

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ПО ЮНЕСКО МОК и ОПВ

Курсовая работа

На тему «Статистический анализ объемного расхода
морской воды в Датском проливе»
по курсу «Статистические методы обработки и анализа
гидрометеорологической информации»

Выполнила: Кирилова А.А.

Группа ПО-Б16-2-5

Проверил: Малинин В.Н.

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение.....	3
Исходные данные	4
Методы расчета рассматриваемых характеристик.....	5
1. Среднее многолетнее состояние морской воды на разрезе через Датский пролив.....	9
2. Оценка трендов гидрометеорологических характеристик в Датском проливе	12
3. Исследование временных рядов гидрометеорологических характеристик в Датском проливе.....	15
3.1. Характеристики общего интегрального объемного расхода	15
3.2. Характеристики интегрального объемного расхода в направлении на юг (Восточно-Гренландское течение).....	21
3.3. Характеристики интегрального объемного расхода в направлении на север (течение Ирмингера).....	27
4. Связи характеристик, протекающих в исследуемом разрезе Датского пролива, с характеристиками в Гренландском море	33
4.1. Взаимосвязь среднемесячных значений характеристик	33
4.2. Взаимосвязь среднегодовых значений характеристик.....	36
Заключение	38
Список литературы	39

Введение

В виду распространенной гипотезы о Глобальном потеплении как нельзя актуальными становятся исследования в области изменчивости климатических характеристик. И данная курсовая работа как раз может рассматриваться в ряду вышеописанных исследований.

Датский пролив представляет большой интерес для исследования в виду особенностей его гидрологического режима. В Датском проливе встречаются две водные массы, значительно различающиеся по своим характеристикам: это воды атлантического происхождения и воды полярного происхождения. В результате взаимодействия этих разнородных водных масс проявляется исключительно важная особенность Датского пролива – наличие полярного фронта [1].

Воды атлантического происхождения вносятся в Датский пролив ответвлением Северо-Атлантического течения - течением Ирмингера и распространяются прежде всего с юга на север, им свойственна высокая соленость (свыше 35‰) и относительно высокая температура (5-8 °С) [1]. А воды полярного происхождения вносятся Восточно-Гренландским течением и распространяются с севера на юго-запад вдоль побережья Гренландии, им свойственна сравнительно низкая соленость 31-34‰ и низкая температура [1].

Цель работы: исследовать пространственно-временную изменчивость объемного расхода морской воды, протекающей через Датский пролив, а также изменчивость других характеристик морской воды (температуры и солености), и оценить возможное влияние на расход процессов, протекающих в Гренландском море.

В данной работе рассмотрен разрез в Датском проливе на широте 66° с.ш. в пределах долгот от 23,652° з.д. до 36.152° з.д.

Исходные данные

Данные по меридианальной скорости потока, температуре и солености взяты из архива MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002 вдоль широты 66° с.ш. в долготах от $23,625^{\circ}$ з.д. до $36,125^{\circ}$ з.д. с шагом сетки $0,25$ градуса долготы за период с янв. 1993 г. по дек. 2016 г. с дискретностью 1 месяц. Набор данных архива содержит в себе объединение спутниковых данных (аномалии уровня моря, геострофические поверхностные течения, температура поверхности моря) и наблюдений in-situ (профили температуры и солености) статистическими методами.

Рассматриваемые в данной работе горизонты – стандартные батиметрические горизонты: 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700 м. Ограничены снизу батиметрией Датского пролива.

Данные по ледовитости (площади льда) Гренландского моря взяты из работы [2], за период с янв. 1993 г. по дек. 2016 г. с дискретностью 1 месяц.

Данные по факторному распределению ледовитости в Гренландском море взяты из работы Сафоновой Ксении, за период с янв. 1993 г. по дек. 2016 г. с дискретностью 1 месяц.

Методы расчета рассматриваемых характеристик

В данной работе будет использоваться характеристика объемного расхода морской воды. Под объемным расходом понимается объём жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени.

Объемный расход рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = v * S \quad (1)$$

где Q – объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$, v – скорость потока, $\text{м}/\text{с}$, S – площадь поперечного сечения потока, м^2 .

Размерность объемного расхода в данной работе: Св (Свердруп), $\text{Св} = 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Статистические методы

В данной работе производится анализ временных рядов объемного расхода морской воды, а также анализ рядов среднеголетних значений характеристик.

Среднеголетние характеристики рассчитывались следующим образом: в пределах исследуемого разреза в фиксируемых узлах сетки данных рассматриваются временные ряды характеристик (Q , T , S); среднее арифметическое значение характеристики по временному ряду в конкретном узле сетки и принималось за среднеголетнее.

В данной работе тренды временных рядов были аппроксимированы полиномами первой степени (при линейном характере тренда):

$$Tr(t) = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

и полиномами второй степени (при нелинейном характере тренда):

$$Tr(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 \quad (3)$$

При этом численные значения коэффициентов в формулах (2) и (3) определяются методом наименьших квадратов (МНК) [3].

Значимость тренда (степень существенности вклада тренда в изменчивость характеристики) оценивалась или с использованием критерия Стьюдента, или по р-критерию.

При оценке значимости тренда с использованием критерия Стьюдента записывается нулевая гипотеза по отношению к коэффициенту регрессии a_1 :

$$H_0: |a_1| = 0 \quad (4)$$

Для проверки гипотезы рассчитывается выборочный критерий Стьюдента:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (5)$$

Тренд считается значимым, если оценка критерия Стьюдента превышает его критическое значение при заданном уровне значимости [3], т.е.

$$t > t_{кр}(\alpha, \nu = n-2) \quad (6)$$

При оценке значимости тренда через р-критерий (p-level), представляющий собой отношение коэффициента регрессии к его стандартному отклонению, который затем с учетом числа степеней свободы по распределению Стьюдента переводится в уровень значимости [3]. По существу, p-level представляет минимальный уровень значимости, при котором отвергается нулевая гипотеза (поскольку для всего анализа в этой работе уровень значимости принимается равным 5%, то значимым коэффициент регрессии будет считаться при значении р-критерия не выше 0,05).

Величина линейного тренда определяются как:

$$Tr = \frac{(a_0 + a_1 t_n) - (a_0 + a_1 t_1)}{n} = \frac{a_1(n-1)}{n} \approx a_1 \quad (7)$$

где n – длина ряда. Отсюда видно, что величина линейного тренда определяется коэффициентом регрессии [3].

В данной работе применялся гармонический анализ, представляющий собой разложение в ряд Фурье. Гармониками же называются слагаемые ряда Фурье:

$$U_n = A_n \cos(\omega t - \varphi_n), A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (8)$$

Величина A_n – амплитуда гармоники; φ_n – фаза гармоники, представляет собой временной интервал наступления первого максимума от начала отсчета [3].

Коэффициенты a_n и b_n :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt, b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (9)$$

Важной характеристикой гармоники является вклад в дисперсию исходного ряда:

$$V_i = A_i^2 / 2\sigma^2 \quad (10)$$

где σ^2 – дисперсия исходного ряда.

В данной работе применялся автокорреляционный анализ, в котором автокорреляционная функция (АФ) показывает степень линейной зависимости значений процесса от предшествующих значений, относящихся к различному сдвигу τ , т.е. характеризует внутреннюю структуру процесса, его динамику во временной области [3]. АФ имеет вид:

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{(N - \tau)\sigma^2} \quad (11)$$

Для оценки значимости коэффициентов автокорреляции составляется нулевая гипотеза вида $H_0: |r(\tau)| = 0$ при $\tau \neq 0$, которая проверяется по

критерию Стьюдента. Коэффициент автокорреляции окажется значимым, если будет выполняться следующее условие: $|r(\tau)|/\sigma_r(\tau) > t_{кр}$, где $t_{кр}$ – критическое значение критерия Стьюдента с уровнем значимости α и степенями свободы $(N-\tau-1)$, $\sigma_r(\tau)$ – стандартное отклонение ординат АФ, которое рассчитывается как:

$$\sigma_{r(\tau)} = \frac{1 - r^2(\tau)}{\sqrt{N - \tau - 1}} \quad (12)$$

В данной работе применялся взаимнокорреляционный анализ, в котором взаимнокорреляционная функция (ВКФ) характеризует степень коррелированности (взаимосвязи) двух временных реализаций [3]. При дискретных процессах вид формул для вычисления ВКФ следующий:

$$r_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(y_{i+\tau} - \bar{y})}{(N - \tau)\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

$$r_{yx}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (y_i - \bar{y})(x_{i-\tau} - \bar{x})}{(N - \tau)\sigma_x \sigma_y} \quad (14)$$

Для корреляционного анализа необходимо производить оценку значимости коэффициентов корреляции. Оценка осуществляется на основе нулевой гипотезы, которая выбирается относительно проверки r на равенство нулю, т.е. $H_0 : |r| = 0$ при $H_1 : |r| \neq 0$. Коэффициент корреляции считается значимым, если он отличается от нуля неслучайным образом, т.е. его величина существенно выше (прямая связь) или ниже (обратная связь) нуля. Для проверки будет использоваться формула:

$$r_{кр} = \frac{t_{кр}}{\sqrt{n - 2 + t_{кр}^2}} \quad (15)$$

1. Среднее многолетнее состояние морской воды на разрезе через Датский пролив

Рассмотрим, как в исследуемом разрезе распределяются среднемноголетние характеристики.

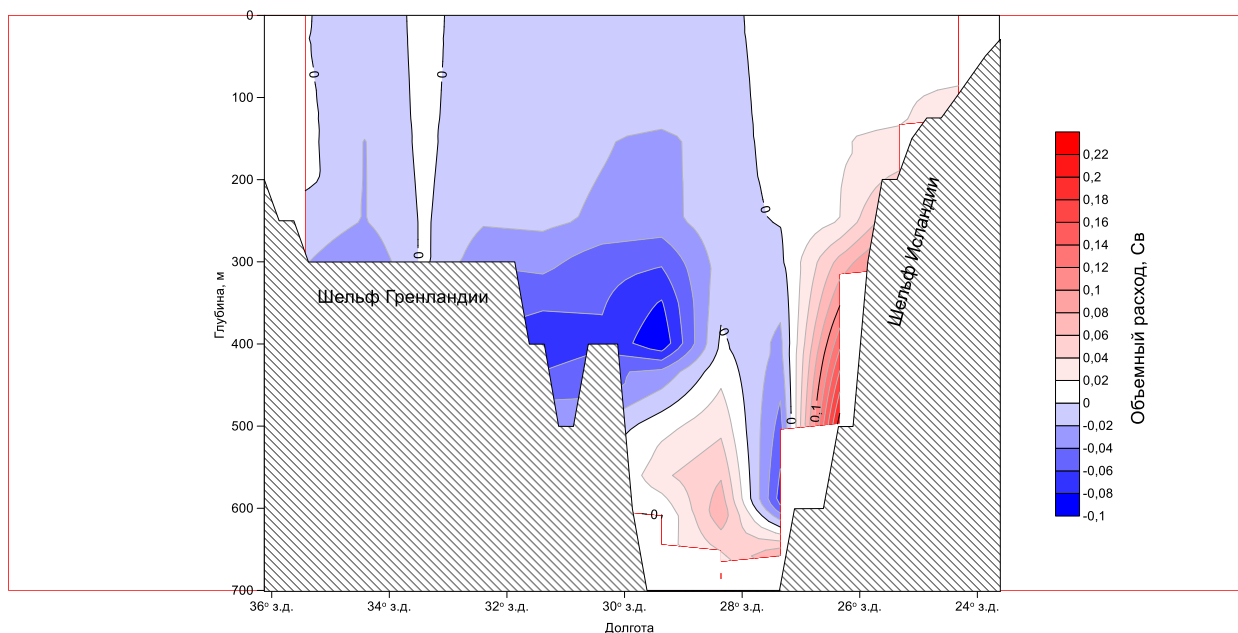


Рисунок 1.1. Распределение среднемноголетних значений объемного расхода на исследуемом разрезе за период с 1993 по 2016 гг., с положительным знаком обозначены затоки с юга, вносимые течением Ирмингера, а с отрицательным - затоки с севера, вносимые Восточно-Гренландским течением. Показан расход через каждую ячейку разреза

Поскольку в формуле расчета объемного расхода фигурирует площадь сеточной ячейки распределения данных, то по определению с глубиной (и с увеличением площади ячеек) будет увеличиваться абсолютная величина расхода. Для нивелирования зависимости величины объемного расхода от глубины, рассмотрим среднемноголетнюю изменчивость другой составляющей объемного расхода – скорости движения потока.

