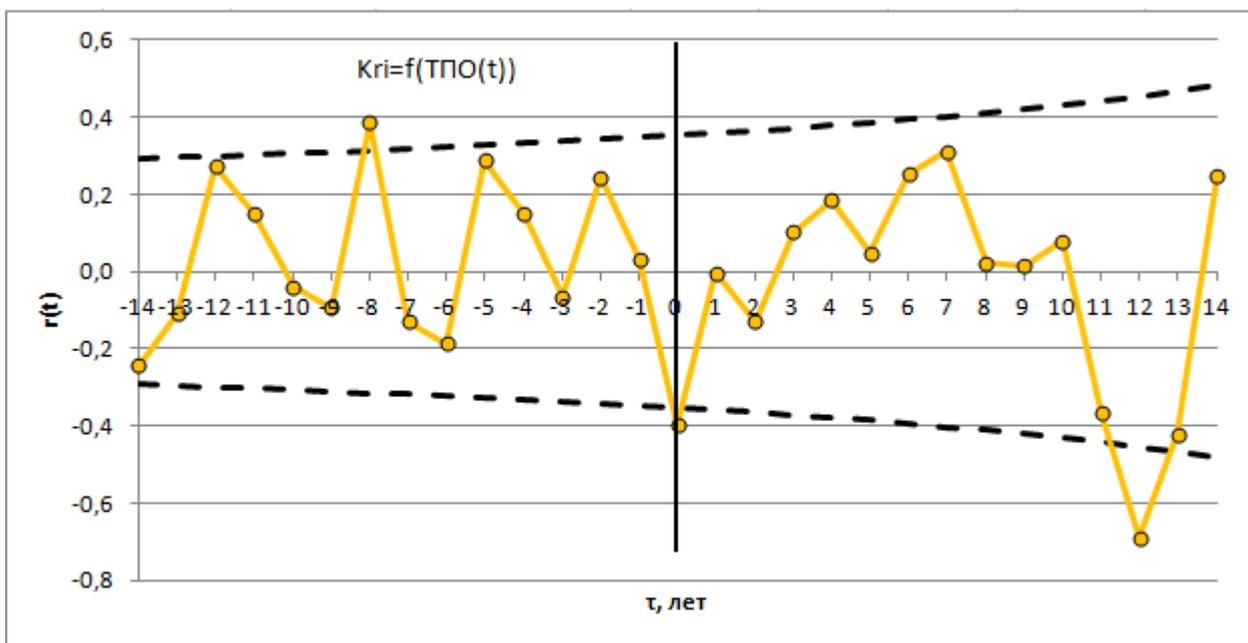


Рисунок 4.38. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и ТПО в подрайоне 48.3

Пунктирной линией на рисунке 4.38 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и ТПО связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель будет строиться для K_{ri} . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге $\tau=0$, следовательно, оптимальнее всего строить модель парной линейной регрессии K_{ri} в зависимости от ТПО, не составляя прогноз.

Модель регрессии K_{ri} от ТПО:

$$K_{ri}=(-38284)*ТПО_i + 130914 + \varepsilon \quad (4.9)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=(-2,17)$; $t_b=3,03$; $t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 16% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о температуре поверхности океана (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=4,70 > F_{кр}=4,25$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 21107т, что меньше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 22558$ т. Таким образом, полученная модель имеет плохое качество. Вклад температуры поверхности океана в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.3 составляет всего 16%.

Как видно из рисунка 4.39 модель плохо описывает исходный ряд. Дисперсия модели заметно меньше и много ошибок.

