



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Гольфстрим и климат Европы

Исполнитель Кириенко Кристина Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Малинин Валерий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

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

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«___» _____ 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1 Описание района исследования	4
1.1 Физико-географическое описание Гольфстрима.....	4
1.2 Характеристики системы течений Гольфстрим.....	6
1.3 Вывод по главе	9
Глава 2 Исходные данные и методы их статистического анализа.....	10
2.1 Исходные данные	10
2.2 Анализ тренда.....	10
2.3 Автокорреляционный анализ.....	11
2.4 Гармонический анализ.....	12
2.5 Вывод по главе.....	14
Глава 3 Изменчивость характеристик Северной Атлантики.....	15
3.1 Анализ среднемесячной и среднегодовой изменчивости Индекса Гольфстрима	15
3.1.1 Выделение и анализ тренда.....	15
3.1.2 Автокорреляционный анализ.....	16
3.1.3 Гармонический анализ.....	21
3.2 Анализ среднегодовой изменчивости расхода воды Флоридского течения. 24	
3.2.1 Выделение и анализ тренда.....	24
3.2.2 Автокорреляционный анализ.....	25
3.2.3 Гармонический анализ.....	25
3.4 Анализ среднегодовой изменчивости индекса Северо-Атлантического колебания	27
3.4.1 Выделение и анализ тренда.....	27
3.4.2 Автокорреляционный анализ.....	27
3.4.3 Гармонический анализ.....	28
3.4.4 Изменчивость теплоотдачи между океаном и атмосферой в Бермудской энергоактивной зоне океана (ЭАЗО).....	30
3.5 Вывод по главе	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	38

ВВЕДЕНИЕ

Течение Гольфстрим одно из самых мощных и теплых течений в Северной Атлантике, оказывающее значительное влияние на климат. Благодаря его теплым потокам в Европе наблюдается мягкий благоприятный климат. Во многих странах на изменение климата может повлиять то, что активность данного течения значительно снизиться в ближайшие десятилетия.

Актуальность данной работы состоит в том, что к процессам циркуляции в Северной Атлантике возрастает огромный интерес. Происходят обсуждения о том, что похолодание в Европе может произойти в ближайшее время, а глобальное потепление нарушает равновесие в Гольфстриме. Течение Гольфстрим приносит значительное количество тепла в Европу. Сильное климатическое воздействие оказывает его изменчивость. На протяжении многих десятилетий исследуется положение Гольфстрима. Это и представляет интерес для мониторинга и изучения причин его изменчивости.

Целью работы является исследование процессов, происходящих как в самом Гольфстриме, так и в Северной Атлантике. Данное исследование необходимо для определения того, каким образом данные процессы оказывают влияние климатические условия в Европе, и какое взаимодействие между собой оказывают атмосфера и океан.

Задачи данной работы заключаются следующие:

- дать физико-географическое описание о системе течений Гольфстрим и его характеристиках;
- описать методы статистического анализа;
- провести статистический анализ изменчивости индекса Гольфстрима и индекса Северо-Атлантического колебания;
- описать характеристики распределения расходов воды Флоридского течения;
- оценить влияние Гольфстрима на климат Европы.

Глава 1 Описание района исследования

1.1 Физико-географическое описание Гольфстрима

Гольфстрим располагается между мысом Хаттерас, Северная Каролина, США вдоль североамериканского побережья и береговой линией Ньюфаундленда до пересечения Атлантического океана. Флоридское течение – это быстрое течение, которое соединяется с Антильским течением. От полуострова Флорида отклоняется на юго-восток и направляется параллельно восточному побережью США до мыса Хаттерас. Северо-Экваториально течение, протекающее от Северной Африки до Вест-Индии, обогащает течение Гольфстрим. Северо-Экваториально течение разделяется на Карибское течение, протекающее в Карибское море и Мексиканский залив, вдоль побережья Южной Америки, и Антильское течение, которое простирается к северу и востоку от Вест-Индии. Путь Гольфстрима искажается при перемещении огромных круговоротов теплой воды. Противоток, который образует его часть, сначала протекает на юг, а после на запад. Вдоль побережья Флориды и Южной и Северной Каролины противоток воссоединяется с Гольфстримом. Большая часть Гольфстрима продолжает протекать на север, где всё больше поворачивает на восток и проходит недалеко от Большой Ньюфаундленской банки. Далее он разделяется на закрученные течения, называемые вихрями. Многие из них распространяются до Британских островов и Норвежского моря, формируя Северо-Атлантическое течение. На юг и восток текут другие течения, становясь частью протекающих на запад противотоков или присоединяясь к Канарскому течению. Под влиянием Гольфстрима от Флориды до Ньюфаундленда находятся западный берег Европы и восточное побережье Северной Америки [1].

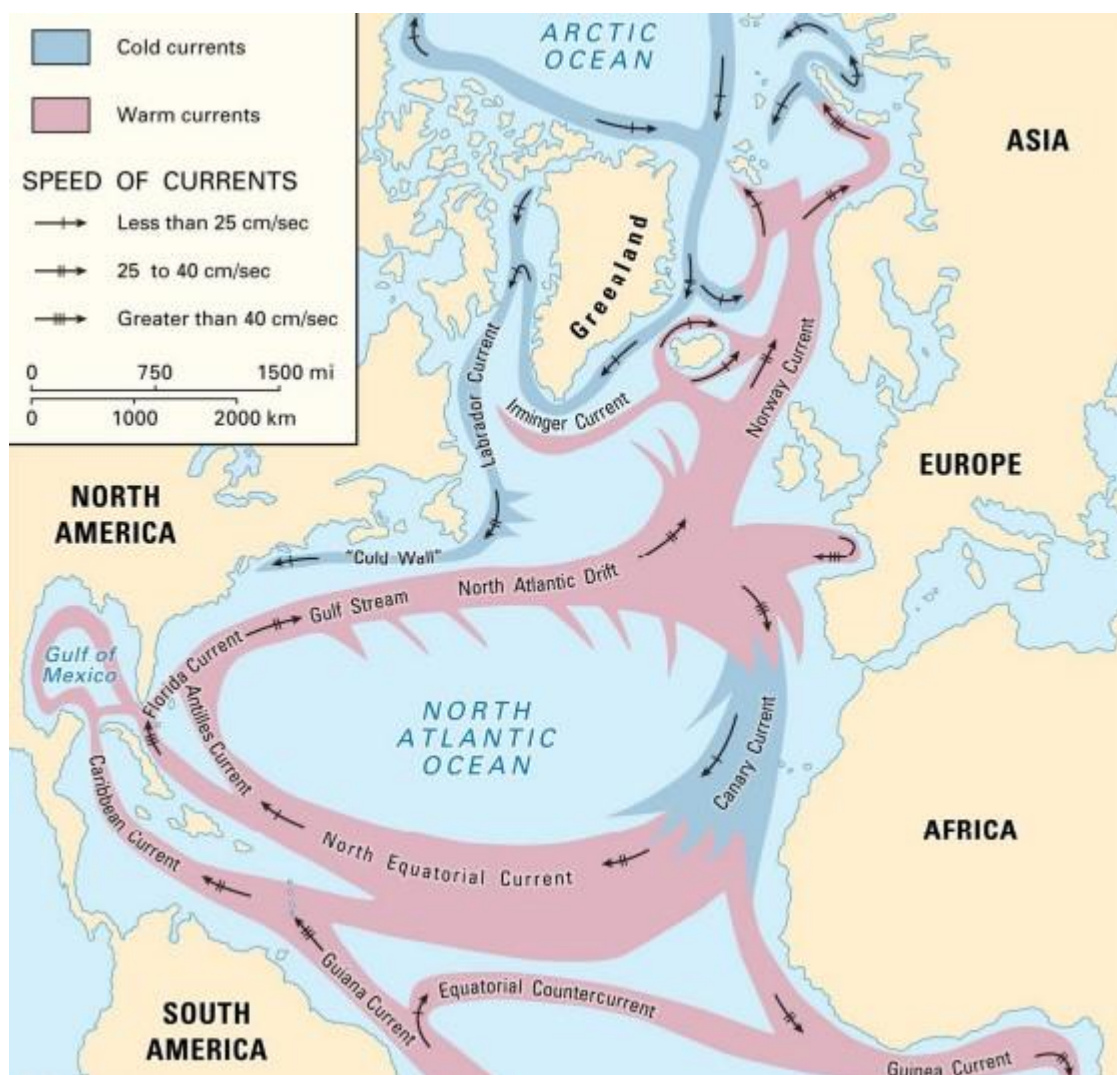


Рисунок 1.1 – Схема поверхностных течений Северной Атлантики

Система течений имеет западную и северную часть в Атлантическом океане. Общая длина более 10 тыс. км., направленная от Флоридских берегов к Северному полярному бассейну. Система включает в себя такие течения, как Флоридское, Гольфстрим, Северо-Атлантическое и Норвежское. Воды с более высокой температурой, резкий гидрологический фронт, максимальные скорости течений – это одни из основных отличий, объединяющих в одну систему данные течения [6].

1.2 Характеристики системы течений Гольфстрим

Океанические течения – комплекс непрерывного перемещения воды, изменяющийся во времени и пространстве. Гольфстрим, как и любые другие течения, имеет свою особенную динамику.

В прошлом из-за отсутствия спутниковых технологий измерить скорости воды в районе исследования было проблематично. В 1970-х годах прошлого столетия появились дрейфтеры, измеряющие многие характеристики, могли по спутниковой связи передавать информацию в Центр сбора данных. Благодаря дрейфтерам было собрано большое количество данных, которые ученые смогли обработать и получить представление о распределении скорости течений в Гольфстриме и во всей северной Атлантике [4].

По данным с буюв стало понятно, что он равномерно протекает до мыса Хаттерас, а далее картина меняется. Наталкиваясь на холодные и пресные склоновые воды и Лабрадорским течением, воды которого ещё более холодные образует вихри. В течение многих суток дрейфтер следует в определенном направлении, а далее меняет направление и меандрирует с водными массами, количество меандров увеличивалось в районе Гольфстрима. Максимальная скорость после выхода из Флоридского течения составляла 2,4 м/с, а минимальная – 0,4 м/с, средняя скорость варьировалась от 0,8 – 1 м/с. [4].

Вихревые движения оказывают немалый интерес. Они образуются в результате столкновения двух различных по свойствам водных масс, поэтому являются фронтальными. Резкий гидрологический фронт образуется из-за столкновения теплых вод самого Гольфстрима и очень холодных течений Склоновых вод и Лабрадорского. В связи с этим возникают вихри, достигающие 100 – 200 км в диаметре и 3 – 4 км в глубину. Такие вихри существуют на протяжении нескольких лет. Во фронтальных вихрях температура составляет от 10°C до 14°C, а соленость - 1‰ [4].

