



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ ЗА ПОСЛЕДНЕЕ ТЫСЯЧЕЛЕНИЕ»

Исполнитель: Абрамова Ирина Александровна, гр. ПО-М18-1-8

Научный руководитель: к.г.н., доцент, Густоев Дмитрий Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

« ___ » _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЧАСТЬ I. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕЖВЕКОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА НА ПЛАНЕТЕ.....	7
1.1. Определение климата и его межвековой изменчивости.....	7
1.2. Основные современные исследования климата.....	10
1.3. Оценка степени изученности климатических изменений на планете за последнее тысячелетие.....	13
1.4. Выводы по главе.....	22
ЧАСТЬ II. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	24
2.1. Элементарная статистика.....	25
2.1.1. Среднее.....	25
2.1.2. Амплитуда колебаний.....	25
2.1.3. Дисперсия.....	26
2.1.4. Среднеквадратическое отклонение.....	26
2.1.5. Коэффициент асимметрии.....	26
2.1.6. Коэффициент эксцесса.....	27
2.2. Спектральный анализ.....	29
2.3. Вейвлет-анализ.....	33
2.3.1. Вейвлет-преобразование.....	33
2.3.2. Виды вейвлетов.....	36
2.3.3. Интерпретация результатов.....	38
2.4. Выводы по главе.....	41
ЧАСТЬ III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ.....	43
3.1. Элементарная статистика	44
3.2. Анализ внутренней структуры исследуемых рядов.....	46
3.2.1. Свойства внутренней структуры ряда содержания кальция.....	47
3.2.2. Свойства внутренней структуры ряда содержания дейтерия.....	50
3.2.3. Свойства внутренней структуры ряда содержания хлора.....	54

3.2.4. Свойства внутренней структуры ряда значений температуры.....	58
3.2.5. Свойства внутренней структуры ряда количества осадков.....	61
3.3. Выводы по главе.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	71

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей своей истории, вне зависимости от эпохи и уровня развития науки и техники, человечество нуждалось в прогнозах погоды для обеспечения комфортного существования. Благодаря потребности в прогнозах погоды возникла и начала развиваться наука климатология, предметом изучения которой является состояние климата в прошлом, настоящем и будущем планеты.

Одной из основных задач климатологии и гидрометеорологии в целом является прогнозирование климата будущего. Для моделирования климатических процессов в будущем и успешного прогнозирования погодных явлений необходимо иметь представление о том, какой характер имеет изменчивость климата в настоящем, и какой характер она имела в течение прошлых геологических эпох, на протяжении всей истории существования планеты. Формулирование общей гипотезы формирования климатической изменчивости является актуальной задачей для прогнозирования будущих климатических изменений. В свою очередь, для формулирования подобных гипотез необходимо исследовать современный климат, а также палеоклимат.

Таким образом, исследование изменчивости климата прошлого и настоящего и выявление закономерностей представляется весьма актуальным и необходимо не только в целях решения таких бытовых задач, как обеспечение общественности ежедневным прогнозом погоды, но также и для дальнейших глобальных исследований климата планеты, построения математических моделей и прогнозирования изменчивости климата с большой заблаговременностью.

Объект исследования - климат планеты.

Предмет исследования - гидрометеорологические временные ряды.

Инструмент исследования - аналитические и прогностические статистические методы.

Цель работы: выявление закономерностей в изменчивости климата Земли за последние 2000 лет.

Задачи работы:

1. Элементарная статистика
2. Выявление закономерностей
3. Фильтрация энергонесущих частот
4. Определение возможности аппроксимации и интерполяции статистическими методами

Научная новизна исследования

1. Формулирование гипотез о природе изменчивости климата;
2. Выявление закономерностей в изменчивости климата за последнее тысячелетие
3. Выявление взаимосвязи в изменчивости некоторых климатических параметров
4. Определение возможности прогнозирования климатических изменений с большой заблаговременностью (порядка 50-100 лет)

Исходные данные

В качестве исходных в данной работе были использованы следующие данные:

1. Геохимические данные из кернов, взятых на леднике Восточный Ронгбук, Гималаи, Южная Азия, гора Эверест, 2002 год. Географические координаты: 28.03°N, 86.96°E; высота 6518 м, глубина бурения 108 м. Авторы: Susan Kaspari, Paul Mayewski, Shichang Kang and Shugui Hou, NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA [3].

Данные за период 997 – 1997г., осреднены за 5 лет.

- 1.1. Ряд значений содержания кальция, Ca, мкг/л
- 1.2. Ряд значений содержания хлора, Cl, мкг/л
- 1.3. Ряд значений содержания дейтерия, δD , ‰

2. Данные о тропических осадках за последние 2000 лет, с 2000г. bp (50 лет до н.э.) по -50г. bp (2000 год). Авторы: Franziska A. Lechleitner, Sebastian F.M. Breitenbach, Kira Rehfeld, Harriet E. Ridley, Yemane Asmerom, Keith M., World Data Service for Paleoclimatology, Boulder, NOAA Paleoclimatology Program, 2017г. Данные осреднены за 10 лет [4].
3. Данные о температуре за последние 2000 лет, с 5 по 1995 г. Darrell S. Kaufman, Northern Arizona University, 2009 год. Данные осреднены за 10 лет. $T=(\text{Mean Normalized Proxy}-0.857)/1.936$ [5].