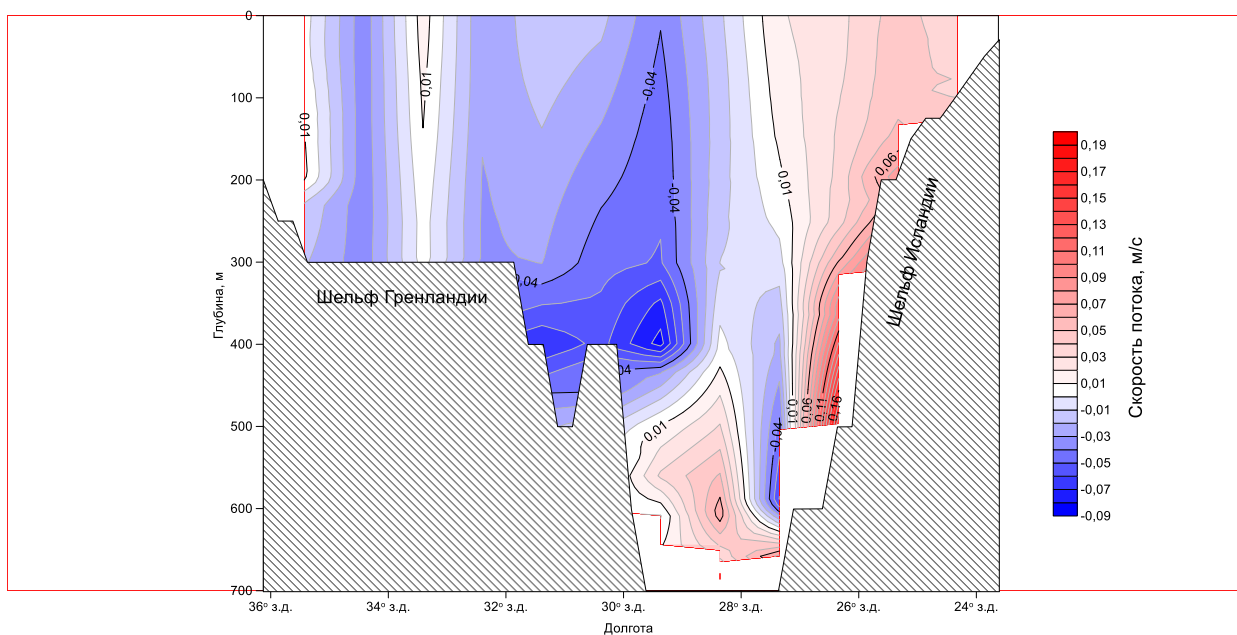


Рисунок 1.2. Распределение среднемноголетних значений скорости потока на исследуемом разрезе за период с 1993 по 2016 гг., с положительным знаком обозначены затоки с юга, а с отрицательным - затоки с севера

В пределах рассматриваемого разреза видим, что вдоль шельфа Гренландии движутся воды с севера на юг, а вдоль Исландского шельфа – в направлении на север. Как видно из рис.1.2 наибольшие значения объемного потока в направлении на север будут достигаться вдоль склона шельфа Исландии, а в направлении на юг – у склона гренландского шельфа на глубинах около 400 м.

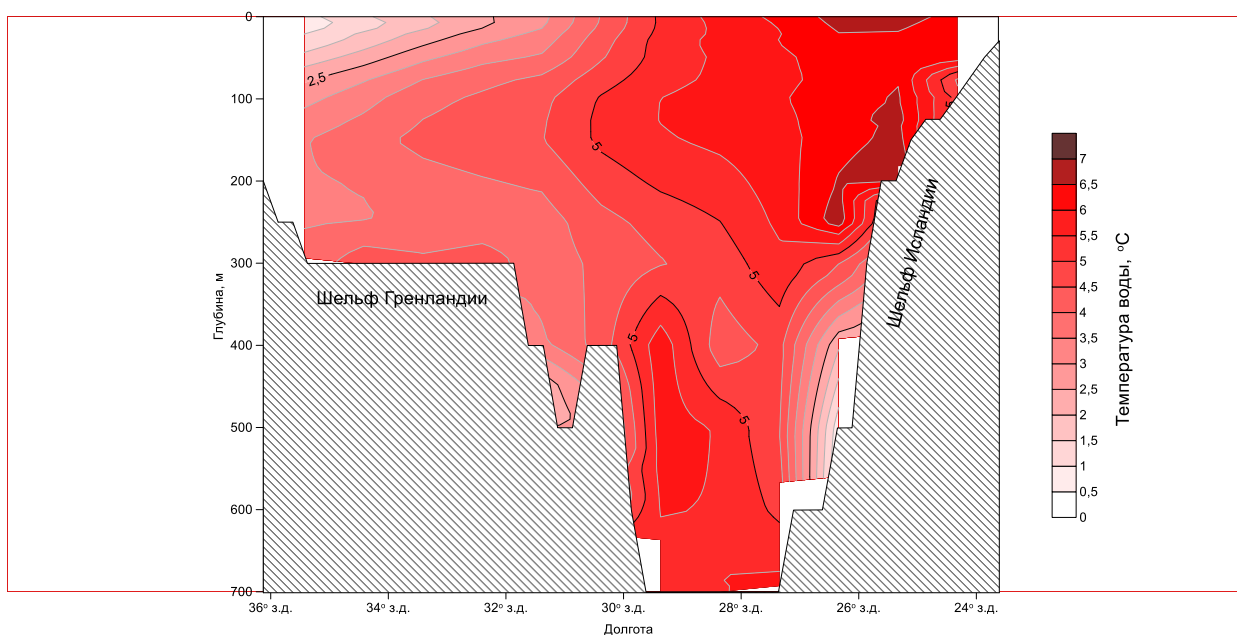


Рисунок 1.3. Распределение среднемноголетних значений температуры воды на исследуемом разрезе за период с 1993 по 2016 гг.

Соответственно распределению объемного расхода и рис.1.3 видно, что вдоль берегов Гренландии наблюдаются затоки холодной талой (см.рис.1.4) воды, а наибольшие температуры (порядка 6°C) вносятся в регион течением Ирмингера. Также наблюдается теплый подповерхностный слой (ТПС) на глубине порядка 150 м в районе шельфа Гренландии и холодный подповерхностный слой (ХПС) на глубине около 75 м в районе Исландии.

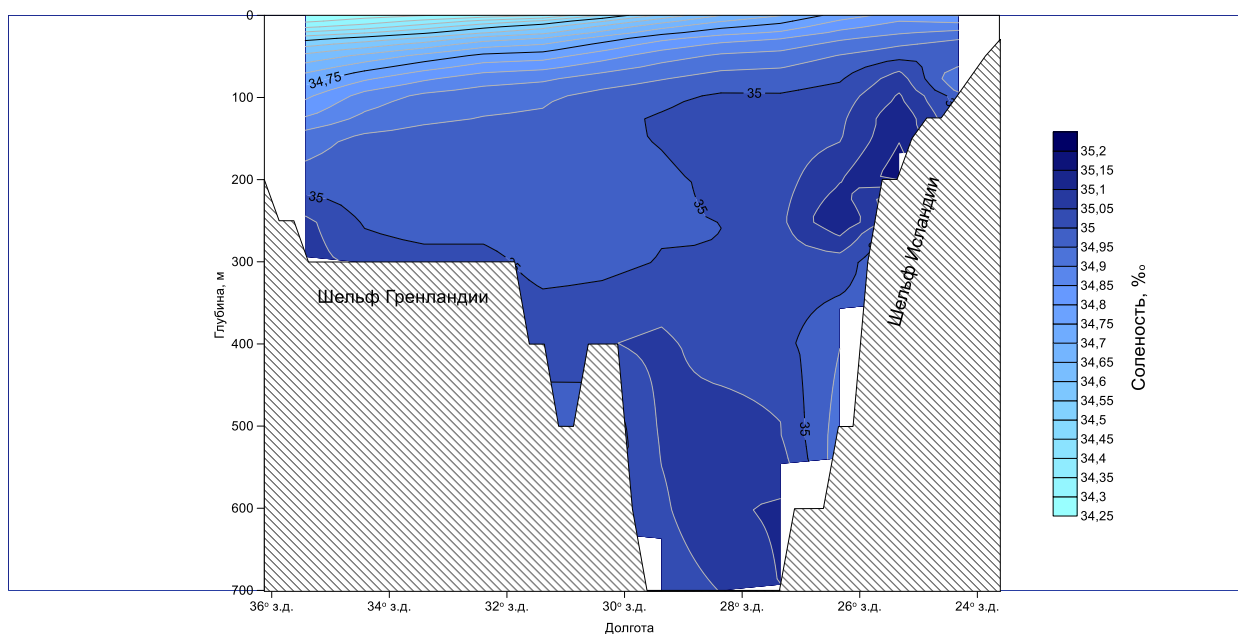


Рисунок 1.4. Распределение среднемноголетних значений солености воды на исследуемом разрезе за период с 1993 по 2016 гг.

На поверхности наблюдается распреснение с запада на восток, связанное с таянием льда в Гренландском море и у берегов Гренландии и, предположительно, таянием ледников Гренландии. Затоки распресненной воды, втягиваемые Восточно-Гренландским течением, наблюдаются вплоть до 300 м рассматриваемого разреза. Наибольшая соленость (порядка 35,2‰) вносится в регион течением Ирмингера и дислоцируется в областях наибольшей температуры воды.

2. Оценка трендов гидрометеорологических характеристик в Датском проливе

Динамику изменения характеристик рассмотрим по величинам трендов для данных областей.

Расчет величины трендов производился описанным выше методом, при этом незначимые тренды приравнивались к статистическому нулю и, соответственно, на рисунках эти величины трендов равняются 0.

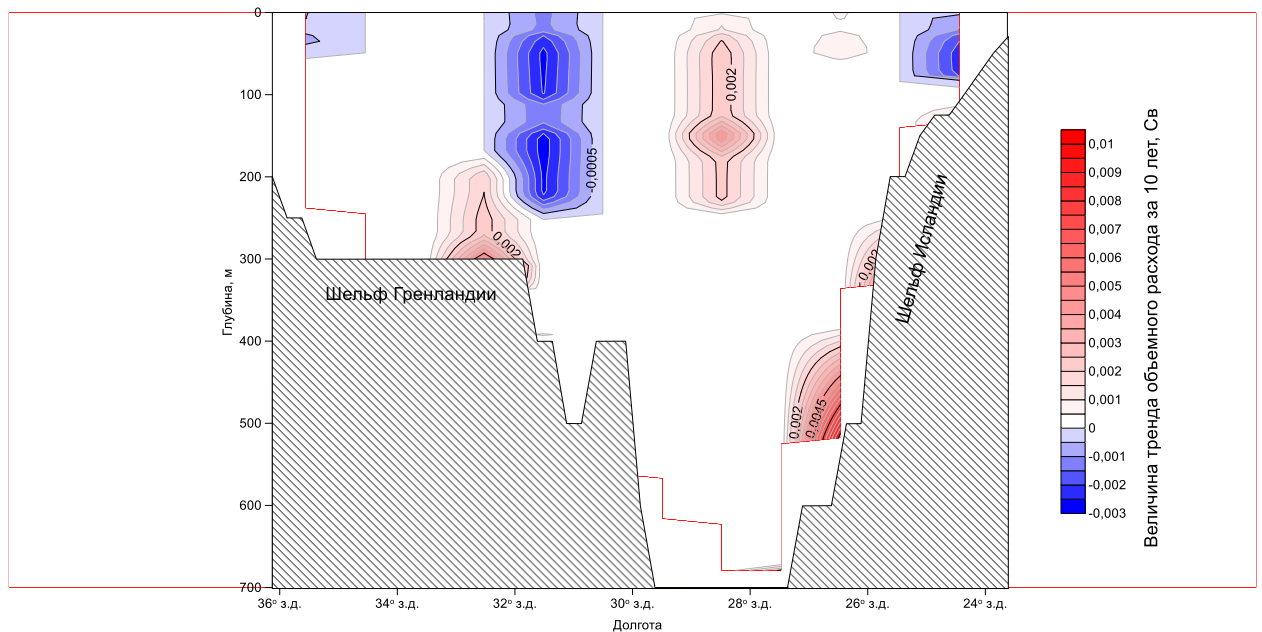


Рисунок 2.1. Распределение величины тренда объемного расхода за 10 лет на исследуемом разрезе

Изменение объемного расхода морской воды по времени обладает локальным характером, причем наибольшие изменения претерпевает поверхностный слой, так как в нем наблюдаются тренды и на уменьшение и на увеличение расхода. Наибольшие значения тренда располагаются вдоль восточного склона впадины и достигают до 0,01 Св/10 лет.