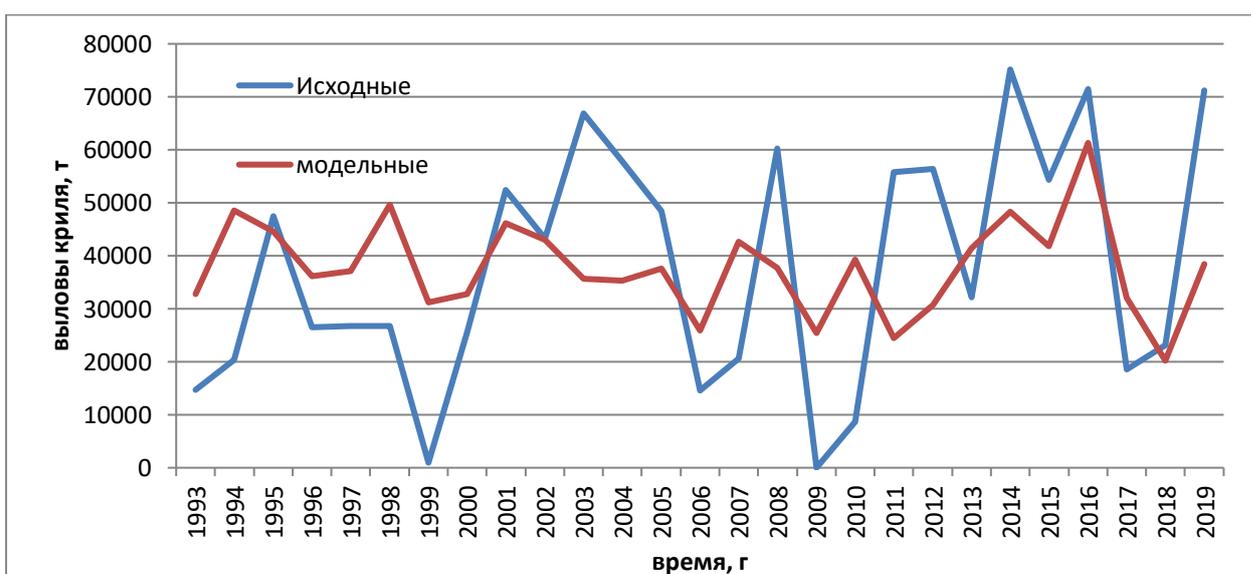


Рисунок 4.39. Совмещенный график исходных и модельных значений выловов криля (подрайон 48.3)

В итоге возможность прогноза выловов криля, используя данные ТПО, практически отсутствует (на сдвиге в 8 лет, модель неадекватна), а полученная модель парной линейной регрессии некачественная. Таким образом, понятно, что данных о температуре поверхности океана недостаточно для описания изменчивости выловов криля.

Еще была рассчитана ВКФ для выловов криля с концентрацией морского льда для подрайона 48.2 (рисунок 4.40), поскольку корреляционный анализ показал, что в этом подрайоне их взаимосвязь значимее, чем в остальных.