ЧАСТЬ I. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕЖВЕКОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА НА ПЛАНЕТЕ

1.1. Определение климата и его межвековой изменчивости

Для начала следует уточнить, что подразумевается под понятиями «климат», «межвековая изменчивость климата».

Климат (в переводе с греческого «наклон», подразумевается угол падения солнечных лучей) есть совокупность многолетних изменений погодных условий, характерных для данной области Земли, другими словами – совокупность средних многолетних значений климатических переменных, т.е. характеристик погоды. Под характеристиками погоды следует понимать ряд метеорологических величин, таких как температура воздуха, атмосферное давление, влажность воздуха, направление и скорость ветра, облачность, количество осадков и т.д. Также выделяют атмосферные явления, такие как гроза, туман и т.д. Таким образом, погоду можно определить как состояние атмосферы в данной местности в данное время. Монин даёт определение погоде как мгновенному состоянию атмосферы, которое определяется состоянием полей различных характеристик – вектора скорости ветра, давления и т.д. [6].

Однако такое определение климата является недостаточно конкретным, т.к. его колебания происходят постоянно с разной амплитудой и продолжительностью, и выбрать период осреднения представляется затруднительным. Для того чтобы выбрать период осреднения, был построен график с амплитудами колебаний метеорологических характеристик в разные по продолжительности периоды, т.е. спектр колебаний погодных условий разной продолжительности. Были выявлены колебания с минимальной амплитудой, и оказалось, что они имеют периоды в 30 – 40 лет. Этот период является оптимальным для осреднения погод.

Таким образом, А. С. Монин дал определение климату как статистическому ансамблю состояний атмосферы за период приблизительно 30 – 40 лет, что является климатической эпохой [7].

Соответственно, изменениями климата можно считать изменения за период 30 – 40 лет, а межвековой изменчивостью климата – изменения состояний атмосферы в течение нескольких веков с дискретностью 30 - 40 лет.

Изменения же с периодами от месяцев до нескольких лет принято называть долгосрочными изменениями погоды.

Однако в настоящее время, когда наблюдается изменение тенденций и так называемое глобальное потепление, мы вынуждены рассчитывать значения по другим данным за другой временной период (1980-2010), взяв за точку отсчета 1980, чтобы учесть последние изменения климата и не исказить сложившуюся климатическую обстановку, а именно, отразить, что фон склонен стабилизироваться, а тенденция потепления – меняться в другую сторону.

Также следует отметить, что изменения происходят не только в атмосфере и, говоря о климате, нельзя рассматривать ее как замкнутую систему. Состояние климата Земли также определяют процессы, протекающие в других слоях Земли, с которыми взаимодействует атмосфера. Существует понятие климатической системы, которое расширяет понятие климата атмосферы и включает в себя также другие факторы, влияющие на глобальный климат.

Наиболее инерционной составляющей этой системы, если сравнивать по массам и теплоемкостям, является мировой океан. Его деятельный слой, если считать таковым толщу воды, в которой происходят сезонные колебания характеристик, в среднем составляет 240 м. Океан во многом определяет долгосрочные изменения погоды и климата в целом [7].

Второй составляющей климатической системы является верхний слой твердой Земли, также называемый деятельным, его толщина в среднем составляет 10м. Также иногда выделяют криосферу, биосферу и астеносферу.

Атмосфера же является наименее инерционной составляющей климатической системы. Она быстро приспосабливается к изменениям, происходящим в океане, и является индикатором состояния всей климатической системы. Однако атмосфера также влияет на процессы, протекающие в океане, в т.ч. производит ветровые течения в нем, а также распределяет осадки на суше.

1.2. Основные современные исследования климата

Перед современной мировой наукой, в частности, климатологией, стоит ряд важнейших задач, над решением которых работают множество исследователей и организаций по всему миру [8]. В число этих задач входит:

- Исследование глобального климата прошлого и настоящего: его изменчивости, аномалий и причин, вызвавших их, естественных колебаний, экстремальных климатических явлений;
- Исследование антропогенного влияния на климат: парниковых газов, выбросов загрязняющих веществ и других факторов, влияющих на состояние климата, оценка состояния озонового слоя и качества воздуха. Разработка и усовершенствование стратегий сокращения выбросов загрязняющих веществ, а также сценариев развития и изменений климата в будущем.
- Разработка и усовершенствование моделей, позволяющих оценить будущие изменения климата, в т.ч. атмосферы и океана
- Исследование влияния изменений климата на различные экосистемы, в т.ч. населения и экономического сектора
- Обеспечение общественности научной информацией, связанной с изменениями климата и его колебаниями, содействие решению общественных проблем, связанных с климатическими явлениями.