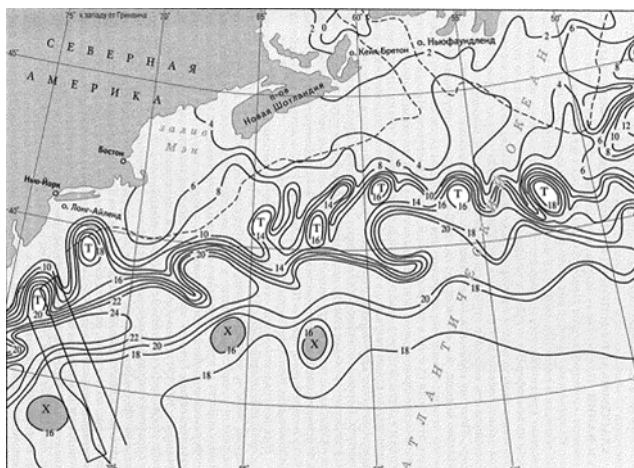


Рисунок 1.2 – Гольфстрим и его вихри. Холодные – циклонические, теплые – антициклонические [5].

В Гольфстриме основной поток теплой воды с температурой от 20°C до 26°C, поведение вихрей по разные стороны от потока неодинаковое. На глубинах 200 – 500 м отмечаются основные температурные изменения. На севере их вращение происходит по часовой стрелке, диаметр может варьироваться от 100 до 350 км, образуя антициклоны. На юге зарождаются циклонические вихри с диаметром 100 – 250 км. За год в южной части от стержня Гольфстрима возникает и действует 6-7 циклонов. Циклонические вихри в течение 6-12 месяцев двигаются на юго-запад параллельно основному потоку Гольфстрима, а после заново соединяются с основным потоком и насыщают его своей энергией. А в районе Большой Ньюфаундлендской банки возрастают 8-10 антициклонов и 3-4 из них могут действовать одновременно. Средняя продолжительность существования антициклонических вихрей 3-4 месяца, от основной струи далеко не отходят [3].

В летний и зимний периоды в Атлантике средние значения температуры воды от 10 °C до 25°C. В феврале температура воды в не превышает 25°C в Мексиканском заливе, а в Гольфстриме отклонение температур происходит в северной части. С помощью Канарского течения температура воды в восточной части Атлантики составляет не менее 20 °C. вдоль полуострова Лабрадор температура ниже 0°C, а на той же широте у острова Великобритании температура 10,5°C [3].

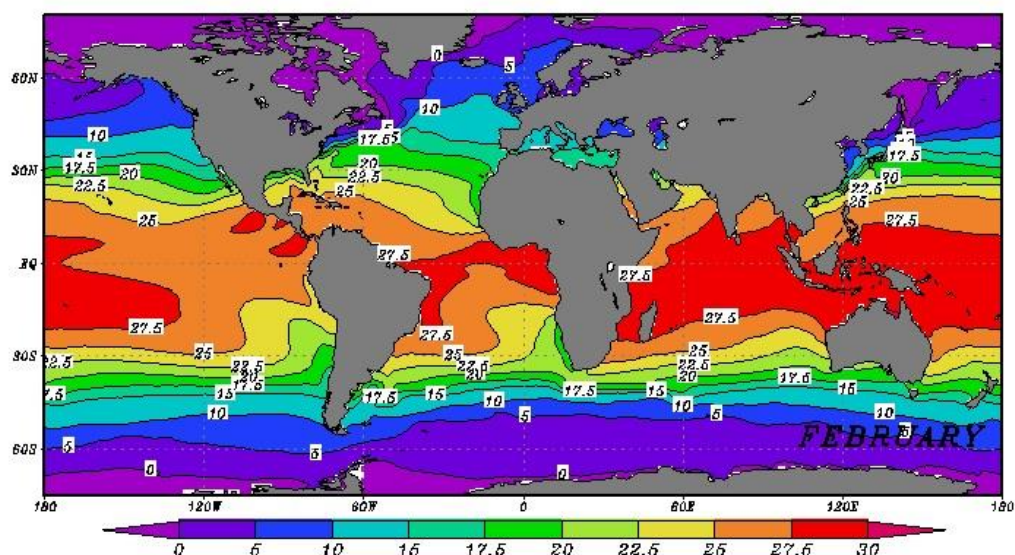


Рисунок 1.3 – Среднемесячная температура поверхностных вод Мирового океана (февраль),
<https://meteoinfo.ru/sstclimate>

В августе весь Мексиканский залив прогревается, и температура составляет свыше $27,5^{\circ}\text{C}$. Теплые воды проникают далеко на север в районы Северного-Ледовитого океана. Температурные отклонения выражены более интенсивно, исходя из этого образуются туманы [3].

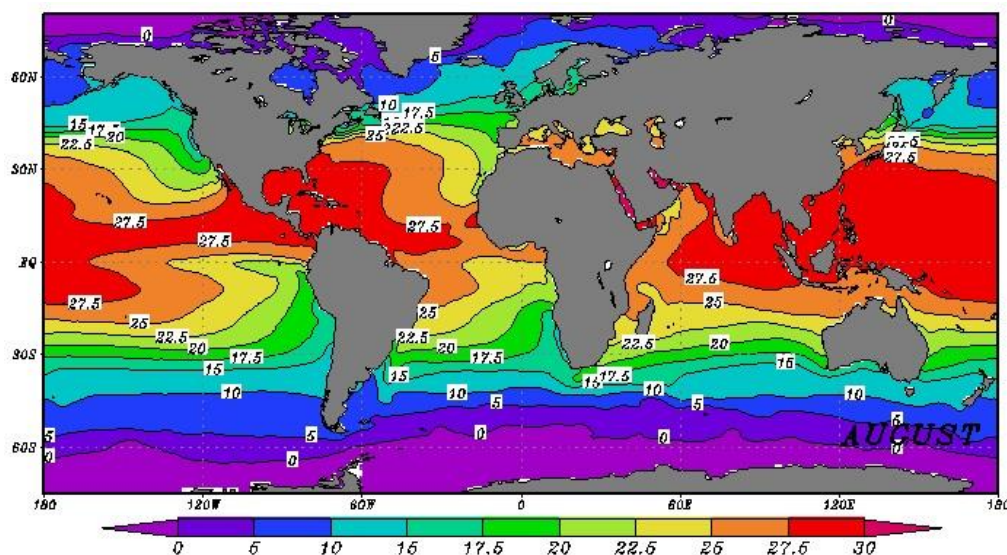


Рисунок 1.4 – Среднемесячная температура поверхностных вод Мирового океана (август),
<https://meteoinfo.ru/sstclimate>

1.3 Вывод по главе

Система течений Гольфстрим простирается от Мексиканского залива до Баренцева моря. Мощный поток воды распространяет свои теплые воды практически до Карского моря.

В Гольфстриме наблюдаются скорости течений от 0,1 м/с до 2,4 м/с. Температура воды в летний период достигает отметки в 27,5°C, а в зимний период колеблется от 10°C до 22°C. Также в Гольфстриме образуются разного рода вихри, существующие на протяжении двух лет.

Глава 2 Исходные данные и методы их статистического анализа

2.1 Исходные данные

Текущие ряды среднемесячных значений интенсивности течения Гольфстрим рассчитываются представлены на сайте Plymouth Marine Laboratory [12]. Среднегодовые значения были получены путем осреднения значений за 12 месяцев.

Текущие ряды суточных значений расходов воды Флоридского течения представлены на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA [13]. Суточные значения были усреднены и представлены в ряды среднемесячных значений, а среднегодовые значения получены при осреднении 12 месяцев каждого года.

Текущие ряды среднемесячных значений представлены на сайте National Center of Atmospheric Research [14]. Среднегодовые значения получены путем осреднения 12 месяцев каждого года.

Данные по скрытому и явному теплу взяты из библиотеки климатических данных Columbia за период с января 1980 по декабрь 2020 года по координатам 34-50° с. ш. и 51-68° з. д. [17].

Все полученные данные были преобразованы в статистические ряды и рассчитаны при помощи программ Excel, Past 4 и Surfer 17.

2.2 Анализ тренда

Тренд выражает наличие длиннопериодного колебания в изменчивости ряда с периодом, превышающим длину выборки, а также изменяет свою форму, интенсивность, исчезать или появляться, [7].

Линейное уравнение тренда описывается формулой:

$$T(t) = a_0 + a_1 t; \quad (1)$$

Нелинейное представление тренда:

$$T(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2; \quad (2)$$

Для того, чтобы оценить значимость тренда формулируется нулевая гипотеза:

$$H_0 : |a_1| = 0, H_0 : |r| = 0; \quad (3)$$

Критерий Стьюдента рассчитывается по формуле:

$$t^* = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}; \quad (4)$$

Неравенство для оценки значимости трендов:

$$t^* > t_{кр}(\alpha, \nu); \quad (5)$$

2.3 Автокорреляционный анализ

В автокорреляционном анализе выделяются скрытые периодичности, а также можно выполнить долгосрочный прогноз.

Автокорреляционная функция – это корреляция статистического ряда самого с собой при разных сдвигах во времени. Временной ряд один и тот же, поэтому при расчетах его можно сдвигать вперед и назад, что будет означать, что функция является симметричной. [8].

Автокорреляционная функция рассчитывается по формуле:

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{(N-\tau)\sigma^2}, \quad (7)$$

Нулевая гипотеза для оценки автокорреляционной функции:

$$H_0: |r(\tau)| = 0, \text{ при } \tau \neq 0 \quad (8)$$

$$|r(\tau)|\sigma_{r(\tau)} > t_{кр} \quad (9)$$

При выполнении условия в формуле (9), коэффициент автокорреляции значим. В исходном ряду циклические колебания не учитываются, что является недостатком для критерия.

После расчета АКФ происходит анализ результатов по нескольким характеристикам:

1. Инерционность процесса;
2. Периодичность процесса;
3. Тип процесса;
4. Возможность автопрогноза [8].

2.4 Гармонический анализ

Понятие спектра используется в гидрометеорологии для установления скрытых периодичностей во внутренней структуре исходного ряда, а также при прогнозе квазистационарных процессов его частотной структуры.

Формула для расчета гармоники:

$$G_k = A_k \cos (\omega_k * t - \varphi_k), \quad \omega_k = 2\pi/T_k \quad (10)$$

В соответствии с коэффициентами Фурье – a_k и b_k формируются характеристики гармоник:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin (\omega_k * t_i)] \quad (11)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos (\omega_k * t_i)] \quad (12)$$

Формулы для определения характеристик гармоник:

- Вклад гармоники в дисперсию ряда

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}, \quad (13)$$

- Дисперсия гармоники

$$D_k = \frac{A_k^2}{2}, \quad (14)$$

- Амплитуда гармоники

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (15)$$

- Фаза гармоники

$$\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi, \quad (16)$$

После расчетов всех составляющих характеристик оценивается значимость гармоник и сравнивается исходный ряд с рассчитанным [8].

2.5 Вывод по главе

В гидрометеорологии множество процессов могут быть описаны при помощи статистических методов. Благодаря этим методам происходит выявление более подробной картины по разнообразным изучаемым темам. Это является основой для дальнейшего анализа изменчивости течения Гольфстрим.

Глава 3 Изменчивость характеристик Северной Атлантики

3.1 Анализ среднемесячной и среднегодовой изменчивости Индекса Гольфстрима

3.1.1 Выделение и анализ тренда

Для среднемесячных и среднегодовых значений интенсивности индекса GSNW выделены линейный и нелинейный тренды, а также рассчитаны критерий Стьюдента и выборочный критерий Стьюдента по формуле (4).