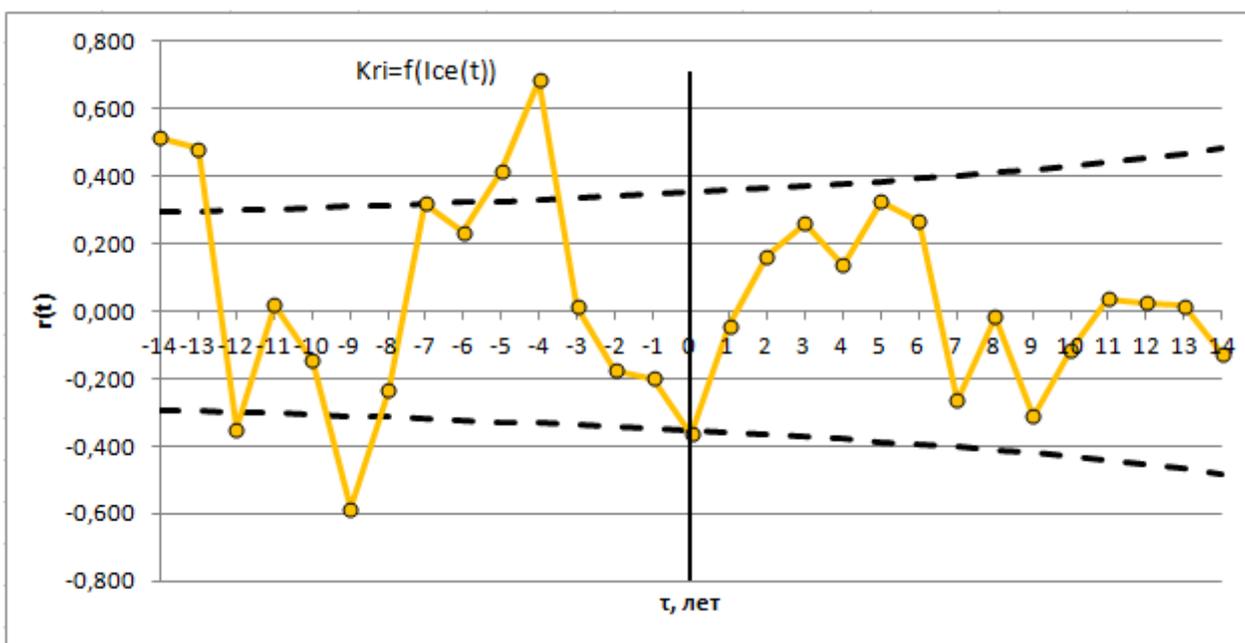


Рисунок 4.40. Взаимокорреляционная функция межгодовой изменчивости K_{ri} и I_{ce} в подрайоне 48.2.

Пунктирной линией на рисунке 4.40 изображено критическое значение коэффициента корреляции. На ВКФ присутствуют несколько значимых коэффициентов корреляции на сдвигах, отличных от нуля, значит K_{ri} и I_{ce} связаны асинхронно. Направление запаздывания – отрицательное, т.к. модель будет строиться для K_{ri} . В ВКФ отмечаются значимые коэффициенты корреляции на сдвигах, отличных от 0, значит можно сделать прогноз. Максимальный коэффициент корреляции находится на сдвиге в 4 года,

следовательно, оптимальнее всего делать прогноз K_{ri} в зависимости от I_{ce} с заблаговременностью 4 года.

Модель прогноза с заблаговременностью 4 года:

$$K_{ri+4} = 648616 * I_{ce_i} - 127307 + \varepsilon \quad (4.10)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Оба оказались значимыми ($t_a=4,33$; $t_b=(-3,35) > t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 47% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации морского льда (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=18,76 > F_{кр}=4,32$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 32816 т, что меньше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 42979$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 4 года не будет оправдан. Вклад концентрации морского льда в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.2 при сдвиге в 4 года составляет 47%.

Как видно из рисунка 4.41 модель неплохо описывает исходный ряд. В целом ход соблюдается, но в 2003 и 2022 годах модель описывает отрицательные значения вылов, которых не может быть. Прогнозирует уменьшение значений выловов криля к 2022 году, затем рост.

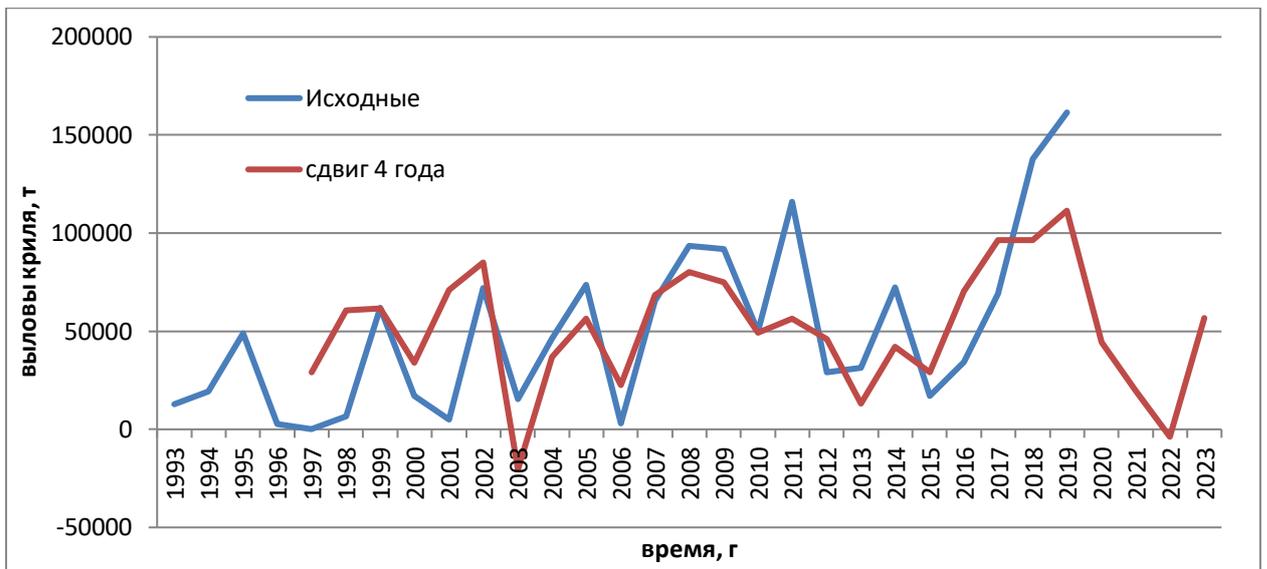


Рисунок 4.41. Совмещенный график исходных и модельных значений промысла криля в подрайоне 48.2.