В настоящее время вышеперечисленные задачи решаются различными организациями на международном уровне. Наиболее значимыми международными программами, занимающимися климатическими исследованиями, являются:

- World Climate Research Program (WCRP), Всемирная программа исследования климата, основана в 1980 году – интернациональная программа, координирующая глобальное исследование климата. Создана Всемирной метеорологической организацией и Международным Советом научных

союзов с целью определения предсказуемости климата и изучения влияния на него деятельности человека. С 1993 спонсируется также Межправительственной океанографической организацией (Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC) ЮНЕСКО. Для прогнозирования климата используются сложные математические модели. Основной деятельностью программы являются четыре проекта:

- Stratospheric Processes and their role in Climate (SPARCS) – Стратосферные процессы и их роль в климате
- Climate Variability and Predictability (CLIVAR) – Изменчивость и предсказуемость климата
- Global Energy and Water cycle Exchanges (GEWEX) – Глобальная энергия и гидрологический цикл
- Climate and Cryosphere (CliC) - Климат и криосфера
- Также в 2005 участниками WCRP был предложен новый стратегический подход «Coordinated Observation and Prediction of the Earth System» (COPEs) – Координированные наблюдения и прогнозирование природной системы, целью которого стало привлечение внимания к проблеме улучшения прогнозирования климатических изменений.

- Global Climate Observing System – Глобальная система наблюдений за климатом, создана в 1992 для контроля распространения информации, связанной с решением климатических проблем.

- World Meteorological Organization (WMO) – Всемирная метеорологическая организация, основана в 1950, включает 185 стран и 6 территорий.

- International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), Международная геосферно-биосферная программа, которая проводилась с 1987 по 2015 год и была посвящена изучению явления глобальных изменений климата, а также интернациональным исследованиям взаимодействий между биологическими, химическими и физическими процессами Земли в

глобальном и региональном масштабах и их взаимодействиях с человеческими системами.

- International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), Международная программа исследования роли человека в глобальном изменении окружающей среды, была сформирована в 1990 году - исследовательская программа, изучающая влияние человека и социальных аспектов на глобальные изменения климата.

- DIVERSITAS - международная исследовательская программа, направленная на исследование биоразнообразия.

- Earth and Space Science Partnership (ESSP) - Партнерство в области наук о Земле, в т.ч. Инициатива партнерства в области наук о Земле в Северной Евразии NEESPI.

Многие серьезные ученые СССР и России также занимались проблемой изменчивости климата на планете, самыми яркими являются:

- А. С. Монин, геофизик, океанолог, автор работ по математическому моделированию океана и атмосферы, климатологии, прогнозу погоды и др., чья область деятельности – геофизическая гидродинамика.

- Н. С. Сидоренков, доктор физико-математических наук, внес большой вклад в изучение климата, в т.ч. изобрел метод прогнозирования гидрометеорологических характеристик, предиктором изменчивости которых является скорость вращения Земли.

1.3. Оценка степени изученности климатических изменений на планете за последнее тысячелетие

Основной проблемой изучения климата является недостаток данных, их разрозненность и отсутствие четкой системы исследований. Так, например, имеющиеся гляциологические данные за последние 5000 лет не отражают климатических изменений, происходивших на планете в целом, по ним можно судить лишь о климатической ситуации в Северном полушарии. Длина временных рядов других гидрометеорологических характеристик не превышает 100 лет за редкими исключениями.

Временной период, за который имеются данные хотя бы о каких-то гидрометеорологических характеристиках, ничтожно мал по сравнению с масштабами истории существования планеты. Как известно, ее история насчитывает такие геологические эпохи, как: - Катархей, 4,5 млрд лет назад; Архей, 3,8 млрд. лет назад; - Протерозой, 2,5 млрд. лет назад; -Палеозой, 542 млн. лет назад; Мезозой, 251 млн. лет назад; -Кайнозой, 65 млн. лет назад. Кайнозойская эпоха включает в себя Палеогеновый, Неогеновый и Четвертичный период, который, в свою очередь, делится на Плейстоценовый и Голоценовый отделы. Голоцен начался около 12 тыс. лет назад и продолжается в настоящее время. Исследуемый же в данной работе период времени составляет около 5 тыс. лет.

Проблема исследований глобального климата заключается также в том, что все эти эпохи характеризуются очень общими сведениями, а периоды изменений исчисляются миллионами лет. Об изменениях климата, происходивших внутри данных эпох, о возможных климатических явлениях данные отсутствуют. Это существенно затрудняет воспроизведение состояния климата в прошлом планеты.

В сравнении с длительностью геологических эпох, период, рассматриваемый в данной главе, представлен для наглядности на рис. 1.1 – 1.3.