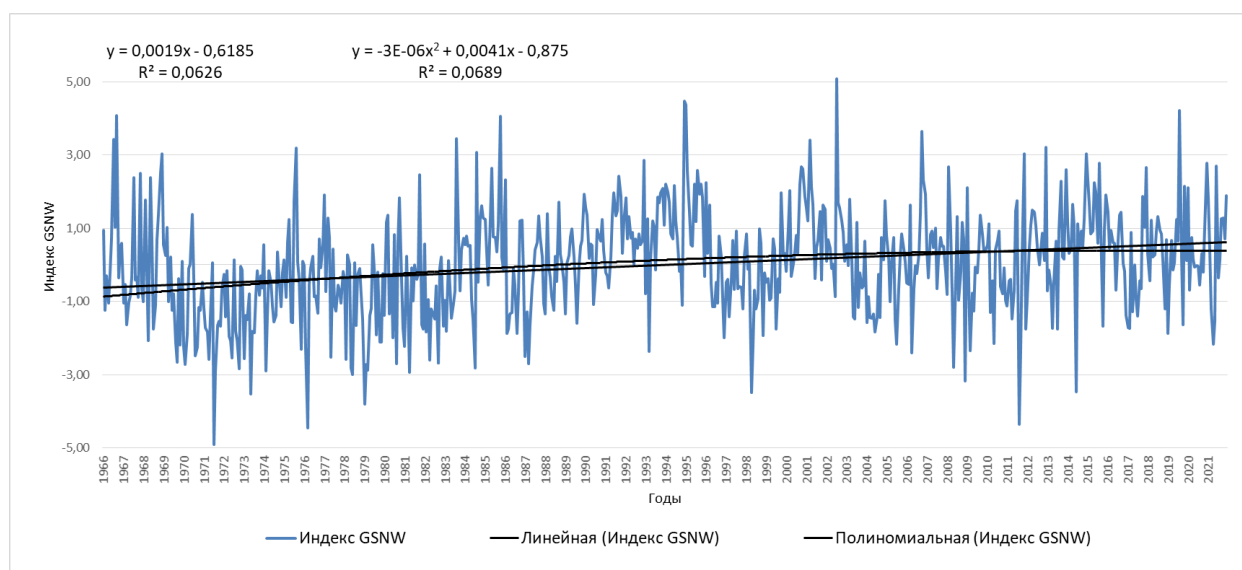


Рисунок 3.1 – Среднемесячная изменчивость индекса GSNW за период 1966–2021 гг.

Была проведена проверка значимости по неравенству (5). Для линейного тренда $t^* - 6,59$, а для нелинейного – $17,97$, $t_{кр} - 1,97$. Оба тренда положительны и отличны от нуля, соответственно, индекс Гольфстрима увеличивается. Исходя из того, что вклад нелинейного тренда (6,9 %) в дисперсию исходного ряда немного больше, чем линейного (6,3 %), то это подразумевает нелинейное распределение изменчивости течения.

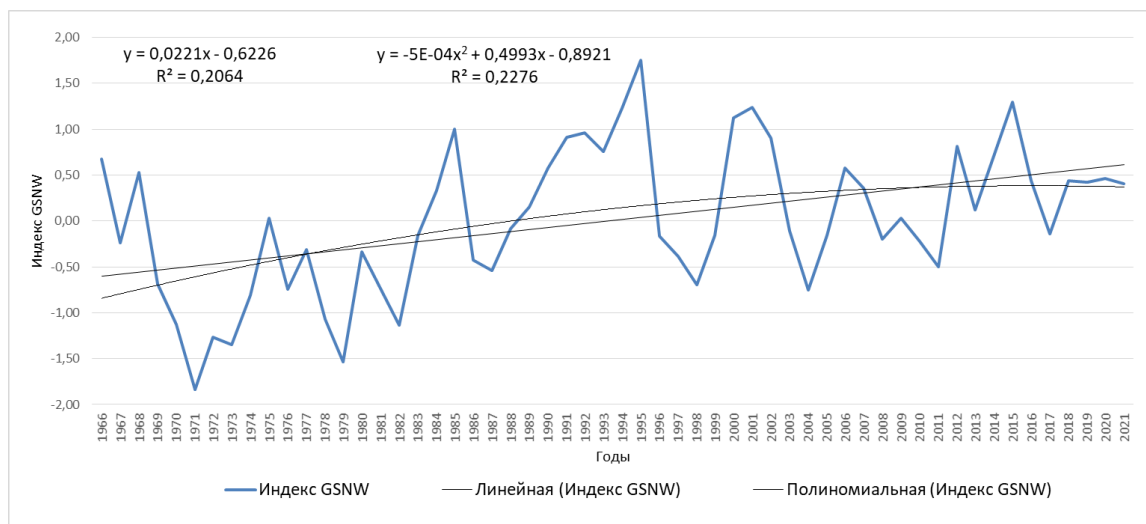


Рисунок 3.2 – Среднегодовая изменчивость индекса GSNW за период 1966–2021 гг.

При проверке на значимость трендов: в рядах среднегодовых значений неравенство (5) выполняется как для линейного – $4,16 > 2,005$, так и для нелинейного – $4,57 > 2,005$. Это показывает, что тренды значимы. Характер трендов является положительным. Т. к. вклад нелинейного тренда больше (23 %) в дисперсию исходного ряда, чем линейного (21 %), поэтому он используется в дальнейших расчетах.

3.1.2 Автокорреляционный анализ

Для среднемесячных значений АКФ рассчитывалась на 66 сдвигах

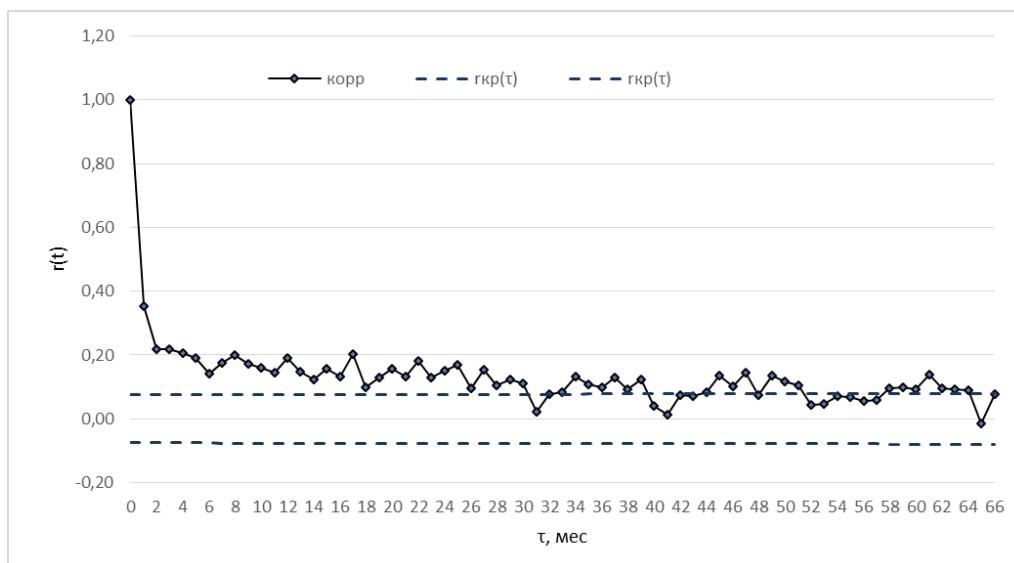


Рисунок 3.3 – АКФ для среднемесячных значений изменчивости индекса GSNW

Инерционность процесса определим по радиусу корреляции, который равен 65 месяцам. На рисунке видно, что присутствует 17 локальных максимумов (3, 8, 12, 15, 17, 20, 22, 25, 27 и т. д. месяцев).

Процесс является смешанным, т. к. на графике АКФ наблюдается циклические колебания с периодом 2-4 месяца, на сдвиге 1 месяц значимый коэффициент, высокая инерционность, радиус корреляции 65 месяцев – «красный шум».

Можно наблюдать несколько значимых коэффициентов автокорреляции, поэтому возможно сделать автопрогноз с разной заблаговременностью. При данных значениях, можно дать прогноз с заблаговременностью 3-12, 15-29 и т. д. месяцев.

Модель AP1 для среднемесячных значений для сдвига 1 месяц:

$$GSNW_{i+1} = 0,35 * GSNW_i - 0,05$$

Параметры и коэффициенты регрессии представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.1 Регрессионная статистика среднемесячных значений

Регрессионная статистика					
Множественный R				0,35	
R-квадрат				0,12	
Нормированный R-квадрат				0,12	
Стандартная ошибка				1,32	
Наблюдения				671	

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	166,39	166,39	95,46	3,62E-21
Остаток	669	1166,08	1,74		
Итого	670	1332,47			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
a0	-0,05	0,05	-1,06
a1	0,35	0,04	9,77

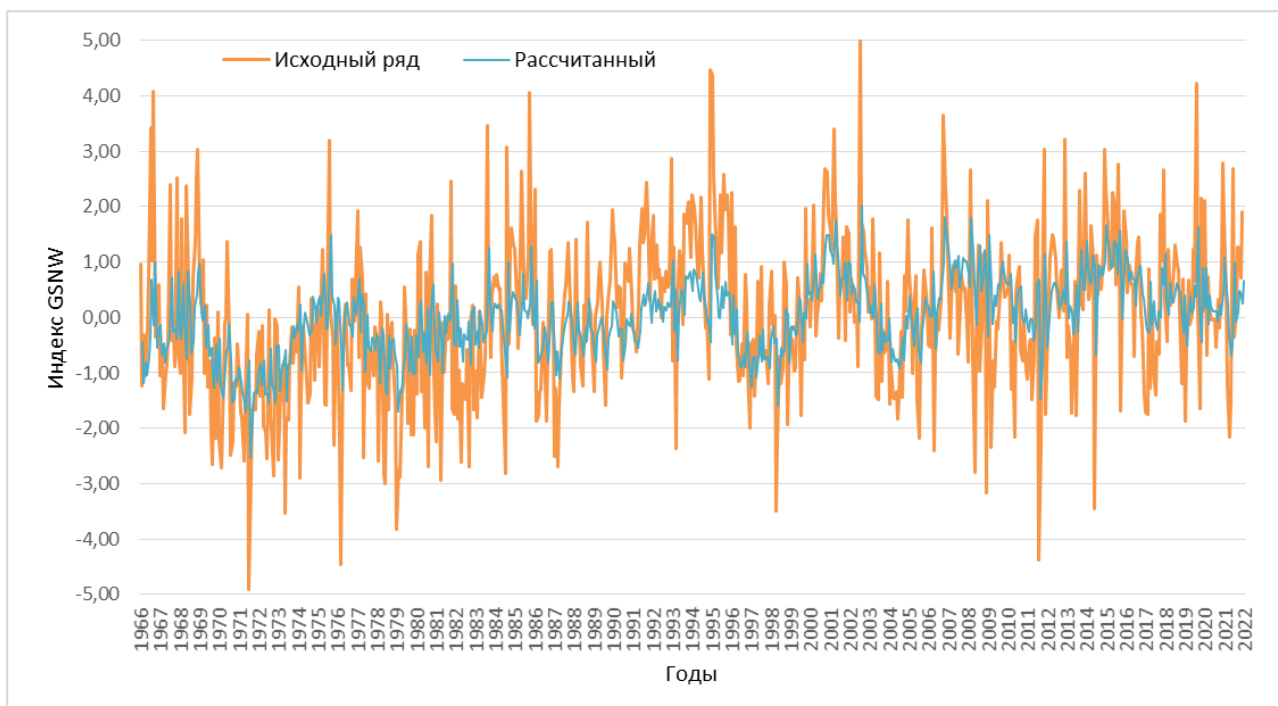


Рисунок 3.4 – График фактических и рассчитанных значений по уравнению AP1 с заблаговременностью 1 месяц

Таблица 3.2 Оценка дисперсии для среднемесячных значений

	Исходный ряд	Тренд	Циклические колебания	АКФ	Шум	
дисперсия	2,07	0,14	0,23	0,25	1,60	°C ²
	100%	7%	11%	12%	77%	

Вклад тренда в дисперсию равен 7 %. На АКФ приходится 12 % и на циклические колебания – 11 %. Наибольший вклад в дисперсию временного ряда вносит шум – 77 %. Следовательно, дисперсия исходного ряда в большей степени зависит от шума.