Не смотря на невысокие значения коэффициента корреляции, модель прогноза выловов криля с заблаговременностью 4 года достаточно неплохо описала исходные значения выловов, из чего можно сделать вывод, что прогнозируемое ею уменьшение значений выловов криля вполне возможно, но данных о концентрации морского льда все равно недостаточно для полного описания изменчивости промысла криля.

4.6. Оценка связи уловов криля с несколькими характеристиками

По результатам выше понятно, что выловы криля взаимосвязаны с несколькими характеристиками. Но возможность достоверного прогноза мала. В ВКФ в подрайоне 48.2 (Южные Оркнейские острова) были замечены высокие коэффициенты корреляции выловов криля с концентрацией хлорофилла и морского льда на сдвиге в 4 года. Поэтому для описания исходной характеристики была рассчитана множественная линейная регрессия (МЛР) на сдвиге в 4 года.

Полученное уравнение МЛР для модели прогноза с заблаговременностью 4 года:

$$K_{ri+4} = 577101 * Ice_i + 14343 * Chl_i - 281447 + \varepsilon \quad (4.11)$$

Коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05. Все оказались значимыми ($t_{a1}=4,31$; $t_{a2}=2,71$; $t_b=(-4,68)$; $t_{кр}=2,06$). Коэффициент детерминации показал, что моделью описывается 61% дисперсии исходного ряда и свидетельствует о том, что данных о концентрации хлорофилла и морского льда (независимых переменных) недостаточно для описания изменчивости выловов криля (зависимых переменных). Проверка адекватности по критерию Фишера при уровне значимости 5% показала, что модель адекватна ($F^*=15,88$ при $F_{кр}=4,32$). Стандартная ошибка модели σ_ε составила 28761 т, что меньше, чем стандартное отклонение исходного ряда $\sigma_y = 42979$ т. Таким образом, полученная модель прогноза имеет плохое качество, а значит, прогноз с заблаговременностью 4 года не будет оправдан. Вклад концентрации хлорофилла и морского льда в дисперсию выловов криля в подрайоне 48.2 при сдвиге в 4 года составляет 65%.

Как видно из рисунка 4.42 модель неплохо описывает исходный ряд. Заметно лучше, чем по отдельности с независимыми параметрами. Все еще описывает отрицательные значения в 2003 году, как в модели со льдом, но уже не описывает их в 2022 году. Прогнозирует уменьшение значений выловов криля к 2022 году, затем рост.