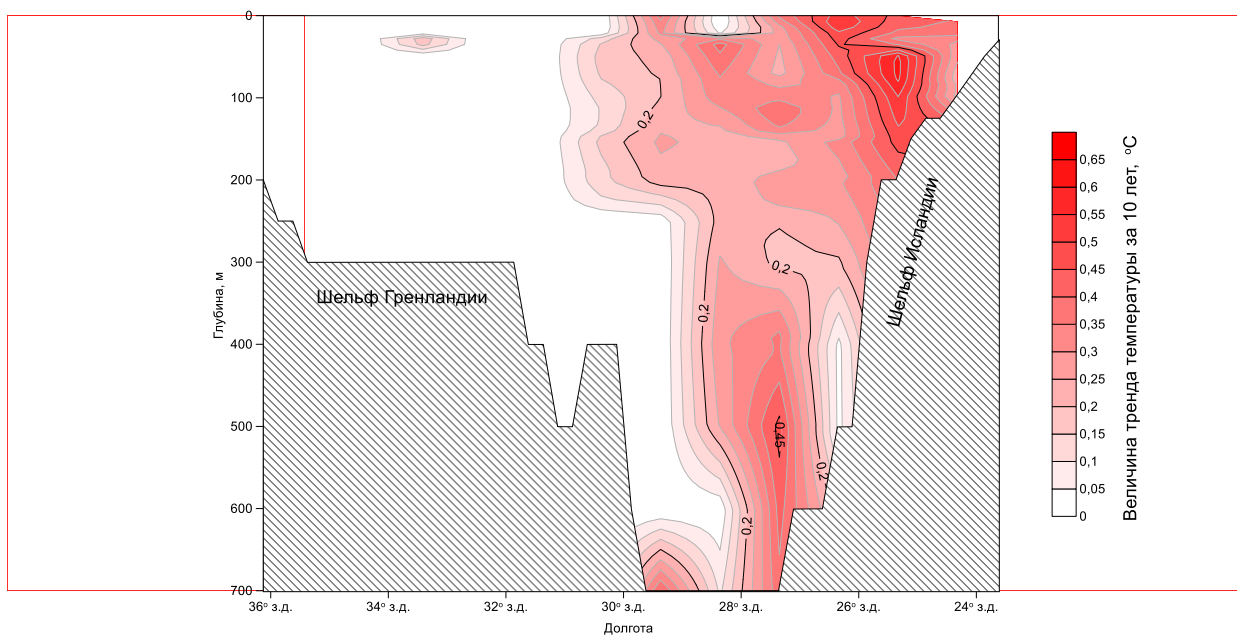


Рисунок 2.2. Распределение величины тренда температуры воды за 10 лет на исследуемом разрезе

Вдоль всего разреза наблюдается тренд на увеличение температуры воды, причем максимальное увеличение наблюдается в районе ХПС у шельфовой зона Исландии. Наибольшие значения трендов располагаются в затоках течения Ирмингера.

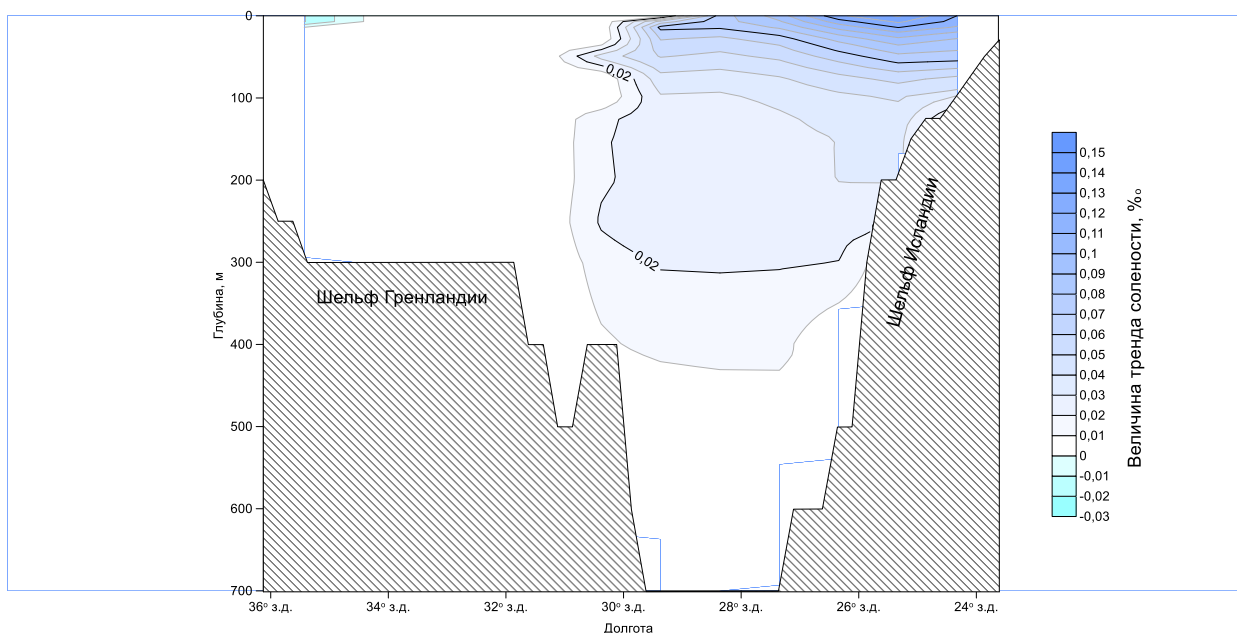


Рисунок 2.3. Распределение величины тренда солености за 10 лет на исследуемом разрезе

На разрезе наблюдаются тренды как на осолонение, так и на распреснение воды. Так, в поверхностном слое у берегов Гренландии до долготы 34° в.д. наблюдается распреснение величиной порядка 0,1 ‰ за 10 лет. В районе Исландии к западу до долготы 30° в.д. отмечается увеличение солёности (до 0,14 ‰ за декаду) с максимумом на долготе 25° в.д., эта зона с уменьшающейся величиной тренда распространяется с приповерхностного уровня до глубины 400 м.

Наибольшие тренды характеристик температуры и солёности содержатся в потоках, вносимых течением Ирмингера, что говорит об едином происхождении этого потока: теплого и осолоненного.

3. Исследование временных рядов гидрометеорологических характеристик в Датском проливе

Для оценки изменения во времени численных оценок объемного расхода выделим 3 временных ряда: 1) интегральный объемный расход в направлении на юг (Восточно-Гренландское течение), 2) интегральный объемный расход в направлении на север (течение Ирмингера) и 3) общий интегральный объемный расход. Рассчитывались эти ряды следующим образом: первый – последовательным суммированием значений исходного ряда меньше нуля, второй – так же последовательным суммированием значений, превышающих 0, третий – суммой первого и второго рядов. При этом знак при характеристике будет исключительно информацией о направлении потока.

И тогда поочередно рассмотрим каждый из них.

3.1. Характеристики общего интегрального объемного расхода

Общий интегральный расход считается как сумма интегральных потоков по направлениям. Он показывает собой не столько характеристику усиления (ослабления) расхода, сколько преобладающее направление движения воды через исследуемый разрез.

Поскольку, исходя из имеющихся данных, поток на север считался с положительным знаком, а на юг – с отрицательным, то увеличение интегрального объемного расхода ознаменует собой преобладание потоков в направлении на север (течение Ирмингера), а уменьшение наоборот преобладание потоков с севера (Восточно-Гренландское течение).

Для общего интегрального расхода морской воды за 24 года существует тренд на увеличение (то есть на преобладание потоков в

направлении на север). Рассчитаем линейный и нелинейный (аппроксимируемый полиномом 2 степени) тренды:

$$\text{Tr}(Q_{\text{int}}) = 0,002*t-2,72 \quad (3.1.1)$$

$$\text{Tr}(Q_{\text{int}}) = 7*10^{-5}*t^2-0,018*t-1,73 \quad (3.1.2)$$

Проверим на значимость линейный тренд: р-критерий при коэффициенте регрессии (коэффициенте при переменной) равен 0,095. Поскольку для анализа определен уровень значимости 5%, то критическое значение р-критерия равно 0,05. Так как р-критерий при коэффициенте превышает критическое значение, линейный тренд считается незначимым.

Проверим на значимость нелинейный тренд: р-критерии при коэффициентах регрессии равны $2,8*10^{-4}$ и $1,9*10^{-3}$. Значения р-критерия не превышают критического, следовательно, нелинейный тренд считается значимым при выбранном уровне значимости.

Коэффициент детерминации нелинейного тренда (3.1.2) составляет 0,055, что значит что нелинейный тренд описывает 5,5% дисперсии исходного ряда.

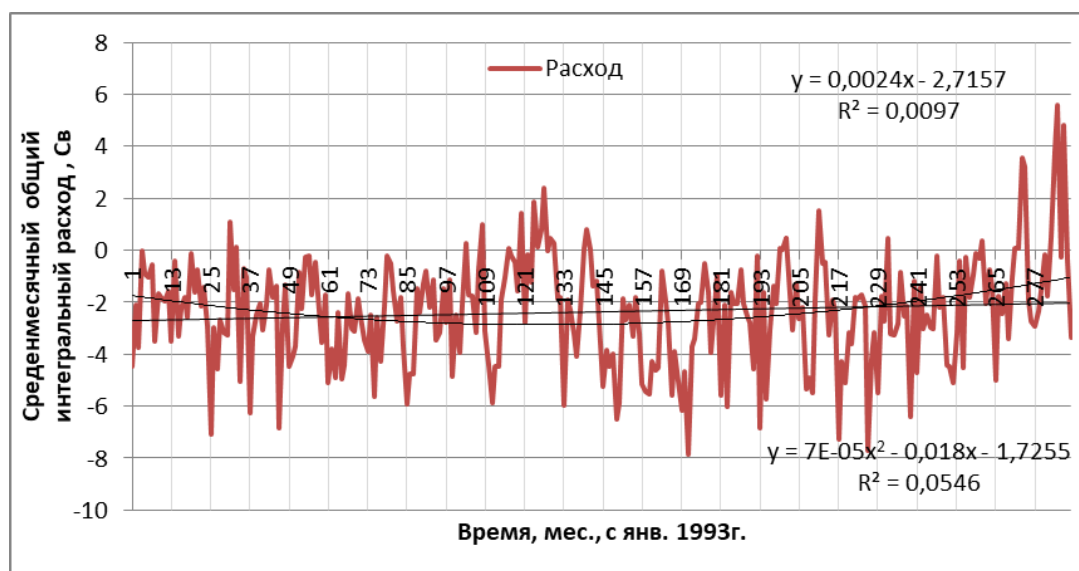


Рисунок 3.1.1. График распределения общего интегрального объемного расхода с 01.1993 по 12.2016 гг.

Далее произведем гармонический анализ для выявления циклических составляющих в ряду данных. По ряду отклонений значений общего

интегрального объемного расхода морской воды от значения нелинейного тренда (3.1.2) построим периодограмму (рис.3.1.2).

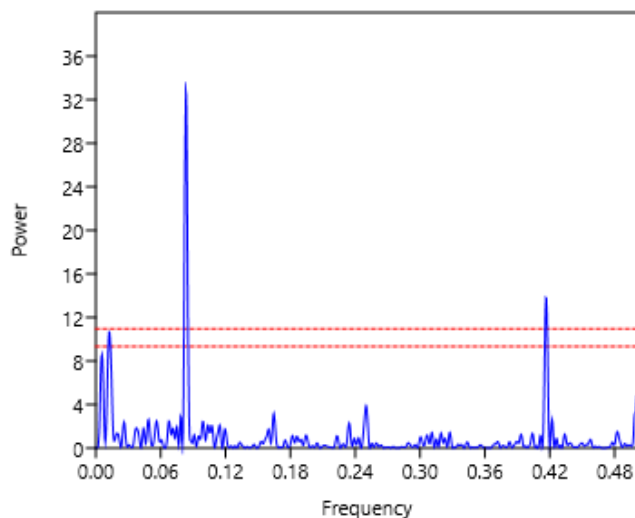


Рисунок 3.1.2. Периодограмма ряда отклонений от тренда

Для уровня значимости 5% значимыми являются гармоники с амплитудой выше значения 9,36. На периодограмме (рис.3.1.2) есть 3 пика гармоник, удовлетворяющих данному условию. Для них рассчитаем гармоники с периодами 82 мес (6,8 лет), 12 и 2,4 месяца.

Таблица 3.1.1. Характеристики гармоник

Период, мес	82,001	12,021	2,402
Частота, рад/мес	0,077	0,523	2,616
Коэффициент a	0,257	-1,036	-0,858
Коэффициент b	-0,732	-0,879	0,200
Амплитуда	0,776	1,359	0,881
Фаза, рад	2,804	4,009	4,941
Фаза, мес	36,591	7,670	1,889
Дисперсия	0,301	0,923	0,388
Вклад	0,169	0,519	0,218

Таким образом, для общего интегрального объемного расхода морской воды наибольший вклад вносится годовой гармоникой. При интерпретации в физических терминах получается, что с периодичностью раз в год в середине июля (7,7 мес от начала отсчета) в Датском проливе расход морской воды преимущественен в направлении на север.

Суммарно гармоники описывают 91% дисперсии ряда отклонений и 86% дисперсии исходного ряда.