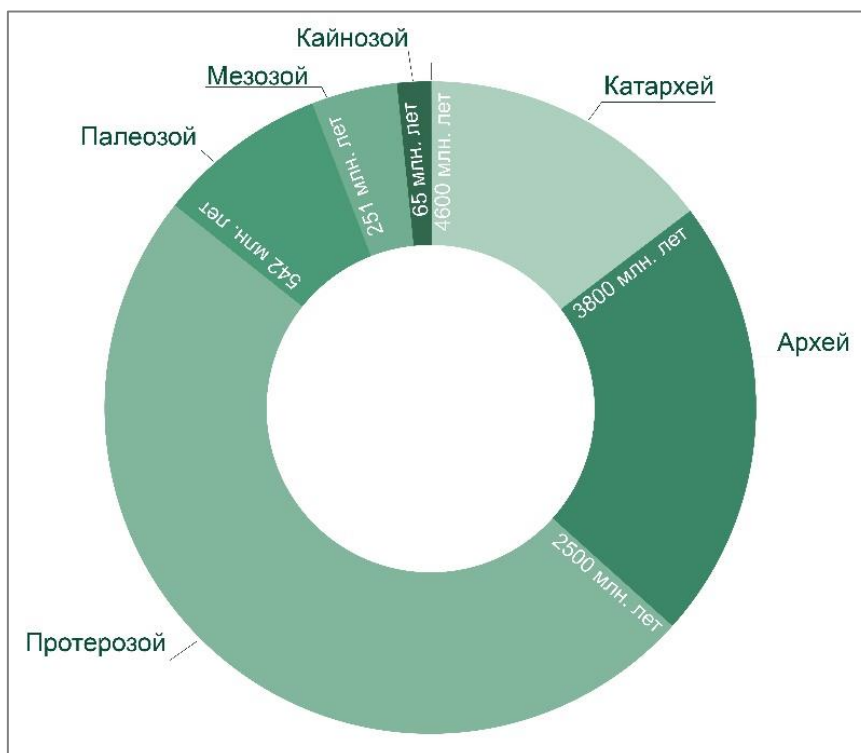


Рис. 1.1. Геологические эпохи

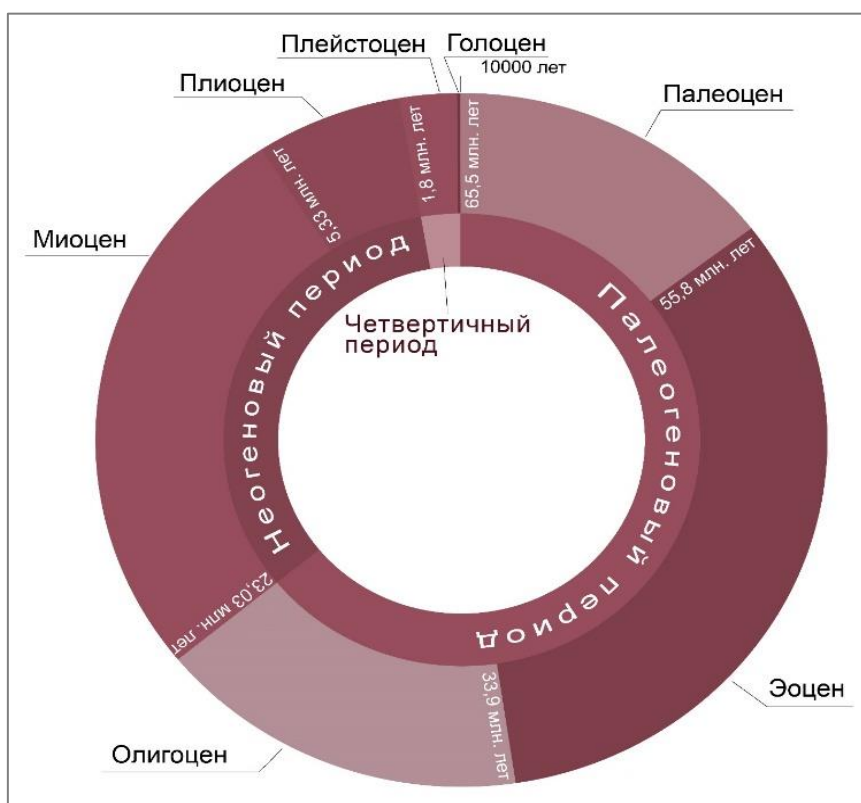


Рис. 1.2. Кайнозойская эра

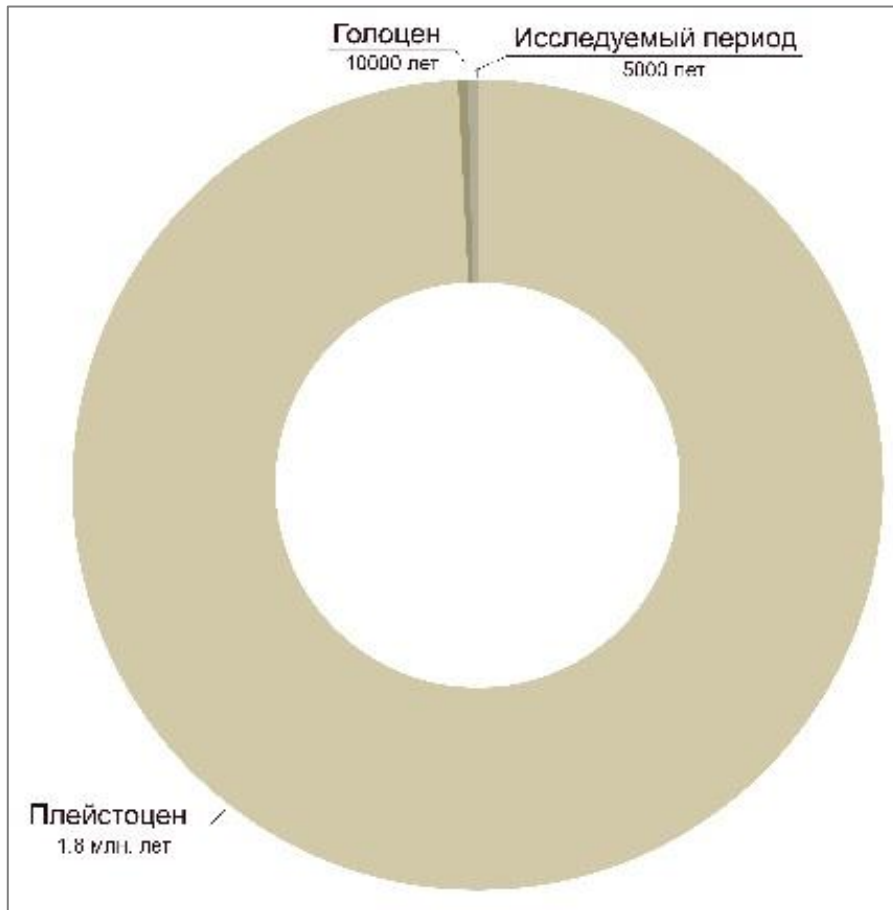


Рис. 1.3. Исследуемый период времени

Не имея достоверных данных о состоянии климата прошлого, можно лишь предполагать, как менялся климат в течение этих геологических эпох. Однако и по имеющимся данным можно составить представление о характере изменений климата.