Для среднемесячных коэффициент регрессии больше $t_{кр}$ и является значимым. Модель является адекватной по критерию Фишера ($F^*=95,46$ при $F_{кр}=3,86$), стандартная ошибка ($1,32^{\circ}\text{C}$) меньше, чем стандартное отклонение ($1,41^{\circ}\text{C}$).

На рисунке 3.4 видно, что рассчитанный ряд плохо отражает исходный ряд GSNW. Имеются большие отклонения, которые появляются из-за присутствия

шума в исходном ряде. По данным автопрогноза значение индекса GSNW в январе 2022 года составит 0,67.

АКФ в ряде среднегодовых значений рассчитывалась на 11 сдвигах.

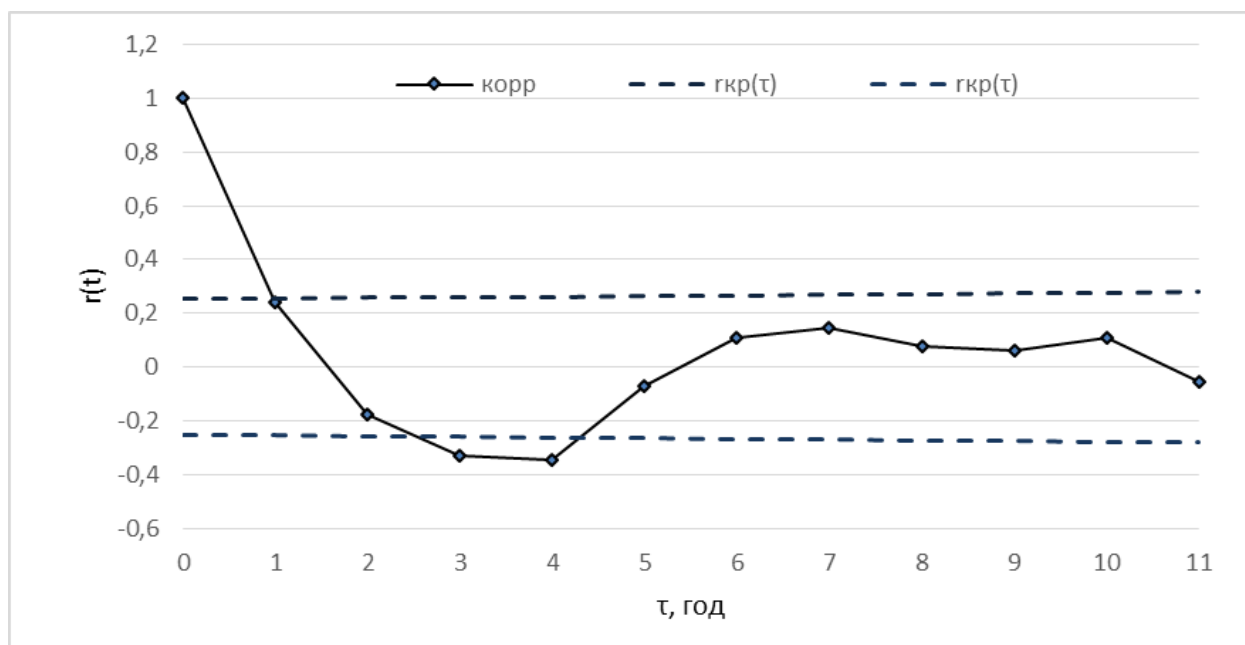


Рисунок 3.5 – АКФ для среднегодовых значений изменчивости индекса GSNW

Для среднегодовых значений индекса GSNW процесс является малоинерционным, так как $\tau^2_{\text{кор}} = 2$. На рисунке 3.5 наблюдается процесс простой цепи Маркова 1-го порядка с радиусом корреляции 2 года.

Возможно сделать автопрогноз с заблаговременностью 3 года, так как на сдвиге τ коэффициент автокорреляции значим. Для выполнения автопрогноза нужно использовать уравнение 1 порядка (AP1).

Таблица 3.4 Регрессионная статистика среднегодовых значений

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,24
R-квадрат	0,06
Нормированный R-квадрат	0,04
Стандартная ошибка	0,53
Наблюдения	55

Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	0,93	0,93	3,28	0,08
Остаток	53	15,11	0,29		
Итого	54	16,04			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
a0	0,002	0,072	0,026
a1	0,243	0,134	1,811

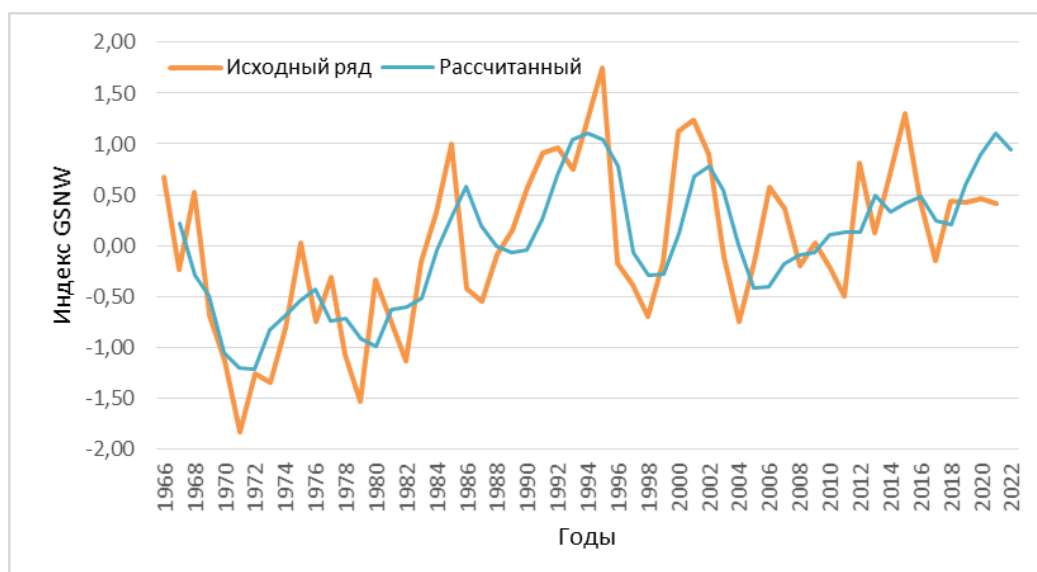


Рисунок 3.6 – График фактических и рассчитанных значений по уравнению AP1 с заглавременноностью 1 год

Таблица 3.5 Оценка дисперсии для среднегодовых значений

	Исходный ряд	Тренд	Циклические колебания	АКФ	Шум	
дисперсия	0,63	0,14	0,21	0,018	0,40	°C ²
	100%	22%	33%	3%	64%	

Вклад тренда в дисперсию равен 22%, т. к. тренд в среднегодовых значениях нелинейный. Наибольший вклад в дисперсию временного ряда вносит шум – 64%. На циклические колебания 33% и на АКФ приходится 3%.

Модель не является адекватной, т. к. $F^* (3,28)$ меньше, чем $F_{кр} (4,02)$. По коэффициенту детерминации моделью описывается только 6 % дисперсии исходного ряда.

На рисунке 3.6 можно увидеть, что рассчитанный ряд плохо описывает модель. Наибольшую часть в исходном ряде присутствует шум (64%). По данным автопрогноза значение индекса GSNW в 2022 году составит 0,95.

3.1.3 Гармонический анализ

Из исходного ряда среднемесячных значений удалили нелинейный тренд.

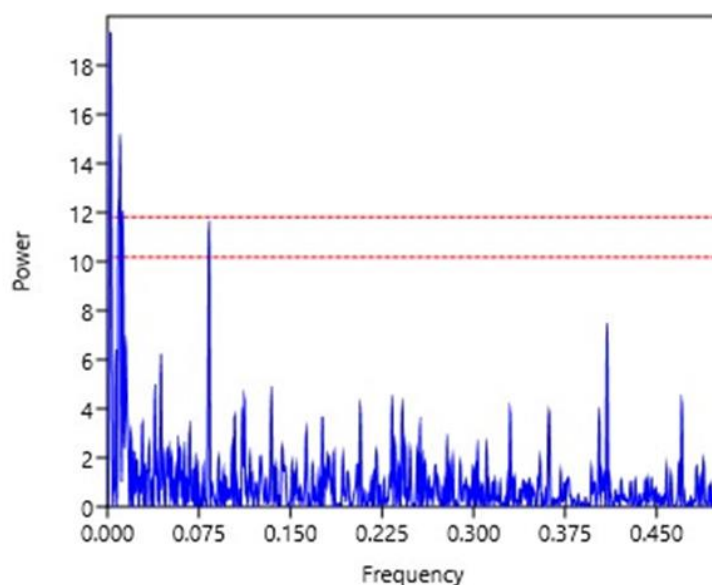


Рисунок 3.7 – Периодограмма для ряда среднемесячных отклонений от тренда

Таблица 3.6 Рассчитанные характеристики гармоник для среднемесячных значений

параметры	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
частота, 1/мес	0,0024218	0,010246	0,012668
период, мес	413	98	79
A_k	0,39	0,42	0,38
φ_k	1,96	1,61	2,28
D_k	0,08	0,09	0,073
V_k	0,040	0,045	0,038

t^*	5,42	5,76	5,24
$t_{кр}$	1,96	1,96	1,96

Проверка значимости гармоник показала, что для всех гармоник $t^* > t_{кр}$. Это означает, что все гармоники оказались значимыми, а наличие циклических колебаний подтверждение этому.