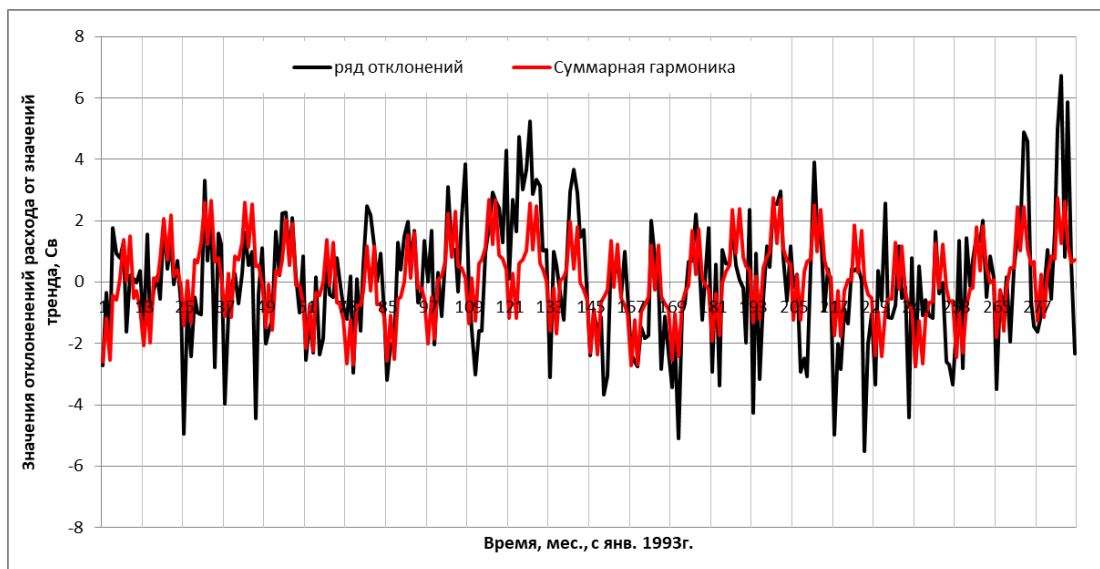


Рисунок 3.1.3. График распределения значения ряда отклонений и суммарной гармоники

Далее для ряда отклонения от гармоник составим автокорреляционную функцию (АКФ):

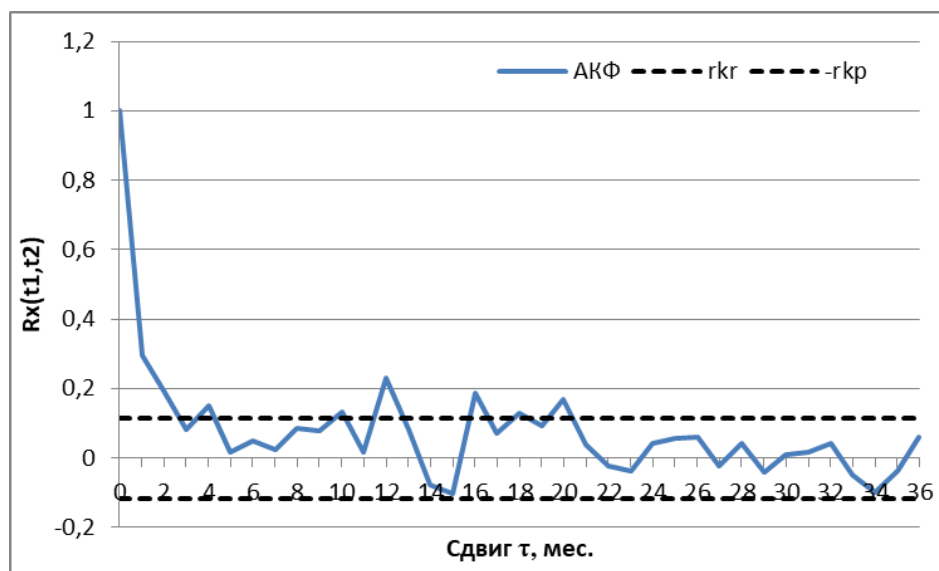


Рисунок 3.1.4. АКФ для ряда отклонений

По виду АКФ можно сказать, что процесс носит смешанный характер и состоит из «красного шума» и квазипериодического процесса с периодом 4 месяца. Инерционность процесса составляет 14 месяцев.

Для оценки возможной описываемой дисперсии исходного ряда составим авторегрессию 1 порядка (АР) и проверим ее на независимой части выборки. Определим независимой частью ряд длиной в 5 лет, с 01.2012 по 12.2016гг. Заблаговременность выберем равной 12 месяцам, как сдвиг при наибольшем коэффициенте корреляции.

$$Q_{i+12}=0,25*Q_i-0,102 \quad (3.1.3)$$

Проверим на значимость АР (3.1.3): р-критерий коэффициента регрессии составляет $4,6*10^{-4}$, что меньше критического значения р-критерия, и можно считать модель авторегрессии значимой.

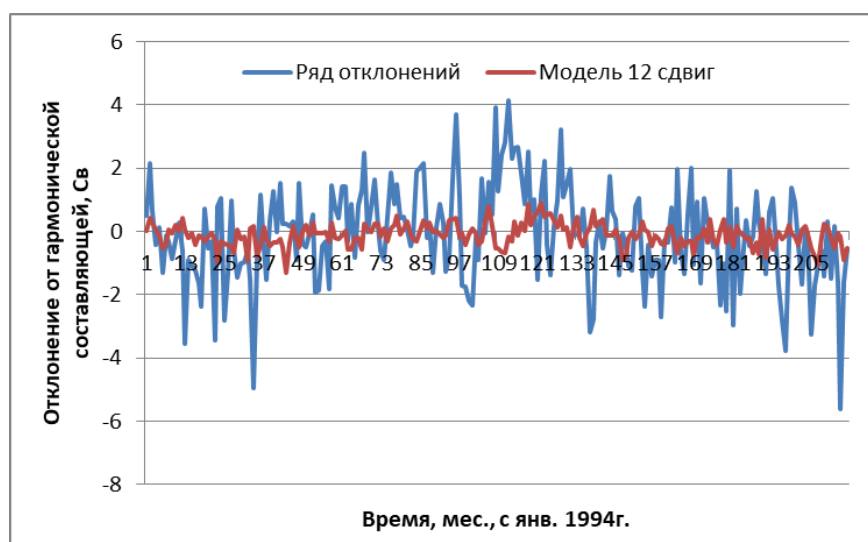


Рисунок 3.1.5. Ряд отклонений и модель АР (3.1.3) для зависимой части выборки с 01.1994 по 12.2011гг.



Рисунок 3.1.6. Ряд отклонений и модель АР (3.1.3) для независимой части выборки с 01.2012 по 12.2016гг.

Для оценки ошибки независимого прогноза сравним стандартное отклонение исходного ряда ($\sigma_{\text{ТПО}}$), стандартную ошибку модели ($\sigma_{\text{м}}$) и стандартную ошибку независимой оценки ($\sigma_{\text{нм}}$):

$$\sigma_{\text{ТПО}} = 2,07 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{м}} = 1,48 \text{ (Св)}$$

Превышение стандартного отклонения исходного ряда над среднеквадратической ошибкой модели позволяет говорить о малости ошибок модели АР.

$$\sigma_{\text{м}} = 1,48 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{нм}} = 0,42 \text{ (Св)}$$

Превышение среднеквадратической ошибки модели над ошибкой независимой оценки позволяет говорить о приемлемости модели для прогноза рассматриваемого процесса.

Коэффициент детерминации АР (3.1.3) составляет 0,056, что говорит о том, что авторегрессия описывает 5,6% дисперсии ряда отклонений (0,5% дисперсии исходного ряда расхода).

Суммарно все вышеописанные действия позволяют описать 92% дисперсии исходного ряда, а на шум приходятся оставшиеся 8% дисперсии.

Тогда можно восстановить исходный ряд по полученным значениям:

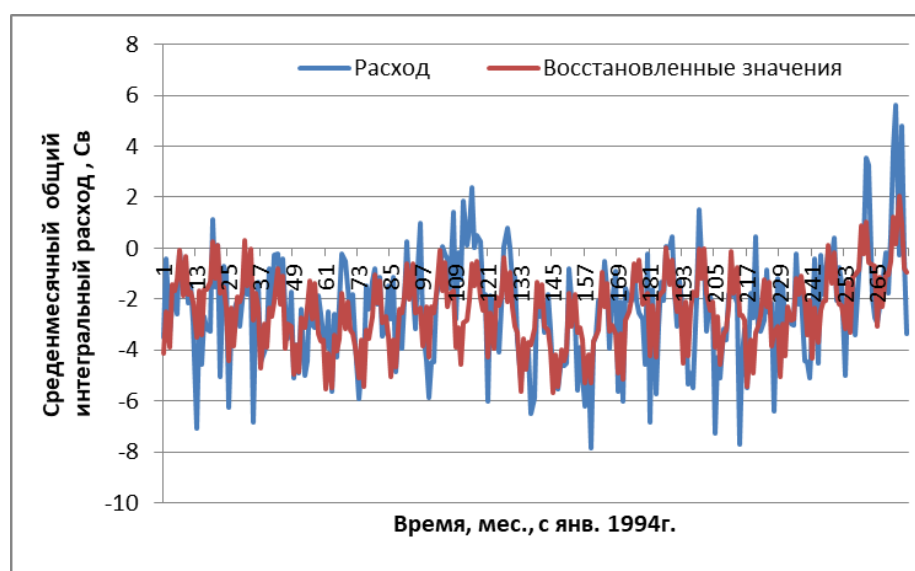


Рисунок 4.8. Исходные и восстановленные значения среднемесячного интегрального расхода в направлении на север с 03.1993 по 12.2016гг.

3.2. Характеристики интегрального объемного расхода в направлении на юг (Восточно-Гренландское течение)

Для интегрального объемного расхода в направлении на юг за 24 года существует тренд на уменьшение объемного расхода, причем в отдельности за последние 6 лет величина тренда составляет $-0,4\text{Св/год}$.

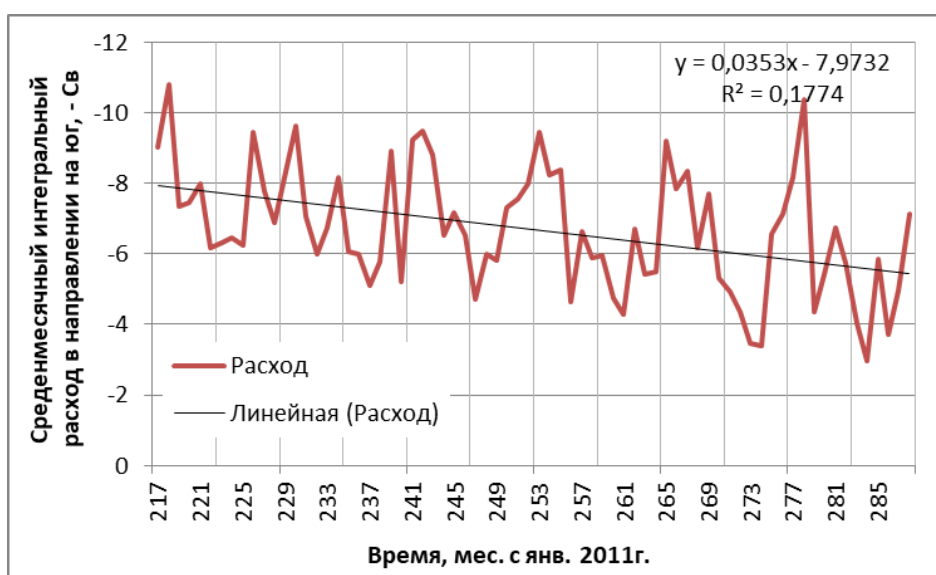


Рисунок 3.2.1. График распределения интегрального объемного расхода в направлении на юг с 01.2011 по 12.2016гг.

Рассчитаем линейный и нелинейный (аппроксимируемый полиномом 2 степени) тренды для всего исследуемого промежутка времени:

$$\text{Tr}(Q_{\text{south}}) = -2,57 \cdot 10^{-4} \cdot t - 6,56 \quad (3.2.1)$$

$$\text{Tr}(Q_{\text{south}}) = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,007 \cdot t - 6,24 \quad (3.2.2)$$

Проверим на значимость линейный тренд: р-критерий при коэффициенте регрессии (коэффициенте при переменной) равен 0,83, критическое значение р-критерия равно 0,05. Так как р-критерий при коэффициенте превышает критическое значение, линейный тренд считается незначимым.

Проверим на значимость нелинейный тренд: р-критерии при коэффициентах регрессии равны 0,140 и 0,143. Значения р-критерия также превышают критическое, следовательно, нелинейный тренд тоже считается незначимым при выбранном уровне значимости.