Очевидно, что климатическая изменчивость не является линейной. Для того чтобы наглядно продемонстрировать несостоятельность гипотезы линейного развития изменчивости климата, был построен график среднегодовых значений колебания уровня Каспийского моря за период с 1900 по 2008 (Рис. 1.4). Данные взяты с сайта Государственного океанографического института [1].

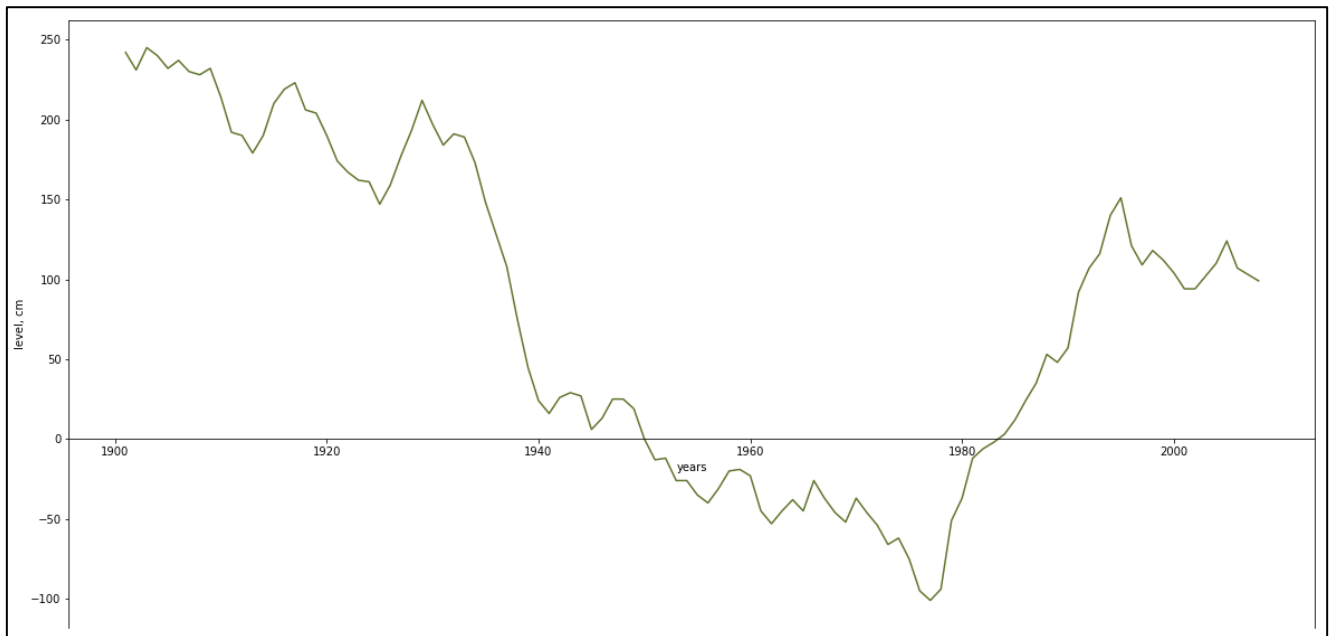


Рис. 1.4. Временной ход среднегодовых значений уровня Каспийского моря с 1900 по 2008