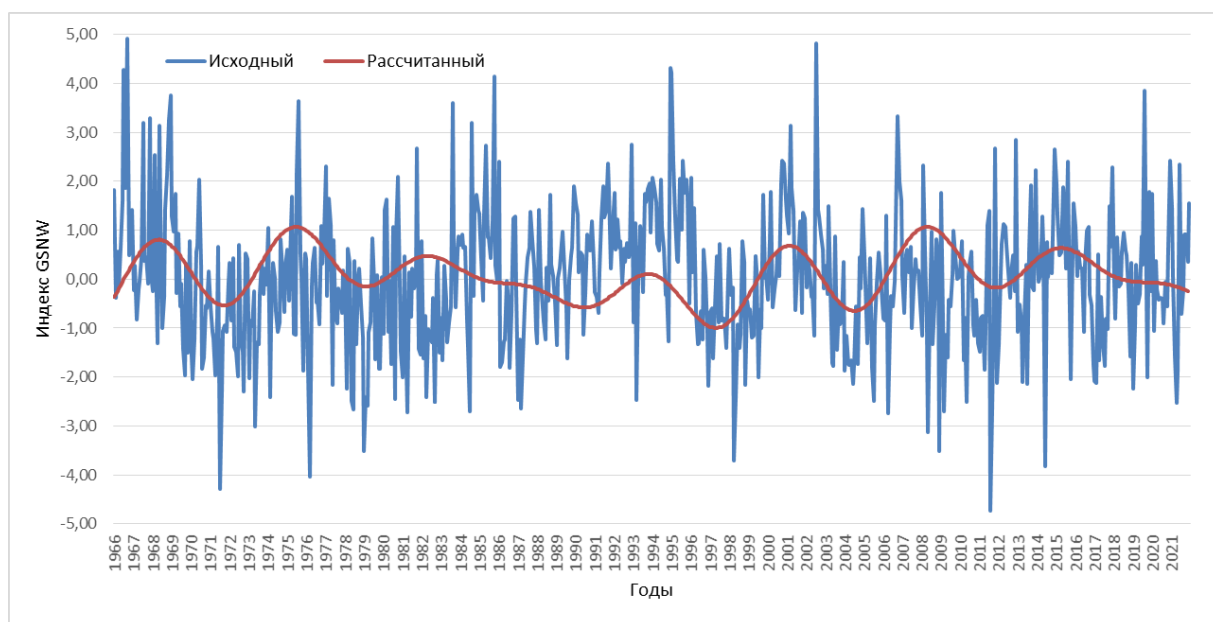


Рисунок 3.8 – Совмещенный график исходных и рассчитанных среднемесячных значений

Общий вклад гармоник составляет 12,3%. По рисунку 3.8 видно, что рассчитанные значения очень плохо описывают ход исходных значений.

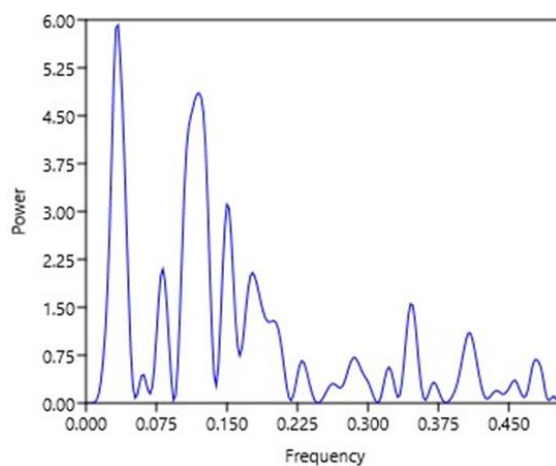


Рисунок 3.9 – Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений от тренда

Таблица 3.7 Рассчитанные характеристики гармоник для среднегодовых значений

параметры	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
частота, 1/мес	0,034091	0,12273	0,15227
период, мес	30	9	7
A_k	0,44	0,40	0,20
φ_k	5,77	1,37	1,29
D_k	0,10	0,08	0,02
V_k	0,200	0,164	0,041
t^*	30,19	26,19	11,44
$t_{кр}$	2,005	2,005	2,005

Для среднегодовых значений проверка на значимость проводилась аналогичным образом и все гармоники оказались значимыми. Значительный вклад в дисперсию исходного ряда вносят периоды гармонических колебаний 30, 9 и 7 лет. Общий вклад гармоник (40,5 %) в дисперсию исходного ряда небольшой.

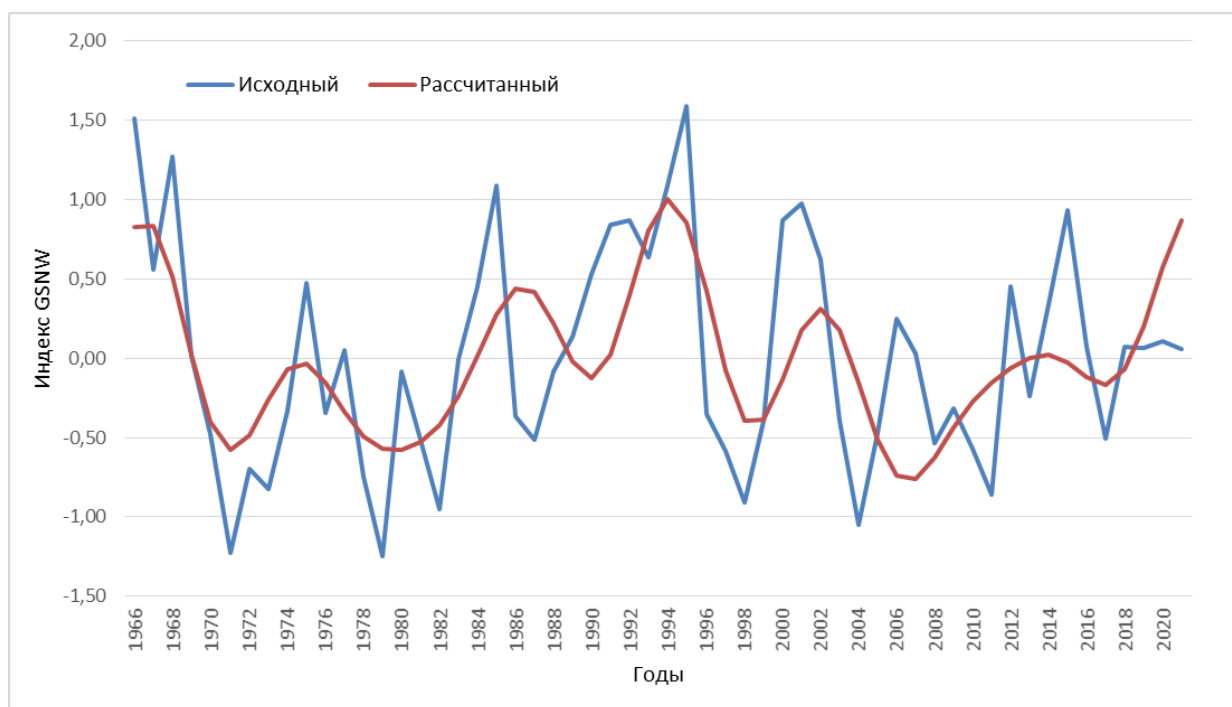


Рисунок 3.10 – Совмещенный график исходных и рассчитанных среднегодовых значений.

По рисунку 3.10 можно увидеть, что рассчитанные значения не очень хорошо описывают ход исходных значений. Поэтому можно сделать вывод о том, что высока неустойчивость данных из-за сильной извилистости Гольфстрима.

3.2 Анализ среднегодовой изменчивости расхода воды Флоридского течения

3.2.1 Выделение и анализ тренда

Неравенство $t^* > t_{кр}$ выполняется только для нелинейного тренда, т. к. для нелинейного t^* (2,94), а для линейного тренда (1,79), $t_{кр}$ трендов – 2,02. Вклад нелинейного тренда (16 %) в дисперсию исходного ряд больше, чем линейного (7 %).

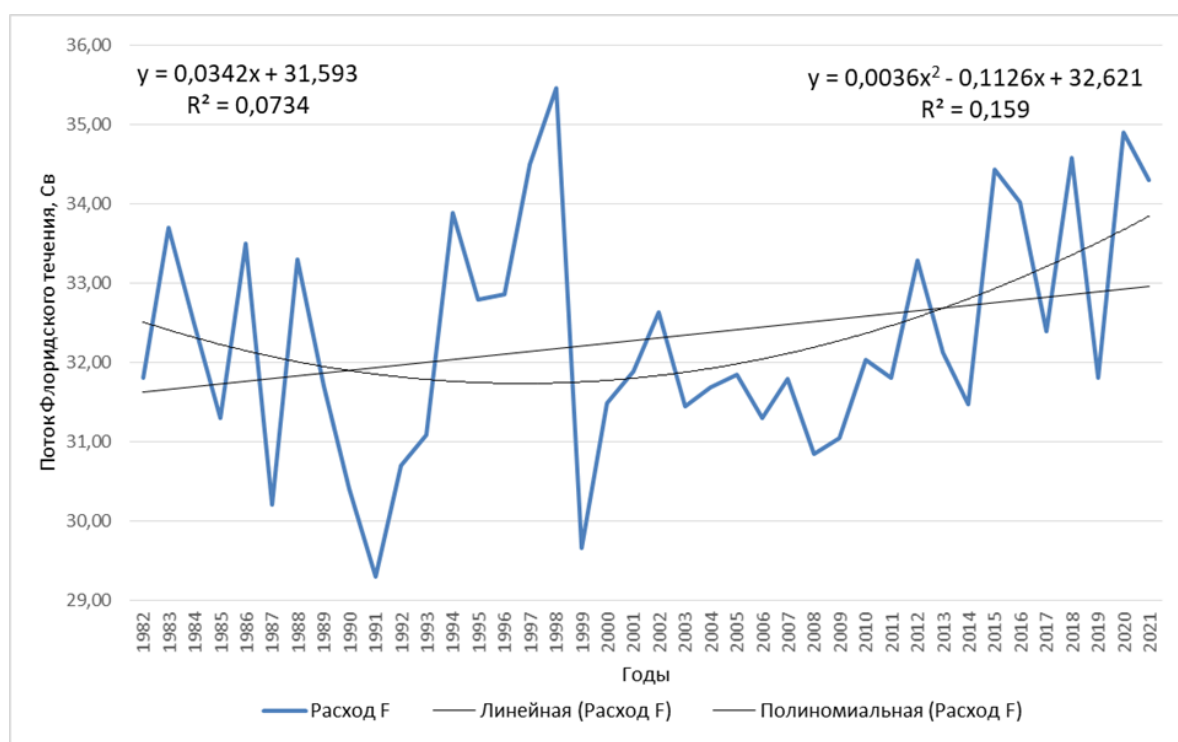


Рисунок 3.11 – Среднегодовая изменчивость расхода воды Флоридского течения за период 1982–2021 гг.

3.2.2 Автокорреляционный анализ

АКФ для ряда среднегодовых рассчитывалась на 9 сдвигах.

На рисунке 3.12 для среднегодовых значений расхода воды Флоридского течения процесс является малоинерционным, так как $\tau^2_{кор} = 1$, периодичность отсутствует, процесс является случайным и АКФ представляет собой «белый шум», возможность автопрогноза отсутствует.