Поскольку для интегрального объемного расхода морской воды в направлении на юг нет значимого тренда, то для построения ряда отклонений используется среднее значение расхода. $\bar{Q}_{south} = 6,60$ Св. В виду этого, вклад тренда в описание дисперсии ряда отсутствует.

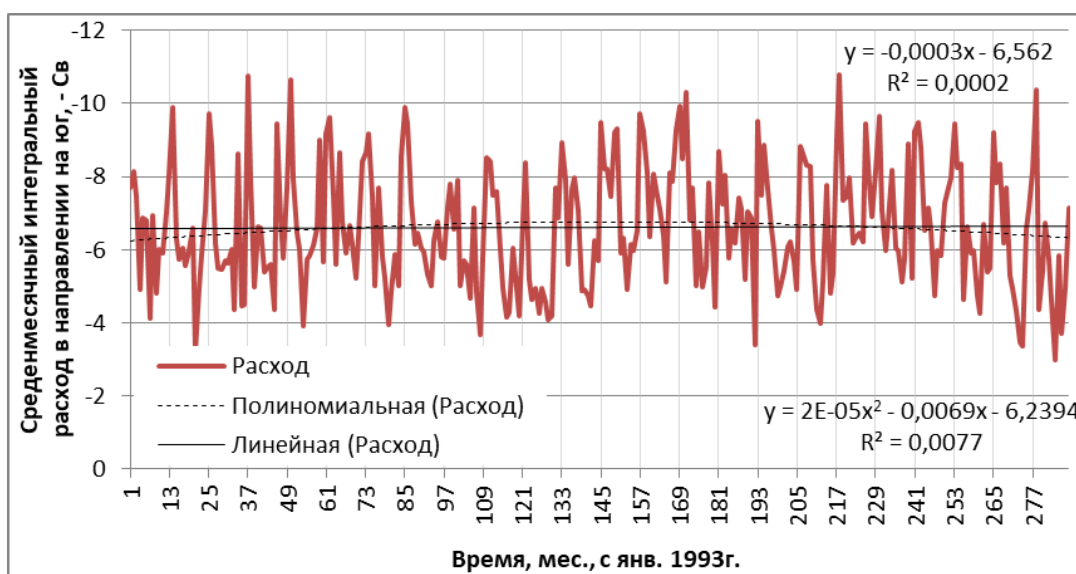


Рисунок 3.2.2. График распределения интегрального объемного расхода в направлении на юг с 01.1993 по 12.2016 гг.

Далее производится гармонический анализ для выявления циклических составляющих. По ряду отклонений значений интегрального объемного расхода в направлении на юг от среднего значения строится периодограмма (рис.3.2.3).

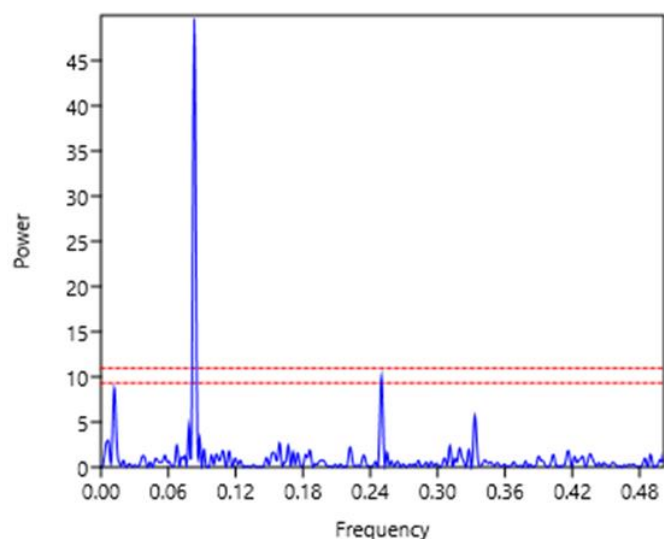


Рисунок 3.2.3. Периодограмма ряда отклонений от среднего значения.

Для уровня значимости 5% значимыми являются гармоники с амплитудой выше значения 9,36. На периодограмме (рис.3.2.3) есть 2 пика гармоник, удовлетворяющие данному условию. Для них рассчитаем гармоники с периодами 12 и 4 месяца.

Таблица 3.2.1. Характеристики гармоник

Период, мес	12,021	4
Частота, рад/мес	0,523	1,571
Коэффициент a	-1,104	-0,210
Коэффициент b	-0,785	0,577
Амплитуда	1,354	0,614
Фаза, рад	4,094	5,934
Фаза, мес	7,833	3,778
Дисперсия	0,917	0,188
Вклад	0,337	0,069

Таким образом, для интегрального объемного расхода в направлении на юг, вносимого в исследуемую область Восточно-гренландским течением, значительный вклад в описание дисперсии исходного ряда вносится годовой гармоникой. При интерпретации в физических терминах получается, что с периодичностью раз в год к концу июля (7,8 мес от начала отсчета) в Датском проливе максимален расход морской воды в направлении на юг.

Суммарно гармоники описывают 40,6% дисперсии исходного ряда.

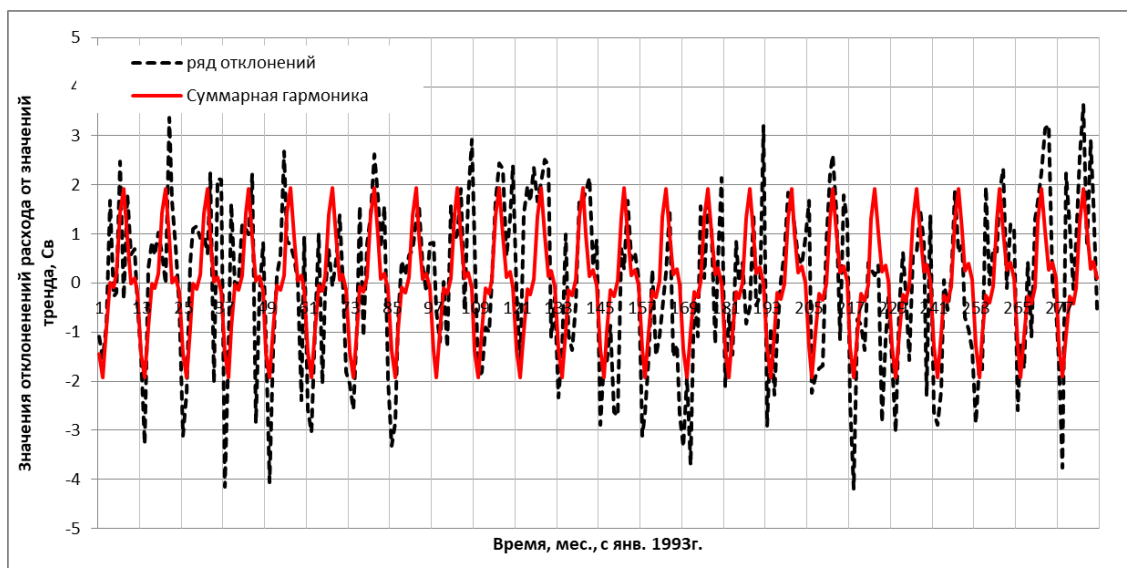


Рисунок 3.2.4. График распределения значения ряда отклонений и суммарной гармонике

Далее для ряда отклонения от гармоник составим автокорреляционную функцию (АКФ):

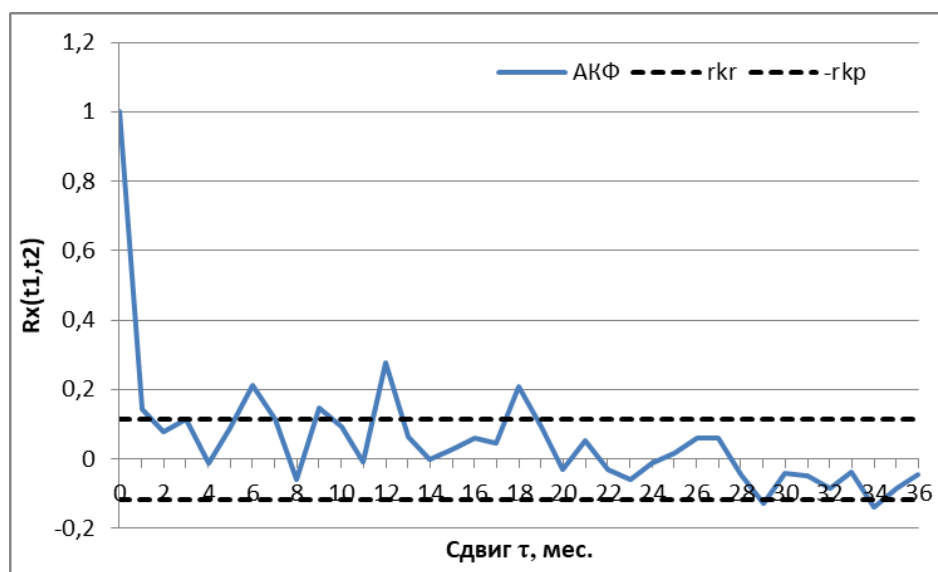


Рисунок 3.2.5. АКФ для ряда отклонений

По виду АКФ можно сказать, что тип процесса смешанный. Состоит из простой цепи Маркова 1 порядка (поскольку АКФ на 1 сдвиге значима) и квазигармонического процесса с периодичностью 6 месяцев, причем эта периодичность угасает после 18 сдвига. Инерционность процесса составляет 4 месяца.

Для оценки возможной описываемой дисперсии исходного ряда составим авторегрессию 1 порядка (АР) и проверим ее на независимой части выборки. Определим независимой частью ряд длиной в 5 лет, с 01.2012 по 12.2016гг. Заблаговременность выберем равной 12 месяцам, как сдвиг при наибольшем коэффициенте корреляции.

$$Q_{i+12}=0,29*Q_i-0,01 \quad (3.2.3)$$

Проверим на значимость АР (3.2.3): р-критерий коэффициента регрессии составляет $3,9*10^{-4}$, что меньше критического значения р-критерия, и можно считать модель авторегрессии значимой.

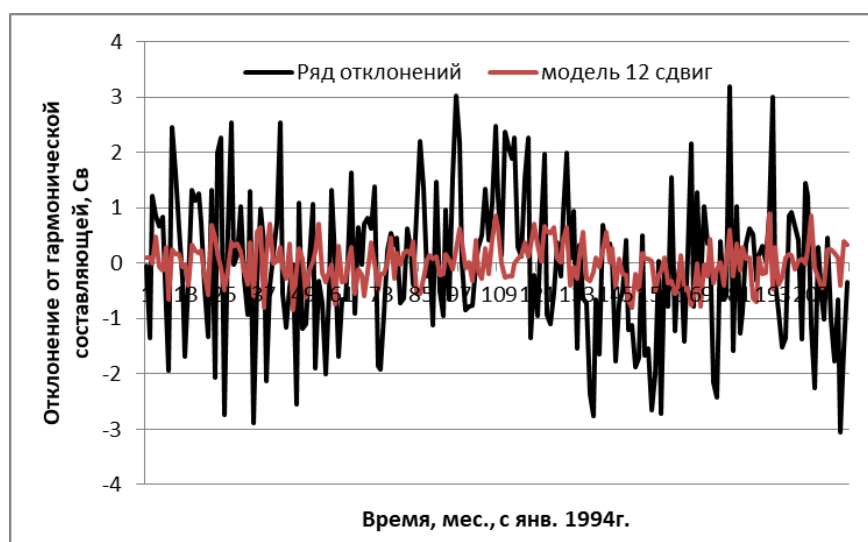


Рисунок 3.2.6. Ряд отклонений и модель АР (3.2.3) для зависимой части выборки с 01.1994 по 12.2011гг.

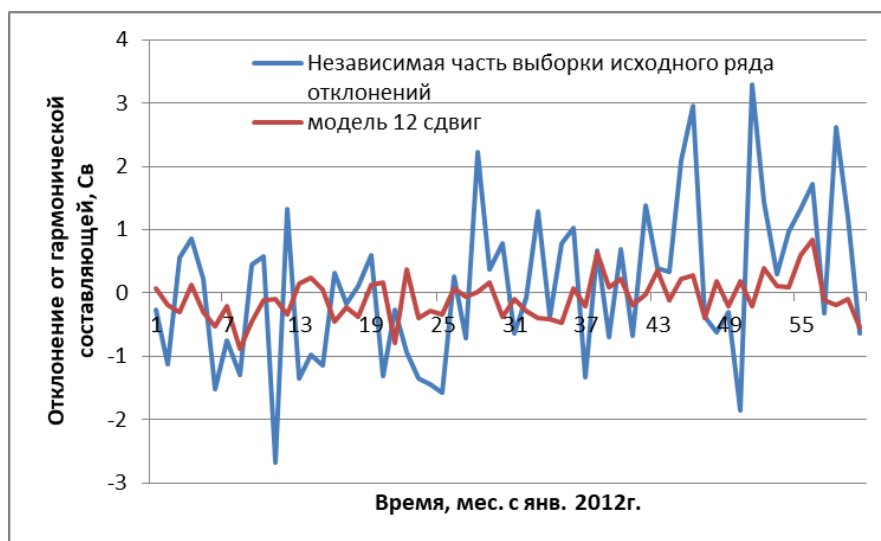


Рисунок 3.2.7. Ряд отклонений и модель АР (3.2.3) для независимой части выборки с 01.2012 по 12.2016гг.