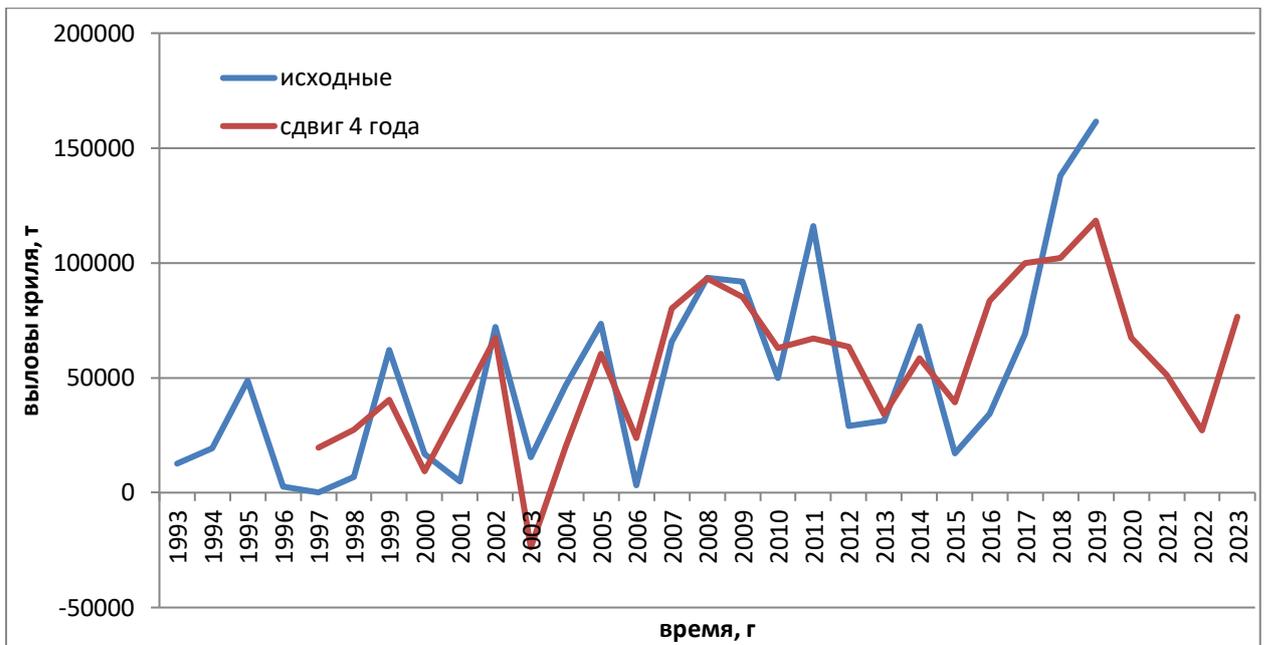


Рисунок 4.42. Совмещенный график исходных и модельных значений промысла криля в подрайоне 48.2.

Полученная модель МЛР достаточно неплохо описала исходные выловы криля, заметно лучше, чем модели прогноза с независимыми переменными по отдельности. По значимости коэффициентов регрессии можно сделать вывод, что в подрайоне 48.2 влияние на промысел криля в большей степени оказывает концентрация морского льда, нежели хлорофилла. Для того чтобы модель стала качественной недостает только одного параметра МЛР – достаточно высокого коэффициента детерминации. К сожалению, при добавлении независимых переменных (pCO_2 и ТПО) качество модели падает (коэффициенты регрессии незначимы), поэтому для улучшения качества модели прогноза необходимо искать другие факторы влияющие на промысел криля. Таким образом, понятно, что всех исследованных в данной работе характеристик недостаточно для описания изменчивости выловов криля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выявления закономерностей в численности популяции антарктического криля *Euphausia superba* был проведен анализ данных о его выловах с температурой поверхности океана, концентрацией хлорофилла, парциальным давлением углекислого газа и концентрацией морского льда на акватории моря Скоша в 48 промысловом районе в целом и его подрайонах 48.1-2-3 по отдельности.

В работе были выявлены значимые взаимосвязи выловов криля со всеми исследуемыми характеристиками, но не во всех подрайонах. Так, в подрайоне 48.1 (Антарктический полуостров) существует значимая связь только с концентрацией хлорофилла и парциальным давлением углекислого газа в воде. В подрайоне 48.2 (Южные Оркнейские острова) значимая связь выявляется еще с концентрацией морского льда. А в подрайоне 48.3 (остров Южная Георгия) значимая связь с выловами криля выявляется у концентрации хлорофилла и температуры поверхности океана, но с парциальным давлением углекислого газа и концентрацией морского льда не выявляется. В общем 48 промысловом районе значимые взаимосвязи аналогичны подрайону 48.1.

Анализ трендов показал, что у выловов криля, концентрации хлорофилла и парциального давления углекислого газа в воде имеются положительные тренды, а у температуры поверхности океана и концентрации морского льда трендов нет. Нелинейные тренды для выловов криля указывают на ускорение роста показателя со временем, а для концентрации хлорофилла и парциального давления углекислого газа, наоборот – на замедление показателя роста со временем.

Спектральный анализ выловов криля и концентрации хлорофилла показал, что характеристики имеют схожие циклы, а выявленные колебания отражают влияние на них крупномасштабных климатических явлений.

Выявленные 3-5-летние гармоники указывают на воздействие Эль-Ниньо/Южной осцилляции, а долгопериодные колебания, выраженные в 10-15-летних гармониках, могут быть отражением влияния Антарктической осцилляции на исходные характеристики. Оба явления порождают аномалии ТПО, что в свою очередь влияет на ледовитость региона, также изменение скорости господствующих ветров, может влиять на интенсивность переноса криля течениями из нерестилищ по всему ареалу обитания.