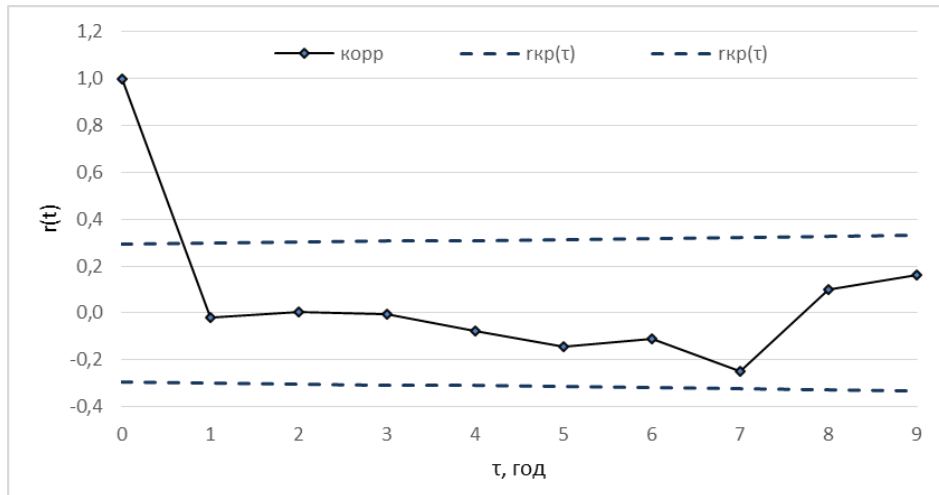


Рисунок 3.12 – АКФ для среднегодовых значений расхода воды Флоридского течения

3.2.3 Гармонический анализ

В рядах среднегодовых значений удаляется нелинейный тренд, т. к. он является значимым и его вклад в дисперсию исходного ряда больше. Была построена периодограмма для среднегодовых значений и на частотах, которые соответствуют пикам периодограммы, рассчитаны гармоники.

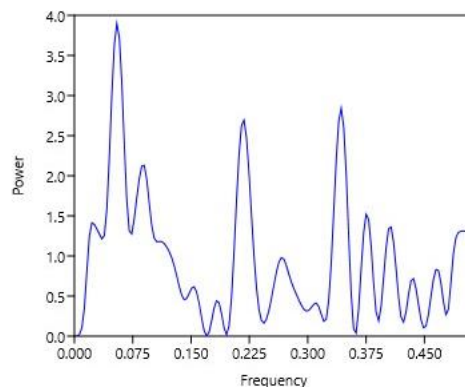


Рисунок 3.14 – Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений от тренда

Таблица 3.8 Рассчитанные характеристики гармоник для среднегодовых значений

параметры	Гармоника 1	Гармоника 2	Гармоника 3
частота, 1/год	0,054487	0,21795	0,34295
период, год	19	5	3
A_k	0,75	0,21	0,54
φ_k	4,99	7,71	2,11
D_k	0,28	0,02	0,14
V_k	0,15	0,01	0,08
t^*	17,57	4,24	11,52
$t_{кр}$	2,02	2,02	2,02

При проверке среднегодовых значений неравенство $t^* > t_{кр}$ выполняется для всех гармоник, поэтому они все являются значимыми. Периоды гармонических колебаний в 19, 5 и 3 года вносят наибольший вклад в дисперсию исходного ряда. Общий вклад 3-х гармоник составляет – 24 %.



Рисунок 3.15 – Совмещенный график исходных и рассчитанных среднегодовых значений

По рисунку 3.15 видно, что рассчитанные значения плохо описывают ход исходных значений. Следовательно, сложная пространственная структура течения подтверждает отсутствие периодичности в распределении расхода.

3.4 Анализ среднегодовой изменчивости индекса Северо-Атлантического колебания

3.4.1 Выделение и анализ тренда

В рядах среднегодовых значений неравенство $t^* > t_{кр}$ не выполняется для обоих трендов. Т. к. для линейного тренда t^* (1,09), а для нелинейного (1,78), $t_{кр}$ трендов (2,06). Коэффициенты регрессии и коэффициенты корреляции незначимы, соответственно, тренда нет.

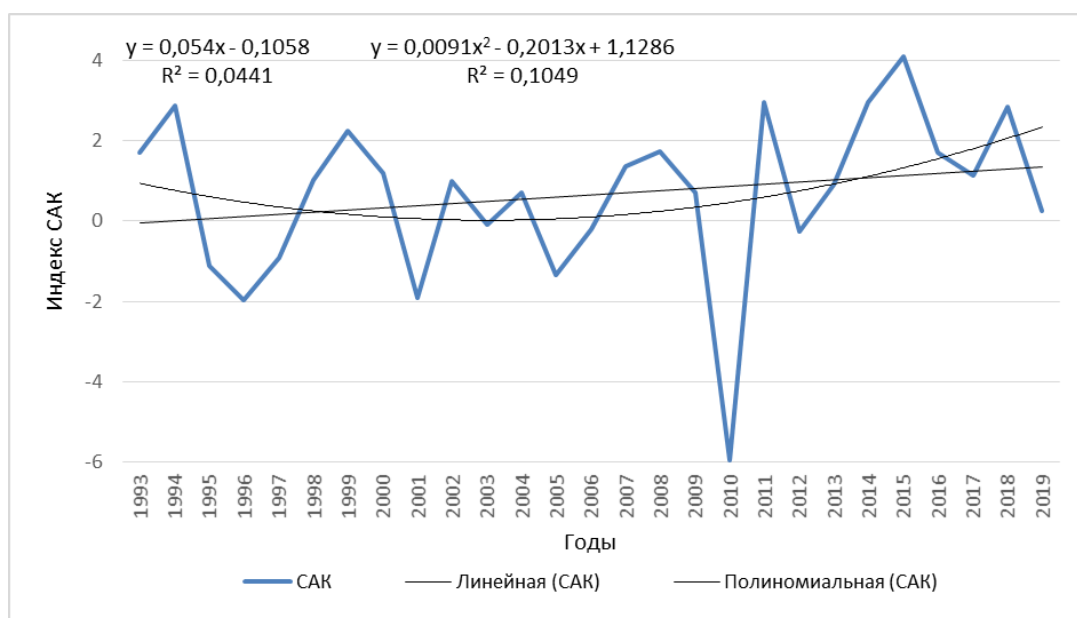


Рисунок 3.16 – Среднегодовые значения интенсивности индекса САК за период 1993–2019 гг.

3.4.2 Автокорреляционный анализ

АКФ для ряда среднегодовых значений рассчитывалась на 7 сдвигах.

Для среднегодовых значений индекса САК $\tau^2_{кор} = 1$, соответственно, процесс является малоинерционным. На графике видно, что периодичность отсутствует, процесс абсолютно случайный. Следовательно, АКФ представляет собой «белый шум», возможность автопрогноза отсутствует.

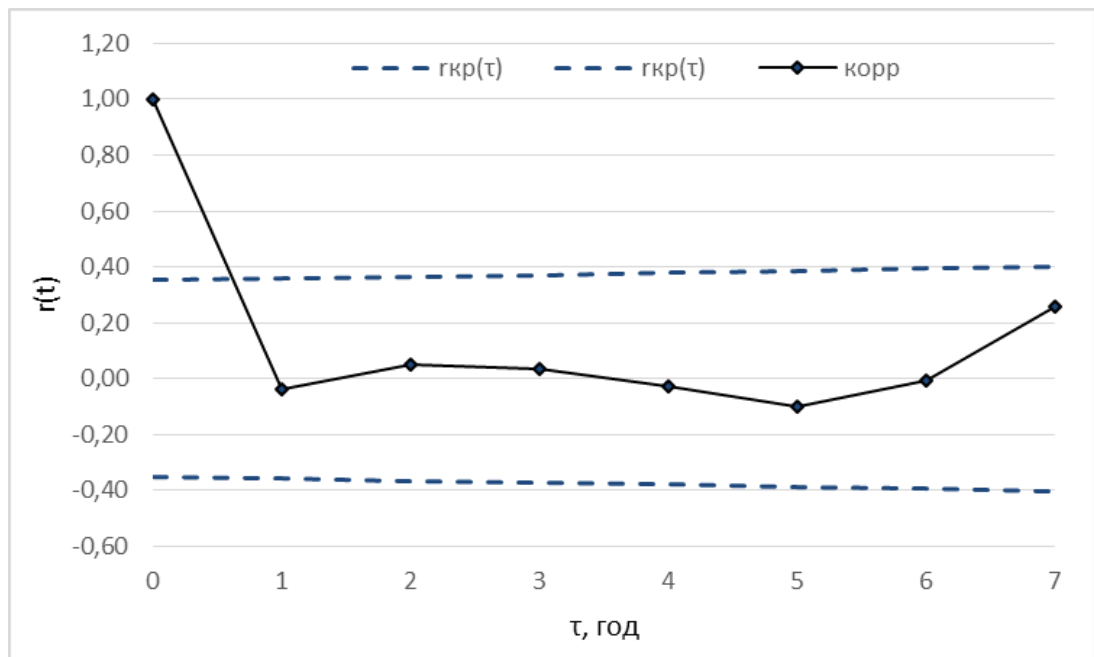


Рисунок 3.17 – АКФ для среднегодовых значений изменчивости индекса САК

3.4.3 Гармонический анализ

При проведении гармонического анализа из Исходного ряда удалили среднее значение, т. к. тренда нет. Была построена периодограмма для среднегодовых значений и на частотах, которые соответствуют пикам периодограммы, рассчитаны гармоники.

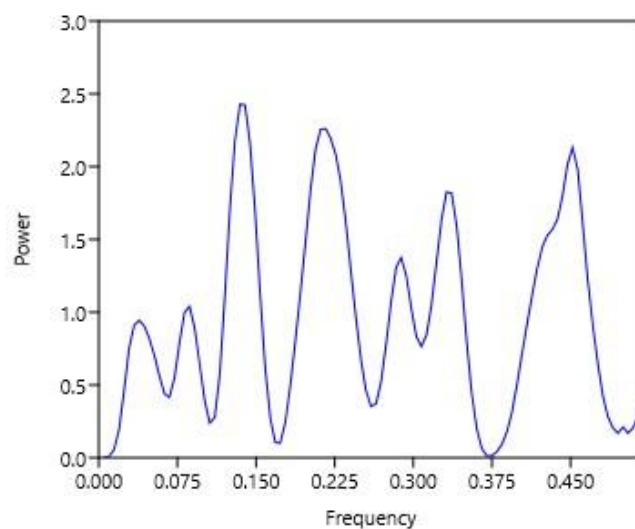


Рисунок 3.18 – Периодограмма для ряда среднегодовых отклонений от тренда

Таблица 3.9 Рассчитанные характеристики гармоник для среднегодовых значений

параметры	Гармоника 1	Гармоника 2
частота, 1/год	2,4233	2,2608
период, год	0,42	0,45
A_k	0,66	0,71
φ_k	3,00	2,76
D_k	0,22	0,26
V_k	0,05	0,06
t^*	6,07	6,59
$t_{кр}$	2,06	2,06

При проверке неравенства $t^* > t_{кр}$ все гармоники для среднегодовых значений оказались значимыми. Общий вклад гармоник в дисперсию составляет – 11 %.