Для оценки ошибки независимого прогноза сравним стандартное отклонение исходного ряда ($\sigma_{\text{ТПО}}$), стандартную ошибку модели ($\sigma_{\text{М}}$) и стандартную ошибку независимой оценки ($\sigma_{\text{НМ}}$):

$$\sigma_{\text{ТПО}} = 1,64 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{М}} = 1,21 \text{ (Св)}$$

Превышение стандартного отклонения исходного ряда над среднеквадратической ошибкой модели позволяет говорить о малости ошибок модели АР.

$$\sigma_{\text{М}} = 1,21 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{НМ}} = 0,34 \text{ (Св)}$$

Превышение среднеквадратической ошибки модели над ошибкой независимой оценки позволяет говорить о приемлемости модели для прогноза рассматриваемого процесса.

Коэффициент детерминации АР (3.1.3) составляет 0,080, что говорит о том, что авторегрессия описывает 8% дисперсии ряда отклонений (4,8% дисперсии исходного ряда расхода).

Суммарно все вышеописанные действия позволяют описать 45,4% дисперсии исходного ряда, а на шум приходится оставшиеся 54,6% дисперсии.

Тогда можно восстановить исходный ряд по полученным значениям:



Рисунок 3.2.8. Исходные и восстановленные значения среднемесячного интегрального расхода в направлении на юг с 01.1994 по 12.2016гг.

3.3. Характеристики интегрального объемного расхода в направлении на север (течение Ирмингера)

Для интегрального объемного расхода в направлении на север за 24 года существует тренд на увеличение объемного расхода, причем в отдельности за последние 6 лет величина тренда составляет 0,36Св/год.

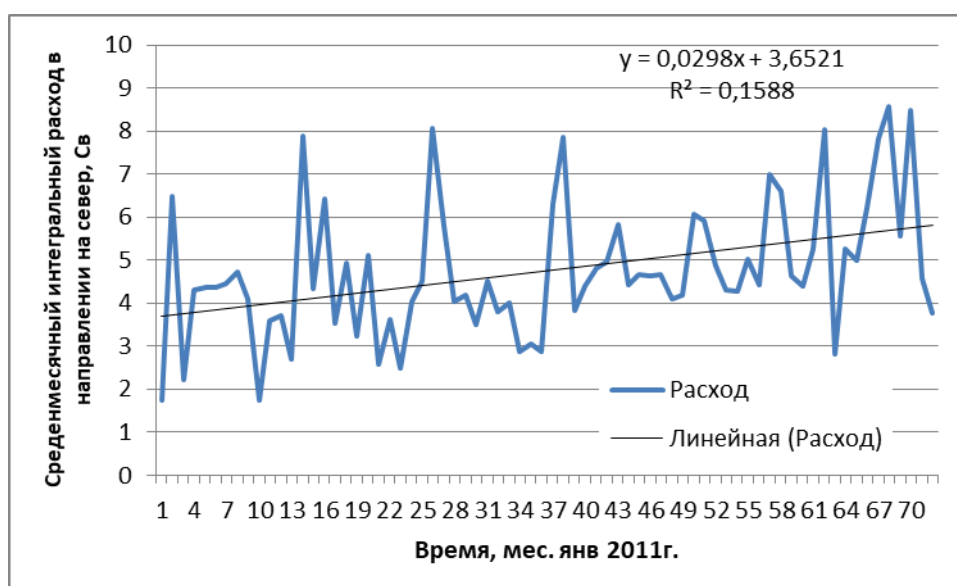


Рисунок 3.3.1. График распределения интегрального объемного расхода в направлении на север с 01.2011 по 12.2016гг.

Рассчитаем линейный и нелинейный (аппроксимируемый полиномом 2 степени) тренды:

$$\text{Tr}(Q_{\text{north}}) = 0,003 \cdot t + 3,846 \quad (3.3.1)$$

$$\text{Tr}(Q_{\text{north}}) = 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,01 \cdot t + 4,51 \quad (3.3.2)$$

Проверим на значимость линейный тренд: р-критерий при коэффициенте регрессии (коэффициенте при переменной) равен 0,004. Значение р-критерия не превышает критического, следовательно, линейный тренд считается значимым.

Проверим на значимость нелинейный тренд: р-критерии при коэффициентах регрессии равны $1 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-3}$. Значения р-критерия не

превышают критического, следовательно, нелинейный тренд считается значимым при выбранном уровне значимости.

Поскольку оба тренда являются значимыми, для дальнейшего анализа будем использовать такой тренд, который описывает большую часть дисперсии исходного ряда. Коэффициент детерминации линейного тренда составляет 0,029, следовательно, тренд описывает 2,9% дисперсии исходного ряда. А коэффициент детерминации нелинейного тренда больше и составляет 0,078, и тренд описывает 7,8% дисперсии исходного ряда.

Для дальнейших расчетов будем использовать нелинейный тренд (3.3.2).

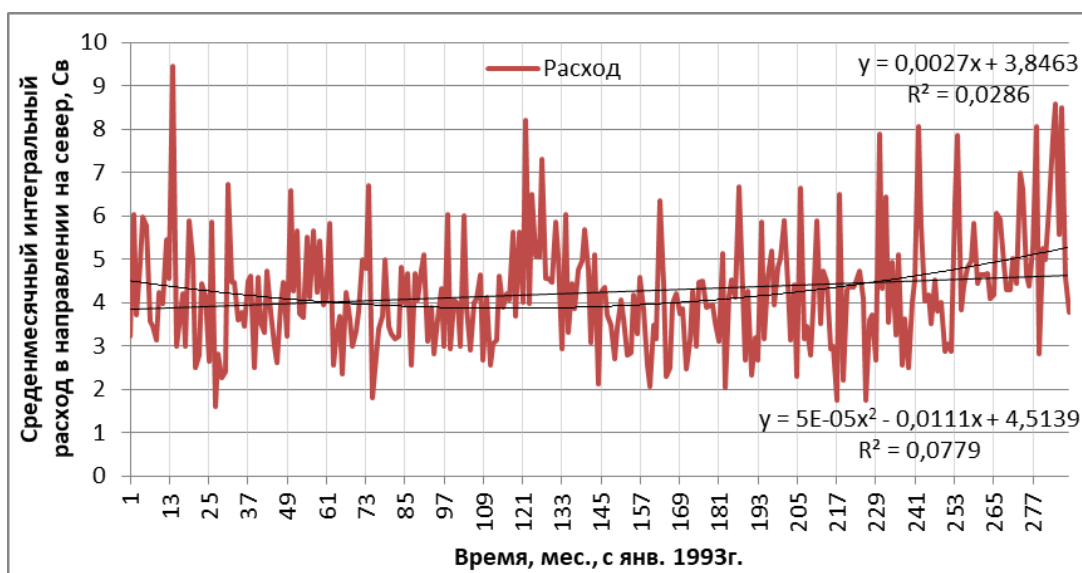


Рисунок 3.3.2. График распределения интегрального объемного расхода в направлении на север с 01.1993 по 12.2016 гг.

Далее производится гармонический анализ для выявления циклических составляющих. По ряду отклонений значений интегрального объемного расхода в направлении на север от значения нелинейного тренда (3.3.2) строится периодограмма (рис.3.3.3).

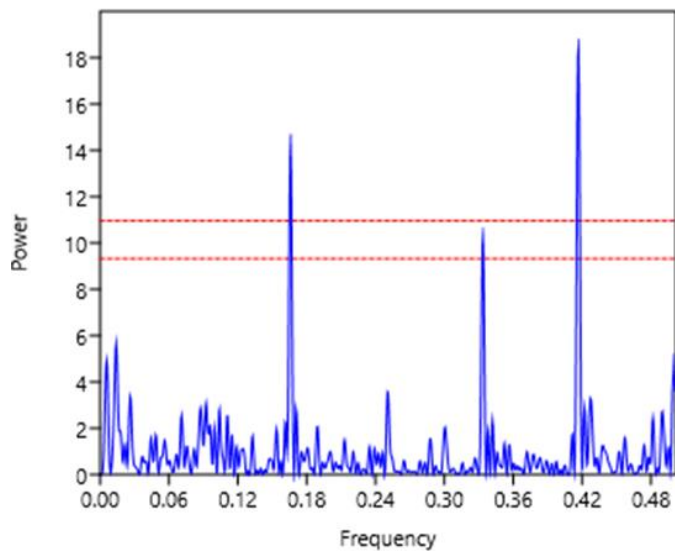


Рисунок 3.3.3. Периодограмма ряда отклонений от тренда.

Для уровня значимости 5% значимыми являются гармоники с амплитудой выше значения 9,36. На периодограмме (рис.3.3.3) есть 3 пика гармоник, удовлетворяющие данному условию. Для них рассчитаем гармоники с периодами 6, 3 и 2,4 месяца.

Таблица 3.3. Характеристики гармоник

Период, мес	6,026	2,997	2,399
Частота, рад/мес	1,043	2,096	2,619
Коэффициент a	0,439	-0,315	-0,490
Коэффициент b	0,365	-0,366	0,423
Амплитуда	0,571	0,483	0,647
Фаза, рад	0,878	3,853	5,424
Фаза, мес	0,842	1,838	2,071
Дисперсия	0,163	0,117	0,209
Вклад	0,092	0,066	0,118

Таким образом, для интегрального объемного расхода морской воды в направлении на север, вносимого в исследуемую область течением Ирмингера, вклад в описание дисперсии исходного ряда вносится полугодовой, четверть-годовой и 2,5-месячной изменчивостью в примерно равных долях.

Суммарно гармоники описывают 20% дисперсии ряда отклонений и 18% от исходного ряда.

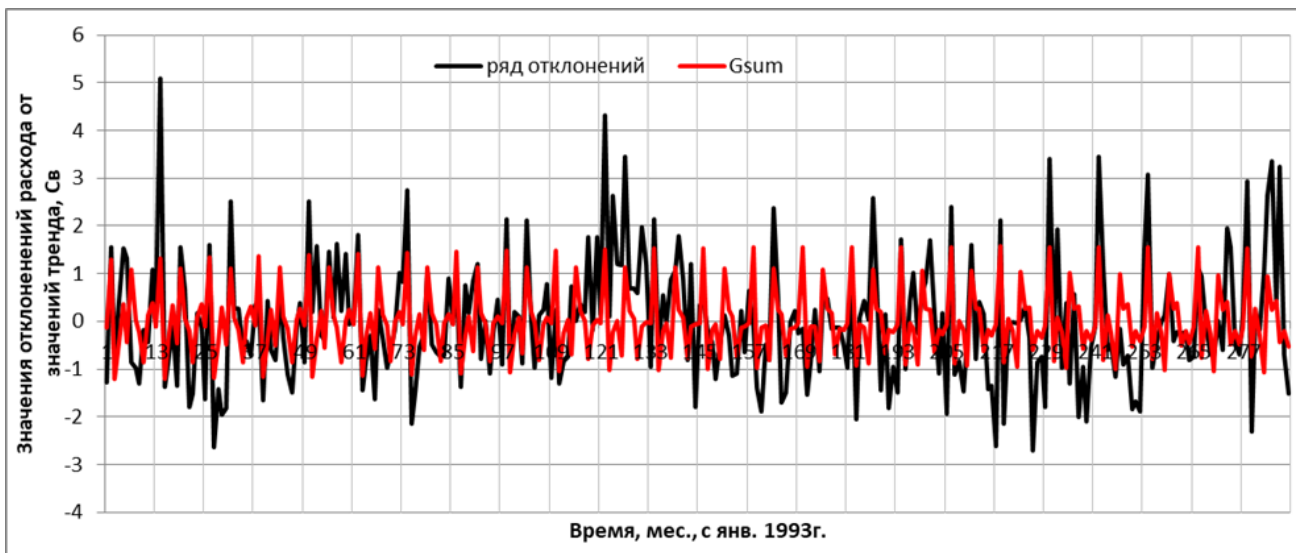


Рисунок 3.3.4. График распределения значения ряда отклонений и суммарной гармоник

Далее для ряда отклонения от гармоник составим автокорреляционную функцию (АКФ):

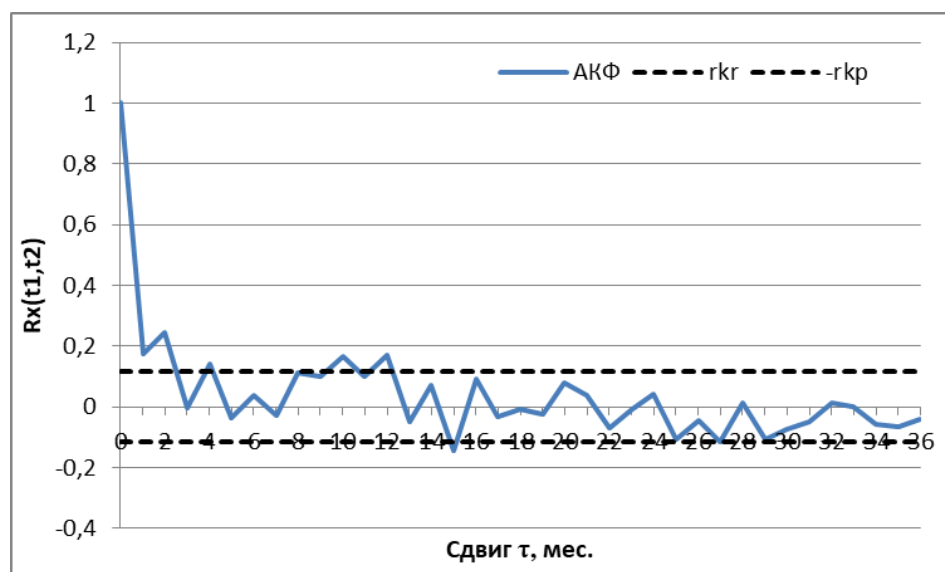


Рисунок 3.3.5. АКФ для ряда отклонений

По виду АКФ можно сказать, что процесс развивается по типу модели «красный шум». Инерционность процесса составляет 3 месяца.