Исходя из расчетов, все выявленные взаимосвязи недостаточно сильные для описания изменчивости и прогнозирования промысла криля. Это может быть объяснено тем, что выловы могут не отражать достоверную информацию о популяции криля в промысловом районе, поскольку зависят от внешних факторов вроде ледовитости, погодных условий и промыслового усилия. Но так же возможны и другие неучтенные факторы, сильно влияющие на изменчивость крилевых популяций.

По результатам работы изменчивость выловов криля точнее всего удалось описать в подрайоне 48.2 (Южные Оркнейские острова), используя данные концентрации хлорофилла и морского льда, причем данные концентрации морского льда оказывали большее влияние на выловы, чем концентрация хлорофилла. Полученные закономерности указывают на 4-х летнее запаздывание или отклик популяций криля на изменения ледовых условий и его кормовой базы. Рассчитанная модель прогнозирует замедление показателя роста выловов криля и дальнейший спад характеристики.

Таким образом, по проделанной работе можно сделать вывод о том, что данных о температуре поверхности воды, концентрации хлорофилла, парциального давления углекислого газа и концентрации морского льда недостаточно для описания выловов криля. Требуется обратить внимание на влияние явлений Южной и Антарктической осцилляции и продолжать исследовать факторы, которые могут воздействовать на популяции крилевых сообществ в Атлантической Антарктике и во всем Южном океане.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Деев М. Г. СКОША // Большая российская энциклопедия. [Электронная версия] (2017) – URL: <https://bigenc.ru/geography/text/3624424>
Дата обращения: 18.05.2021
2. FAO Major Fishing Areas. Major Fishing Area 48 [Электронный ресурс] – URL: <http://www.fao.org/fishery/area/Area48/en> Дата обращения: 18.10.2020
3. Ломакина Н.Б. Эуфаузииды Мирового океана (Euphausiacea) / Под ред. А.А. Стрелкова и С.В. Василенко. - Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1978.
4. Быков В.П., Быкова В.М., Кривошеина Л.И. и др. Антарктический криль: Справочник/Под ред. В.М.Быковой. – М.: Изд-во ВНИРО, 2001.
5. Благодаров И. С. Ранний жизненный цикл антарктического криля (Euphausia Superba). Промысловые беспозвоночные: материалы IX Всероссийской научной конференции. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2020.
6. Stephen Nicol. 2006. Krill, Currents, and Sea Ice: Euphausia superba and Its Changing Environment.
7. Комиссия по сохранению морских живых ресурсов Антарктики [Электронный ресурс] – URL: <https://www.ccamlr.org/ru/> Дата обращения: 15.10.2020
8. S. Kawaguchi, S. Nicol, A. J. Press. (2009). Management and Ecological Note. Direct effects of climate change on the Antarctic krill fishery.
9. Scarlett Trimborn, Tina Brenneis, Elizabeth Sweet, and Bjorn Rost. (2012). Sensitivity of Antarctic phytoplankton species to ocean acidification: Growth, carbon acquisition, and species interaction.
10. Sommer U., Paul C., Moustaka-Gouni M. (2015). Warming and Ocean Acidification Effects on Phytoplankton – From Species Shifts to Size Shifts within Species in a Mesocosm Experiment.

11. H. Flores, A. Atkinson, S. Kawaguchi, B. A. Krafft and et al. (2012). Impact of climate change on Antarctic krill.
12. McMinn A, Muller M.N., Martin A, Ryan K.G. (2014) The Response of Antarctic Sea Ice Algae to Changes in pH and CO₂.
13. Kawaguchi S, Kurihara H, King R, Hale L and others (2011) Will krill fare well under Southern Ocean acidification?
14. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017.
15. Copernicus Marine Service [Электронный ресурс] – URL: <https://marine.copernicus.eu/> Дата обращения: 15.10.2020
16. Meredith, M. P., Murphy, E. J., Hawker, E. J., King, J. C., and Wallace, M. I. (2008). On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: forcing by El Niño/ Southern Oscillation and the Southern Annular Mode.
17. Langdon B. Quetin, Robin M. Ross, Christian H. Fritsen, Maria Vernet. (2007). Ecological responses of Antarctic krill to environmental variability: can we predict the future?
18. Yuan, X., E. Yonekura (2011). Decadal variability in the Southern Hemisphere, J. Geophys. Res.