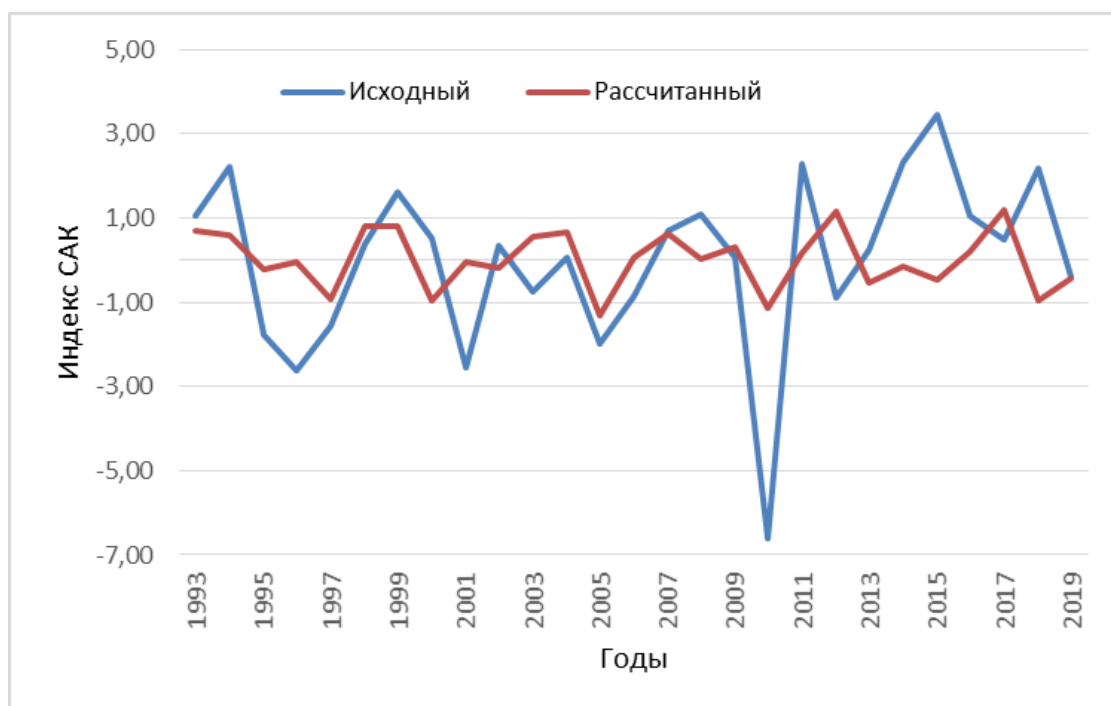


Рисунок 3.19 – Совмещенный график исходных и рассчитанных среднегодовых значений

По рисунку 3.19 можно сказать, что рассчитанные значения некорректно описывают ход исходных значений. Изменчивость данных высока, поэтому отсутствует периодичность процесса.

3.4.4 Изменчивость теплоотдачи между океаном и атмосферой в Бермудской энергоактивной зоне океана (ЭАЗО)

В начале были усреднены значения LE и P в узлах сетки за календарный год и получена суммарная теплоотдача (LE+P) из океана в атмосферу. Далее работа выполнялась с суммарной теплоотдачей.

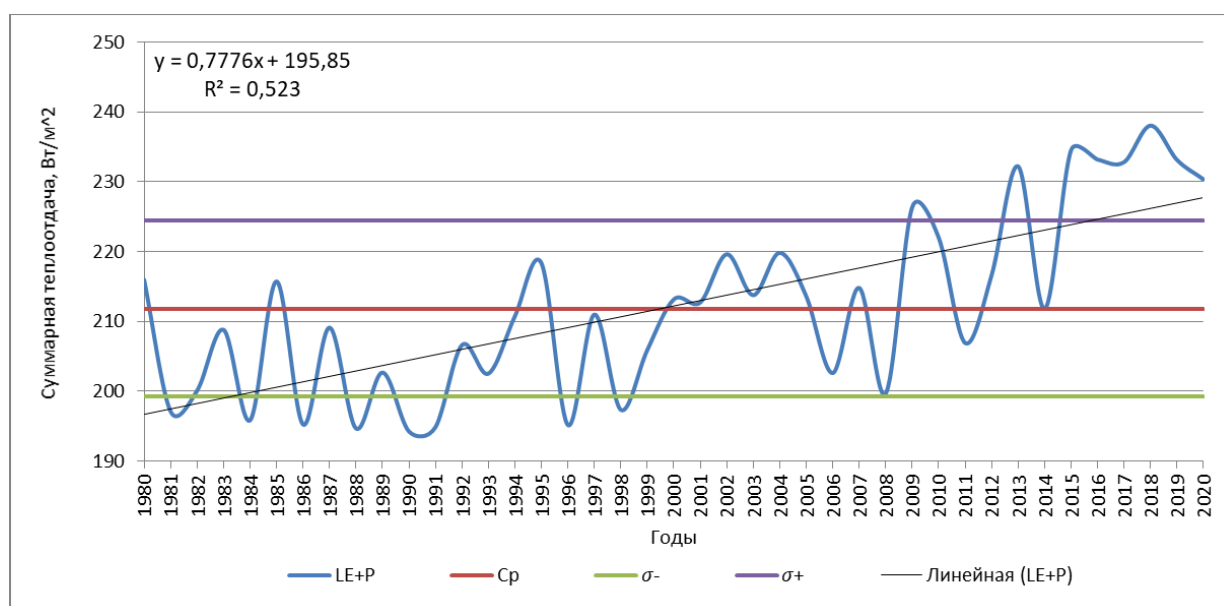


Рисунок 3.20 – Межгодовой ход среднегодовых значений суммарной теплоотдачи в районе ЭАЗО за период с 1980 по 2020 гг.

По рисунку 3.20 видно, что значения суммарной теплоотдачи в Бермудской ЭАЗО с годами повышаются с величиной $7,78 \text{ Вт/м}^2 \cdot 10 \text{ лет}$.

Таблица 3.10 Описательные статистики для среднегодовых значений с осредненными значениями по всем узлам суммарной теплоотдачи

Среднее, Вт/м ²	211,84
Стандартная ошибка, Вт/м ²	1,96
Медиана, Вт/м ²	211,79
Мода, Вт/м ²	#Н/Д
Стандартное отклонение, Вт/м ²	12,57
Дисперсия выборки, (Вт/м ²) ²	157,97
Экссесс	-0,65
Асимметричность	0,41
Минимум, Вт/м ²	194,22
Максимум, Вт/м ²	238,04
Размах вариации, Вт/м ²	43,82
Коэф.вариации, %	6

Размах вариации составил 43,82 Вт/м² при среднем значении равном 211,84 Вт/м². Коэффициент вариации составил 6 %, соответственно, дисперсия небольшая и составила 157,97 Вт/м². Следовательно, сила влияющего фактора невелика.

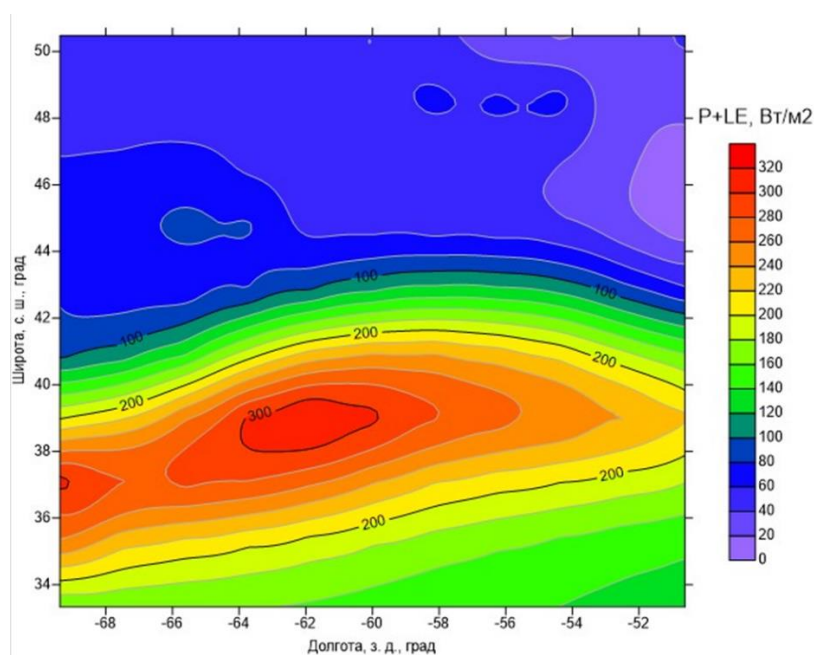


Рисунок 3.21 – Карта среднегодовых значений P+LE в пределах ЭАЗО

На рисунке 3.21 видно, что узел с максимальным значением $P+LE$ получился в координате 62° з. д. и 39° с. ш.

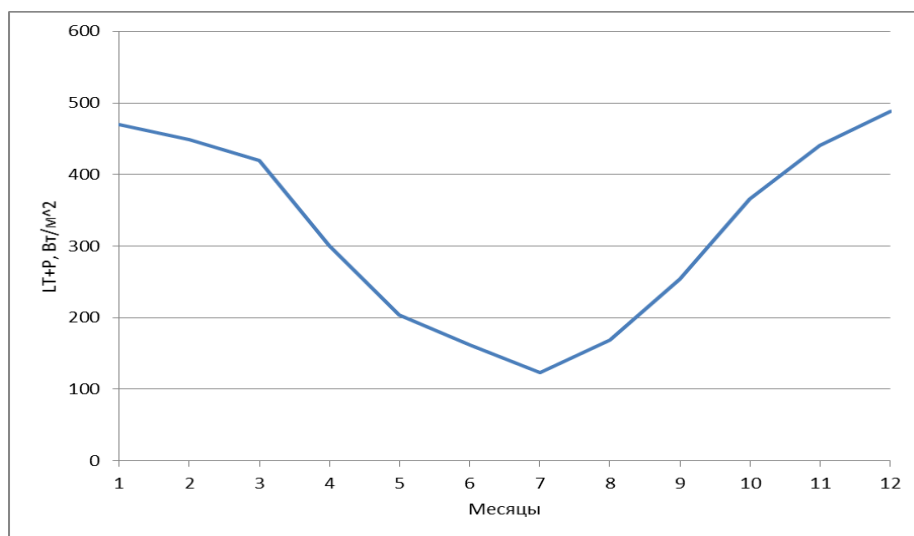


Рисунок 3.22 – Внутригодовая изменчивость суммарной теплоотдачи ($P+LE$) в Бермудской ЭАЗО

По карте среднегодовых значений (3.21) и по графику внутригодового хода в узле с максимальным значением (3.22) можно отметить максимальные значения теплоотдачи зимой, особенно в декабре (488 Вт/м^2), а минимальные летом (123 Вт/м^2). Это объясняется связью океана и атмосферы, т. к. в северном полушарии летом океан «забирает» энергию у атмосферы, а зимой ее «отдает». Временная изменчивость суммарной теплоотдачи ($P+LE$) в узлах с максимальным значением ЭАЗО за период с 1980 по 2020 гг. по среднегодовым значениям затрат тепла на испарение (LE) и турбулентного теплообмена (P). Наибольший вклад вносит в характеристику турбулентный теплообмен.