Для оценки возможной описываемой дисперсии исходного ряда составим авторегрессию 1 порядка (АР) и проверим ее на независимой части выборки. Определим независимой частью ряд длиной в 5 лет, с 01.2012 по

12.2016гг. Заблаговременность выберем равной 2 месяцам, как сдвиг при наибольшем коэффициенте корреляции.

$$Q_{i+2}=0,26*Q_i -0,01 \quad (3.3.3)$$

Проверим на значимость АР (3.3.3): значение р-критерия коэффициента регрессии составляет $6,3*10^{-5}$, что меньше критического значения р-критерия, и можно считать модель авторегрессии значимой.

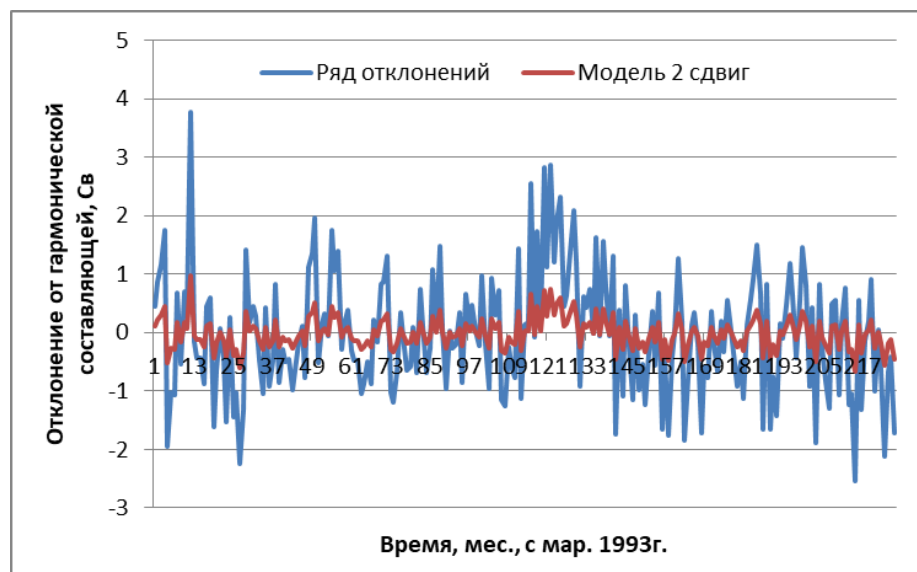


Рисунок 3.3.6. Ряд отклонений и модель АР (3.3.3) для зависимой части выборки с 03.1993 по 12.2011гг.

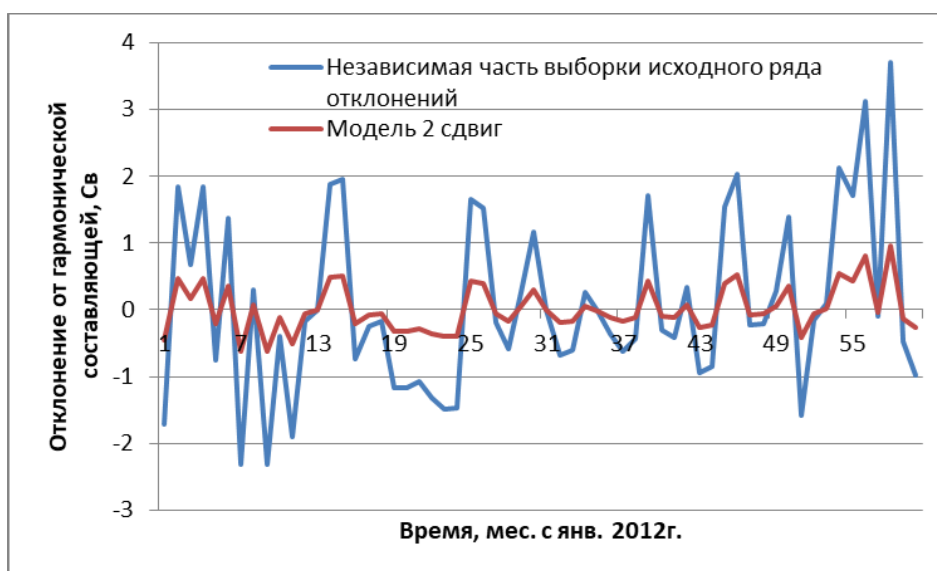


Рисунок 3.3.7. Ряд отклонений и модель АР (3.3.3) для независимой части выборки с 01.2012 по 12.2016гг.

Для оценки ошибки независимого прогноза сравним стандартное отклонение исходного ряда ($\sigma_{\text{ТПО}}$), стандартную ошибку модели ($\sigma_{\text{м}}$) и стандартную ошибку независимой оценки ($\sigma_{\text{нм}}$):

$$\sigma_{\text{ТПО}} = 1,33 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{м}} = 0,97 \text{ (Св)}$$

Превышение стандартного отклонения исходного ряда над среднеквадратической ошибкой модели позволяет говорить о малости ошибок модели АР.

$$\sigma_{\text{м}} = 0,97 \text{ (Св)} > \sigma_{\text{нм}} = 0,34 \text{ (Св)}$$

Превышение среднеквадратической ошибки модели над ошибкой независимой оценки позволяет говорить о приемлемости модели для прогноза рассматриваемого процесса.

АР описывает 7% дисперсии ряда отклонений (2% дисперсии исходного ряда расхода).

Суммарно все вышеописанные действия позволяют описать 27% дисперсии исходного ряда, а на шум приходятся оставшиеся 73% дисперсии.

Тогда можно восстановить исходный ряд по полученным значениям:

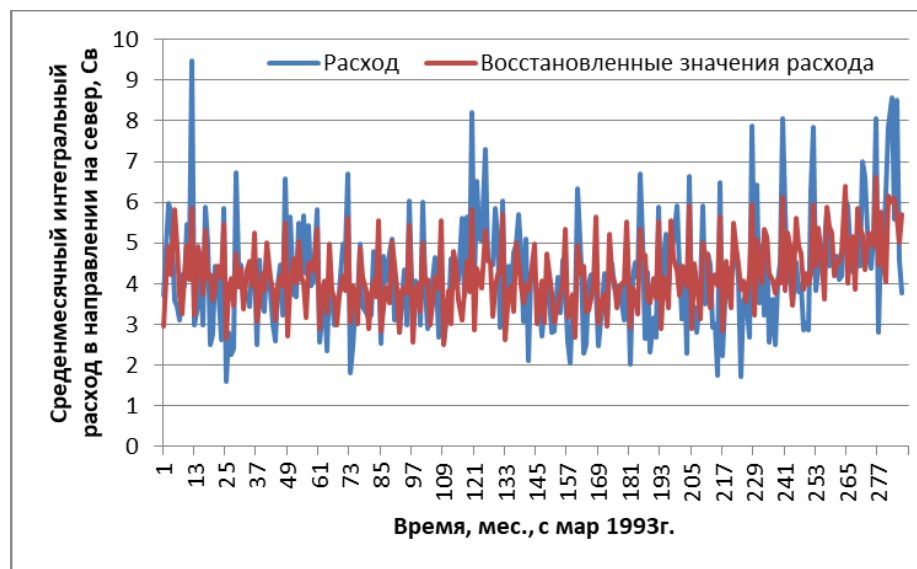


Рисунок 3.3.8. Исходные и восстановленные значения среднемесячного интегрального расхода в направлении на север с 03.1993 по 12.2016гг.

4. Связи характеристик, протекающих в исследуемом разрезе Датского пролива, с характеристиками в Гренландском море

В виду особенностей гидрологического режима Датского пролива процессы, протекающие и регистрируемые в проливе непосредственно связаны с гидрологическими процессами и явлениями в Гренландском море. Примерами такой взаимосвязи являются, прежде всего, процессы ледообразования (и разрушения льда) в Гренландском море, а также изменение физико-химических характеристик вод.

В этом разделе будет рассмотрена корреляция (взаимосвязь) изменения объемного расхода морской воды в Датском проливе и такой характеристики ледовитости Гренландского моря, как площадь покрытия моря льдом.

4.1. Взаимосвязь среднемесячных значений характеристик

Также как и в 3 разделе, анализ связей характеристик будет осуществляться покомпонентно, а именно связь общего интегрального расхода морской воды, интегрального расхода морской воды в направлении на север (течение Ирмингера) и интегрального расхода морской воды в направлении на юг (Восточно-Гренландское течение) с ледовитостью Гренландского моря.

Здесь и далее на графиках взаимокорреляционных функций (ВКФ) на положительной полуоси располагается корреляционная функция зависимости интегрального расхода от ледовитости ($Q = f(\text{ice})$), а на отрицательной полуоси – функция зависимости ледовитости от интегрального расхода ($\text{Ice} = f(Q)$).

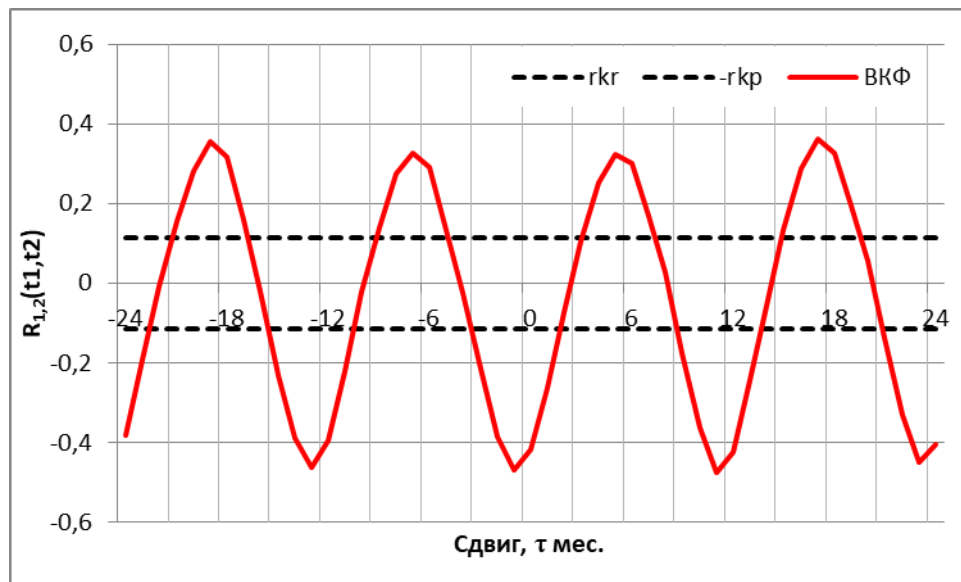


Рисунок 4.1.1. ВКФ между среднемесячными значениями общего интегрального расхода морской воды (Q_{int}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=288$) до сдвига $\tau_{max}=24$ мес.

Как и описывалось выше, характеристика общего интегрального расхода – это показатель преимущественного направления расхода морской воды в разрезе. На рисунке 4.1.1 показано, что взаимосвязь общего интегрального расхода морской воды и ледовитости асимметрична – процессы протекают с разностью фаз, составляющей 1 мес. Сильнее выражена обратная взаимосвязь процессов: $r \approx -0,42$ с годовым периодом; в физических терминах это означает, что при наибольшем значении характеристики общего интегрального расхода (то есть преобладающим является расход в направлении на север), наблюдается наименьшая ледовитость Гренландского моря. Действительно, при обильном затоке теплых и осолоненных вод, вносимых течением Ирмингера, происходит ускорение процессов таяния льда. Это же и объясняет разность фаз процессов: 1 мес. – это период адаптации ледовой системы.