Далее был нанесен тренд, коэффициент детерминации составил 0,78

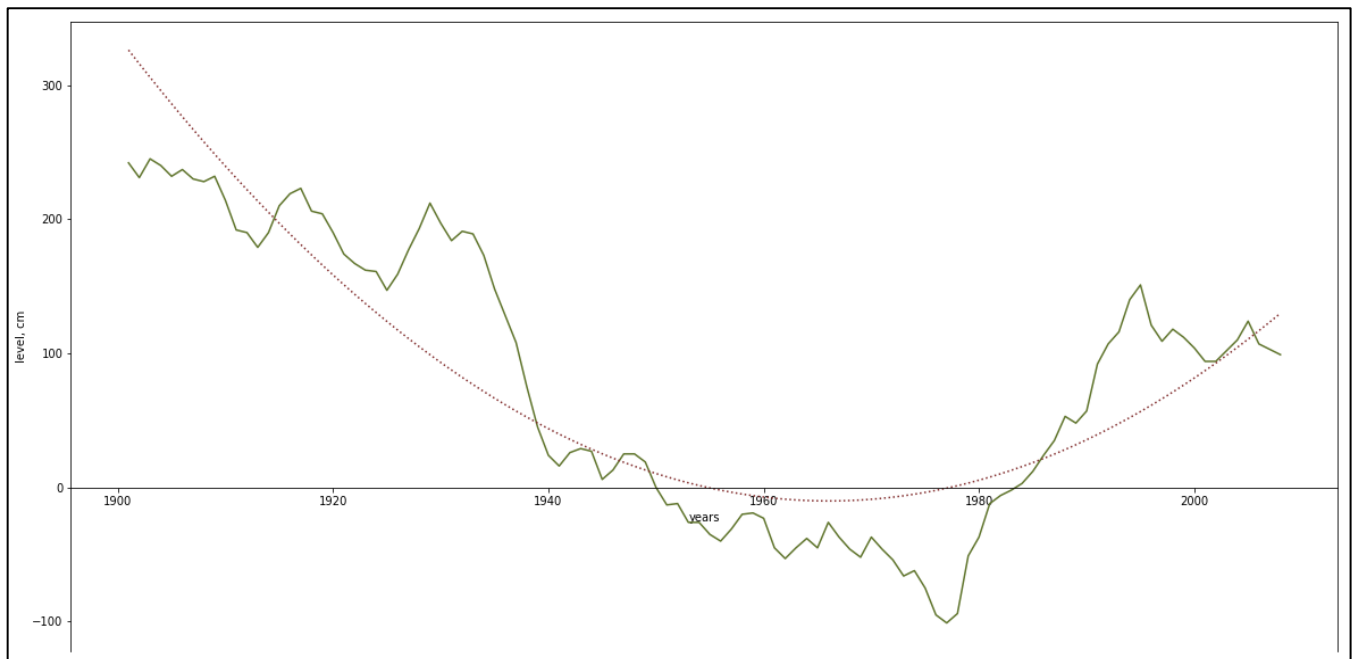


Рис. 1.5. Временной ход среднегодовых значений уровня Каспийского моря с 1900 по 2008, полиномиальный тренд

Удалив тренд, можно провести спектральный анализ и выделить наиболее значимые гармоники:

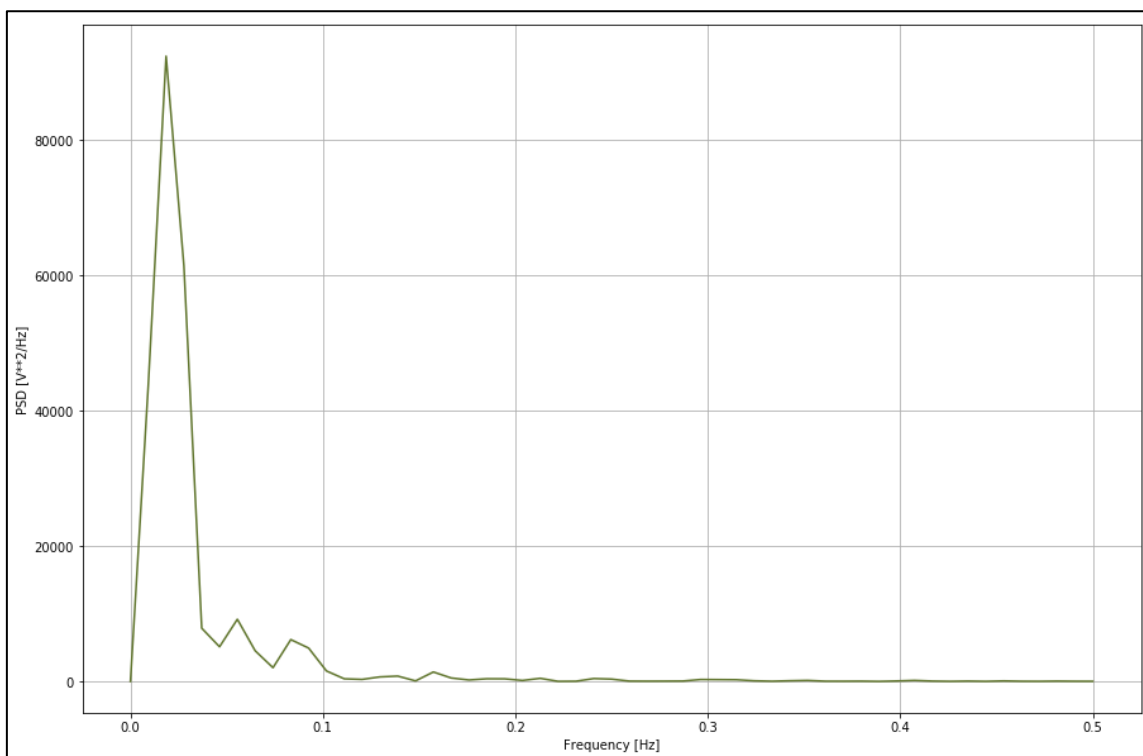


Рис. 1.6. Периодограмма для ряда значений уровня Каспийского моря

Рассчитаем период наиболее мощной гармонике (Рис.1.6.): наиболее мощная гармоника приходится на период 54 года.

Далее можно предположить, что климатическая изменчивость имеет циклический характер. Циклический процесс предполагает, что система, выведенная из состояния равновесия, через некоторый промежуток времени возвращается в свое первоначальное состояние, при этом, в отличие от гармонических процессов, промежутки времени между колебаниями состояния данной системы не являются одинаковыми. Такой процесс можно также назвать квазигармоническим.

Для иллюстрации этого был построен график изменчивости среднегодовых значений чисел Вольфа за период с 1700 по 2019 г. (Рис. 1.7). Данные взяты с сайта Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) [2].

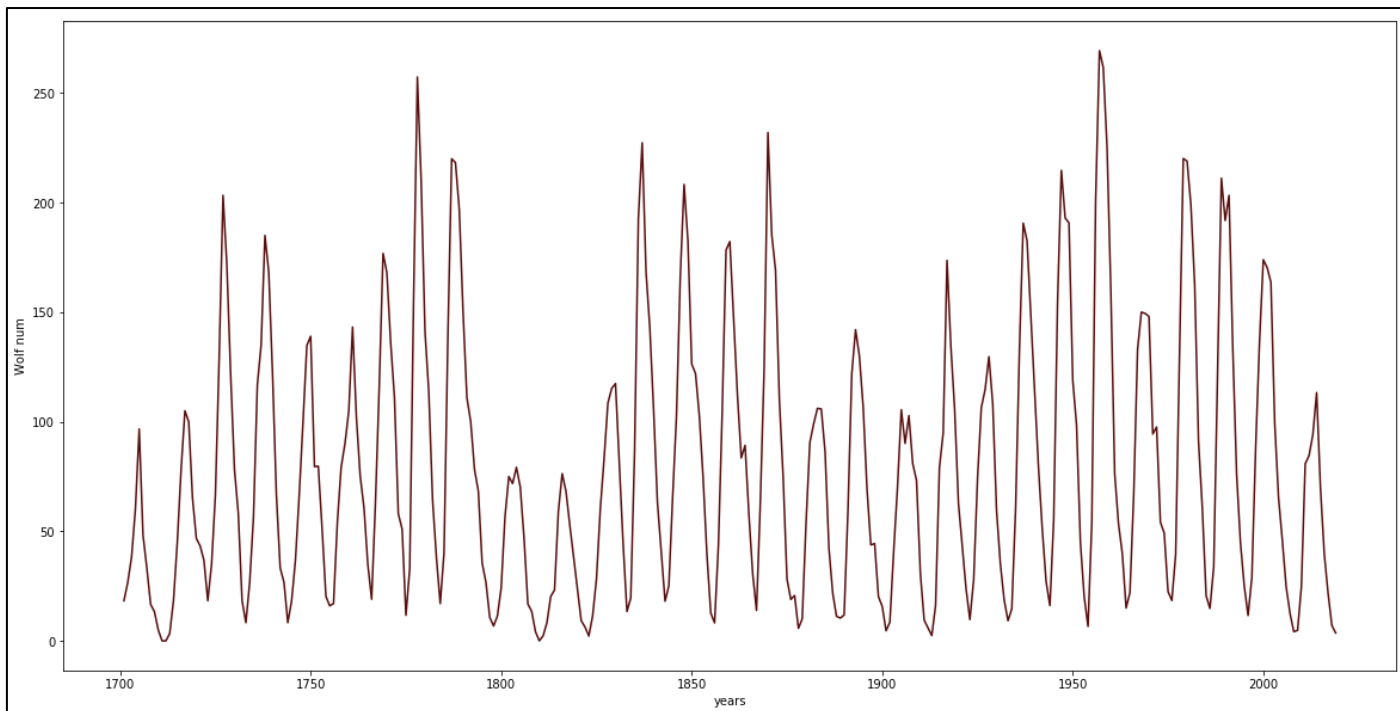


Рис. 1.7. Временная изменчивость среднегодовых значений чисел Вольфа в период с 1700 по 2019 г.