3.5 Вывод по главе

В среднемесячных и среднегодовых рядах значений индекса GSNW наблюдаются статистически значимые тренды. Величина тренда ряда среднемесячных значений составляет $0,002$ в месяц, вклад – $6,3 \%$, а для ряда среднегодовых значений – $0,02$ в год и вклад $20,6 \%$. За период с 1966 по 2021 гг.

севернее всего Гольфстрим находился в 2002 г., южнее – в 2011 г. Колебания в среднемесячных и среднегодовых значениях носят нерегулярный характер. Возможно причиной этого является случайный характер распределения интенсивности.

В рядах среднегодовых значений расходов воды Флоридского течения нелинейный тренд оказался статистически значимым и его вклад в дисперсию исходного ряда составляет – 16 %, величина тренда – 0,003 в год, соответственно, распределение расходов воды лучше описывается нелинейным трендом. Сложную структура течения описывается нелинейным законом распределения расходов воды Флоридского течения. В изменчивости расходов воды во Флоридском течении выраженных закономерностей не наблюдается.

В рядах среднегодовых значений индекса Северо-Атлантического колебания за период с 1993 по 2019 гг. линейный и нелинейный тренды отсутствуют. В 2010 г. было резкое понижение, после которого индекс пришел в норму.

В Бермудской ЭАЗО суммарная теплоотдача с годами возрастает. Можно отметить максимальные значения теплоотдачи зимой, а минимальные летом. Это объясняется связью океана и атмосферы, т. к. в северном полушарии летом океан «забирает» энергию у атмосферы, а зимой ее «отдает».

На продвижение Гольфстрима никак не повлияла авария в Мексиканском заливе в 2010 г. Индекс GSNW после аварии был положительным и продолжал повышаться. Исходя из этого, за исследуемый период с 1966 по 2021 гг. не наблюдалось ослабление Гольфстрима, т. к. «северная стена» Гольфстрима перемещалась к северу. Среднегодовая изменчивость расходов воды Флоридского течения за период с 1982 по 2021 гг. после аварии в 2011 г. уменьшились, а далее постепенно возрастали. В среднегодовых рядах изменчивости индекса Северо-Атлантического колебания наблюдался резкий отрицательный скачок после аварии на нефтяной платформе, а в последующие годы происходит постепенное увеличение индекса. Поэтому можно считать, что существенных изменений не произошло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессам циркуляции в Северной Атлантике в настоящее время уделяют повышенное внимание как в научной среде, так и в средствах массовой информации. Ослабление интенсивности Гольфстрима – главная обсуждаемая тема. Исходя из этого, в представленной работе выполнена оценка интенсивности вод Гольфстрима и их влияние на климат Европы.

Для решения поставленных задач проведен статистический анализ индекса Гольфстрима «Северная стена» (GSNW) за период с 1966 по 2021 гг. Положительные значимые тренды наблюдаются в рядах среднемесячных и среднегодовых значений, что говорит об увеличении индекса GSNW. В среднемесячных значениях величина тренда составляет 0,002 в месяц, вклад – 6,3 %, а в среднегодовых – 0,02 в год и вклад 20,6 %. Исходя из этого, можно сделать вывод, что при отрицательных значениях индекса GSNW течение Гольфстрим продвигается в южном направлении, а при положительных значениях Гольфстрим движется по направлению на север. За исследуемый период севернее всего Гольфстрим находился в 2002 г., южнее – в 2011 г. Соответственно, ослабления течения Гольфстрим не происходило, т. к. северная граница Гольфстрима перемещалась к северу.

Автокорреляционный анализ в ряде среднемесячных значений индекса GSNW показывает, что процесс является смешанным, наблюдаются циклические колебания с периодичностью 2-4 месяца, а также высокую инерционность и радиус корреляции 65 месяцев, что соответствует красному шуму. Вклад тренда в дисперсию составляет 7 %. По гармоническому анализу видно, что все гармоники значимые. Подтверждение этому наличие циклических колебаний на АКФ. Для среднегодовых значений наблюдается процесс простой цепи Маркова и является малоинерционным, радиус корреляции – 2 года. Вклад тренда в дисперсию равен 22%. Гармонический анализ показал, что все выделенные гармоники значимые, других периодичностей в рядах

интенсивности течения не проявляется. Все выделенные гармоники оказались значимыми.

Оценка изменчивости расходов воды Флоридского течения был получена в результате статистического анализа за период с 1982 по 2021 гг. средняя интенсивность течения за исследуемый период составила 32,29 Св, минимальная – 29,30 Св, а максимальная – 35,47 Св. Для среднегодовых значений оказался значимым только нелинейный тренд, величина тренда равна 0,003 Св в год, его вклад в дисперсию исходного ряда составил 16 %.

Автокорреляционный анализ ряда среднегодовых значений расходов воды Флоридского течения показывает абсолютно случайный процесс. Периодичность отсутствует, на АКФ отчетливо наблюдается белый шум, радиус корреляции составляет 1 год. При гармоническом анализе все гармоники значимые, но периодичности в распределении расхода не наблюдается.

Косвенная оценка интенсивности Северо-Атлантического колебания, полученная в результате анализа индекса САК. За исследуемый период с 1993 по 2019 гг. в рядах среднегодовых значений отсутствуют тренды. Это подтверждает то, что не происходило кардинальных изменений в интенсивности. Положительные значения индекса после 2010 г. показывают, что теплые воды Гольфстрима продолжают поступать к берегам Европы. Автокорреляционный анализ показал, что отсутствует периодичность, процесс является абсолютно случайным. Наблюдается белый шум с радиусом корреляции 1 год. Все гармоники оказались значимыми при проведении гармонического анализа, общий вклад гармоник –11 %.

Основными факторами, которые формируют перенос влаги в Европу, являются циркуляция атмосферы и испарение с акватории океана. Индекс Северо-Атлантического колебания – важная характеристика в формировании циркуляции атмосферы в северном полушарии, влияющая на формирование климата в Европе. Циклоны и антициклоны образуются под действием западного переноса воздушных масс. При положительном индексе САК происходит увеличение циклонов, западный перенос приносит в Европу мягкую теплую

зиму с большим количеством осадков и холодное лето. Теплые воды Гольфстрима и Северо-Атлантического течения поступают на север. Тем временем из Арктики прибывает небольшое количество льда, которое в последствии тает в Северной Атлантике. При отрицательном индексе САК наблюдается уменьшение циклонической деятельности, происходит ослабление западных ветров. В Европу приходит сухая холодная зима с небольшим количеством осадков и теплое лето. Течение Гольфстрим ослабевает и переносит на север более холодные воды. Медленно сокращается количество льда, поступающего из Арктики.

Энергоактивные зоны (Бермудская, Ньюфаундлендская и Норвежская), связанные с теплым течением Гольфстрим, формируют изменчивость индекса САК, который определяет перенос водяного пара в Европу. Индекс Северо-Атлантического колебания в теплый период года выражен слабо, поэтому его влияние на перенос влаги уменьшается. А в холодный период года индекс САК имеет более сильную выраженность, поэтому влияние на перенос влаги максимально. Водяной пар влияет на изменчивость осадков не только в Европе, но и в бассейне Волги и увеличивает уровень Каспийского моря. Испарение возрастает при усилении индекса САК, поэтому происходит перенос большого количества влаги на континент. Соответственно, количество осадков, выпадающих в бассейне Волги увеличивается, что приводит к повышению стока реки и увеличению уровня моря. При ослаблении индекса САК наблюдается уменьшение испарения, которое сопровождается сокращением количества осадков, что приводит к уменьшению стока и понижению уровня моря. Известно, что в холодный период года атмосферный перенос водяного пара выступает в качестве единственного источника выпадения осадков в бассейне Волги, который обусловлен испарением с акватории Северной Атлантики, а в теплый период года является основным источником.

Главным выводом в результате данного исследования является то, что в последние десятилетия в циркуляции вод Северной Атлантики существенные изменения не наблюдаются. Интенсивность течения Гольфстрим находится в

норме. Гольфстрим продолжает продвигаться в северном направлении, осуществляя перенос тепла в Европу. Северо-Атлантическое колебание также оказывает влияние на климатические условия на европейский континент и европейскую территорию России. Индекс САК изменяется в пределах нормы, поэтому говорить о глобальном потеплении в крупных масштабах не имеет смысла. Таким образом, говорить о том, что глобальное потепление нарушает равновесие течения Гольфстрим и Европа «замерзнет» нецелесообразно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Henry Stommel. The Gulf Stream/ A physical and Dynamical Description/ Henry Stommel. - Chapel Hill,NC: The University of North Carolina Press, 1958.- P.230.
2. Баранов, Е.И. Структура и динамика вод системы Гольфстрим/ Гос. Океаногр. Институт. - Москва: Гидрометеиздат. Московское Отделение, 1990. - 250 с.
3. Барышевская, Г.И. Течения системы Гольфстрим и температурный режим Северной Атлантики / Гос. Океаногр. Институт. - Москва: Гидрометеиздат. Московское Отделение, 1990. - 139 с.
4. Бондаренко, А.Л. Настоящее и будущее Гольфстрима / А. Л. Бондаренко, В. В. Жмур, // Природа. 2007. - №7. - с. 29-37.
5. Каменкович, В.М. Синоптические вихри в океане / В. М. Каменкович, М. М. Кошляков, А.С. Монин. - Ленинград, 1982.
6. Малинин В.Н. Гольфстрим и климат Европы / В.Н. Малинин // Общество. Среда. Развитие. – 2012. – №1. – с. 214 – 220
7. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. / В. Н. Малинин – СПб.: изд. РГГМУ, 2020. – 408 с.
8. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017. – 66 с.
9. Taylor A.H., J.A. Stephens. Latitudinal displacements of the Gulf Stream and their relation to changes in temperature and zooplankton abundance in the NE Atlantic // Oceanol. Acta. 1980. № 3. P. 145–149.
10. Taylor A. Monthly and Annual Means of the 1st Principal Component of the position of the North Wall of the Gulf Stream 1966–2021 // Plymouth Marine Laboratory. UK. Mode of access: <http://www.pml-gulfstream.org.uk/2010/Web2010.pdf>.

11. Карлин Л.Н. Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме / Л.Н. Карлин, В.Н. Малинин, С.М. Гордеева // Океанология. – 2013. – том 53. – №4. – с. 1 –9.
12. Latitude of the Gulf Stream [Электронный ресурс]. – электрон. дан. / Plymouth Marine Laboratory. – Plymouth, 2022 – Режим доступа: <http://www.pml-gulfstream.org.uk/>
13. Florida Current Transport Time Series and Cruises [Электронный ресурс]. – NOAA AOML Physical Oceanography Division. – 2022 – Режим доступа: http://www.aoml.noaa.gov/phod/floridacurrent/data_access.php
14. Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (Station Based) [Электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>
15. Hurrell, J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation / J.W. Hurrell // Science. - 1995. - Vol. 269. - P. 676-679.
16. Hurrell, J.W. Climate variability: North Atlantic and Arctic Oscillation / J.W. Hurrell // In. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. - 2003. - P. 439-445.
17. International Research Institute for Climate and Society [Электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/>
18. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша» // Труды КарНЦ РАН. No 4. Сер. Лимнология. 2020.