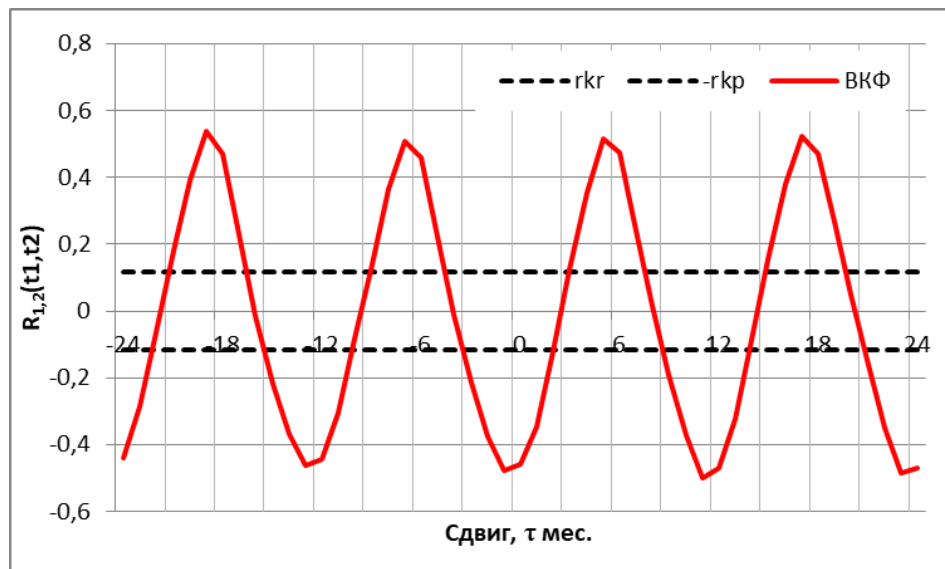


Рисунок 4.1.2. ВКФ между среднемесячными значениями интегрального расхода морской воды в направлении на юг (Q_{south}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=288$) до сдвига $\tau_{max}=24$ мес.

Анализ рисунка 4.1.2 позволяет сказать, что годовой период колебания процессов и разность фаз, составляющая 1 мес., в общем интегральном расходе морской воды представлен, прежде всего, составляющей интегрального расхода в направлении на юг (Восточно-Гренландское течение). Сильнее выражена прямая взаимосвязь интегрального расхода и ледовитости $r \approx 0,57$.

Рисунок 4.1.3 показывает же отсутствие значимой прямой связи между интегральным расходом в направлении на север и ледовитостью. Наблюдается полугодовой период колебаний процессов. Это подтверждает вывод о том, что усиление залива теплых осолоненных вод течением Ирмингера вызывает таяние льдов.

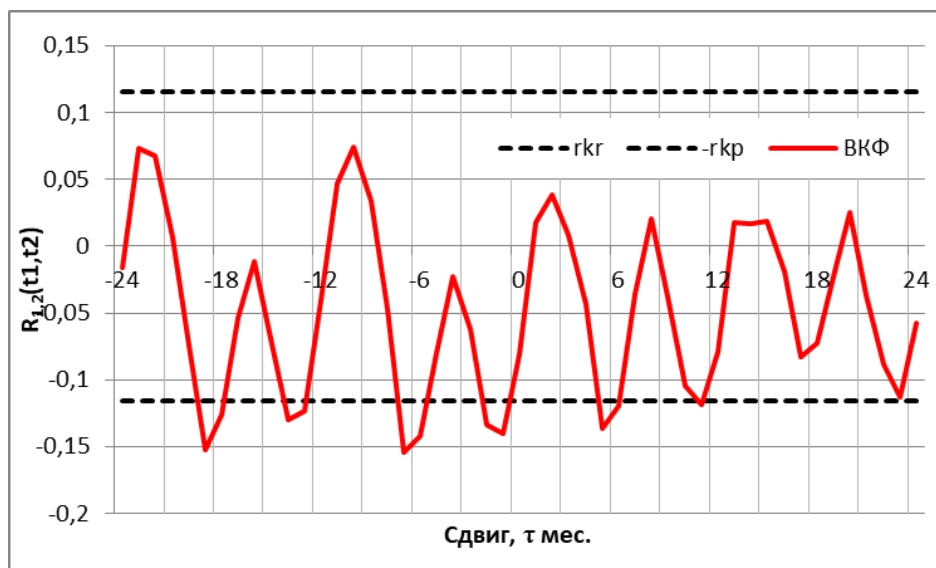


Рисунок 4.1.3. ВКФ между среднемесячными значениями интегрального расхода морской воды в направлении на север (Q_{north}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=288$) до сдвига $\tau_{max}=24$ мес.

4.2. Взаимосвязь среднегодовых значений характеристик

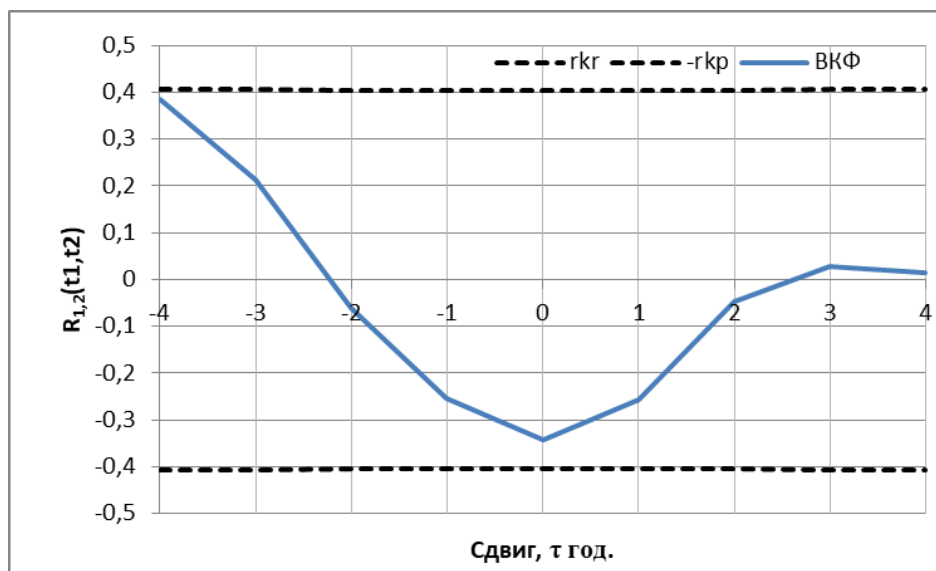


Рисунок 4.2.1. ВКФ между среднегодовыми значениями общего интегрального расхода морской воды (Q_{int}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=24$) до сдвига $\tau_{max}=4$ года

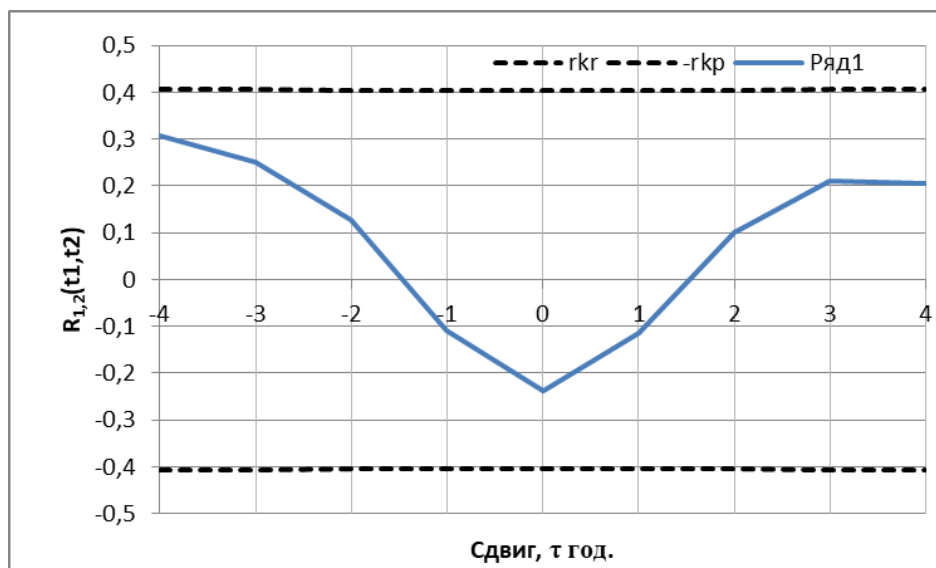


Рисунок 4.2.2. ВКФ между среднегодовыми значениями интегрального расхода морской воды в направлении на юг (Q_{south}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=24$) до сдвига $\tau_{\text{max}}=4$ года

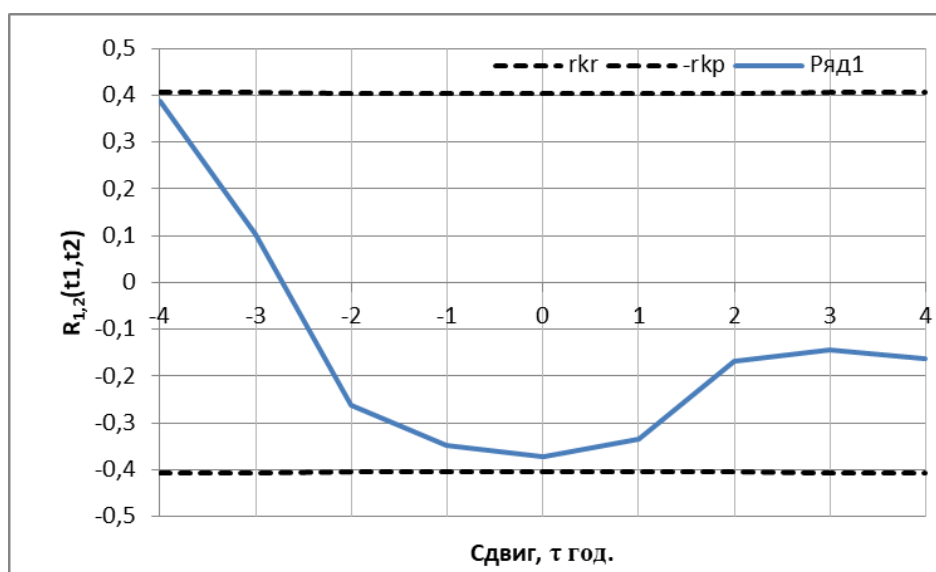


Рисунок 4.2.3. ВКФ между среднегодовыми значениями интегрального расхода морской воды в направлении на север (Q_{north}) на разрезе в Датском проливе и ледовитостью Гренландского моря за период с 01.1993 по 12.2016 гг. ($n=24$) до сдвига $\tau_{\text{max}}=4$ года

Для среднегодовых значений характеристик при помощи взаимокорреляционного анализа не удалось получить выводов, поскольку взаимокорреляционные коэффициенты ВКФ неизвестны.

Заключение

В ходе работы была исследована пространственно-временная изменчивость объемного расхода морской воды, протекающего через Датский пролив.

В результате исследования были сделаны следующие выводы:

– распределение расхода морских вод по направлениям в целом совпадает с направлением и расположением течений в Датском проливе, а именно: вдоль шельфа Гренландии существует движение морских вод с севера на юг, соответствующее Восточно-Гренландскому течению, а вдоль шельфа Исландии – с юга на север, соответствующее течению Ирмингера;

– за 24 анализируемых года наблюдается тренд на увеличение температуры и осолонение вод, вносимых в район исследуемого разреза течением Ирмингера;

– за этот же период наблюдается тренд на распреснение поверхностного слоя вод, влекомых Восточно-Гренландским течением, что связано с таянием льдов в Гренландском море и ледников Гренландии;

– наблюдается тренд на преобладание потоков в направлении на север, причем существует годовая периодичность и максимум усиления приходится на вторую половину июля;

– наблюдается обратная взаимосвязь между значениями расхода морской воды в направлении на север и ледовитостью Гренландского моря. А в виду тренда на преобладание потоков в направлении на север, имеет место вывод о сокращении площади моря, занятой льдом.

Список литературы

- [1] Солянкин Е.В. Некоторые особенности гидрологии Датского пролива. По материалам рейса э/с «Севастополь» летом 1958 // труды ВНИРО Том 046 – Сб. 1 – 1962 г. – С. 74 – 91.
- [2] Акулич Э.В. Исследование временной изменчивости площади льда в Гренландском море (автореферат курсовой работы) // 2019г.
- [3] Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник,- СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 408 с.
- [4] Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» - СПб.: РГГМУ, 2010. - 74 с.