Действительно, как видно на графике, данная изменчивость имеет свойства циклического процесса. Также видно отсутствие выраженного тренда. Однако нельзя с уверенностью сказать, что в данном процессе действительно отсутствует развитие и система неизменно возвращается в первоначальное положение, т.к. длина ряда имеющихся данных ничтожно мала по сравнению с масштабами истории существования Солнечной системы, и то, что нам кажется линейным трендом или, как в данном случае, его отсутствием, может быть лишь частью другого тренда, например, нелинейного, с гораздо большим периодом, чем длина исследуемого ряда. Таким образом, мы также не можем принять гипотезу о циклическом характере изменчивости климатической системы.

Для ряда чисел Вольфа также был проведен спектральный анализ и выделена наиболее мощная гармоника с периодом 11 лет, что соответствует общепринятым представлениям об изменчивости чисел Вольфа (Рис. 1.8). На данном примере хорошо виден квазипериодический характер процесса.

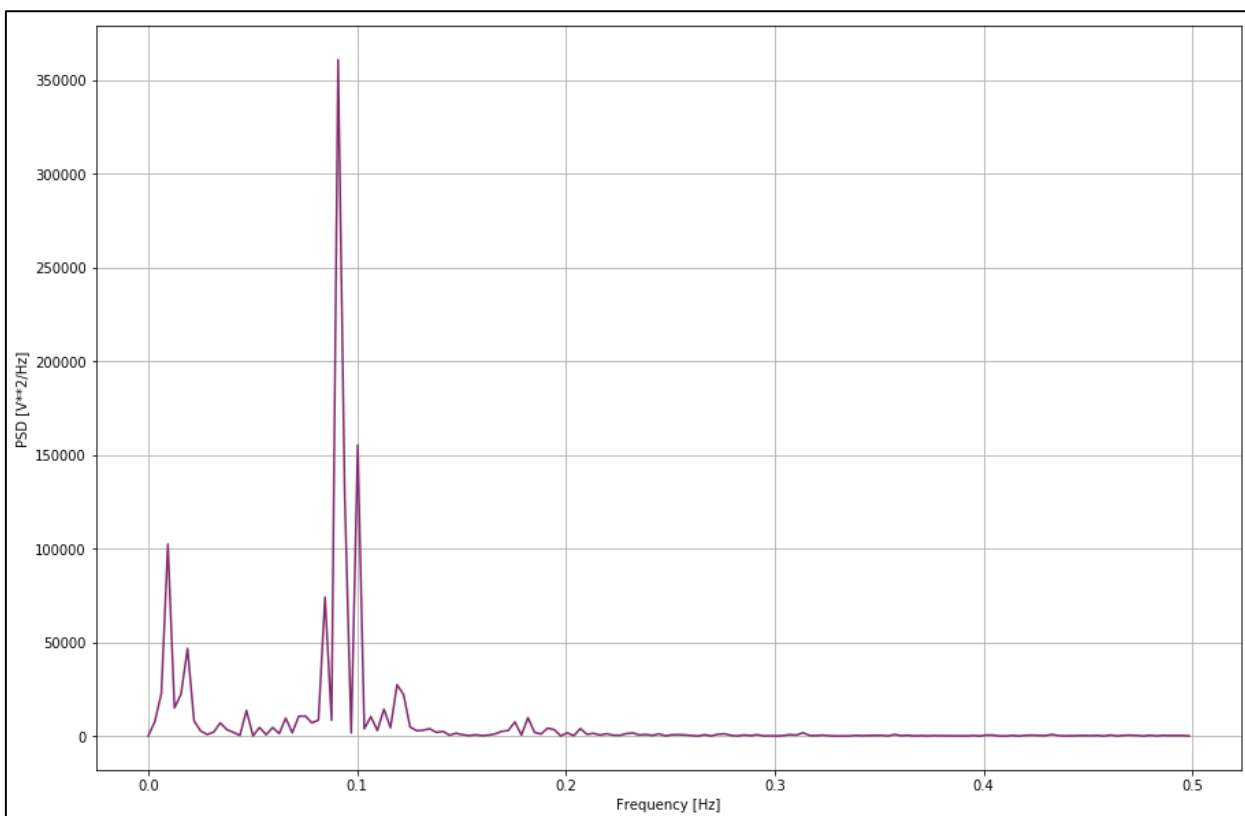


Рис. 1.8. Периодограмма для ряда значений чисел Вольфа

Таким образом, можно предположить, что климатические процессы не являются линейными, имеют свойства циклического, или квазигармонического процесса, но при этом климатическая система не возвращается в свое стабильное состояние, а получает некоторое развитие, т.е. присутствует некий тренд. Такое развитие процесса можно условно назвать спиральным.

Для того чтобы проиллюстрировать подобный процесс, был построен временной ход среднегодовых значений температуры воды на Кольском меридиане за период с 1840 по 2018г. (Рис. 1.9).

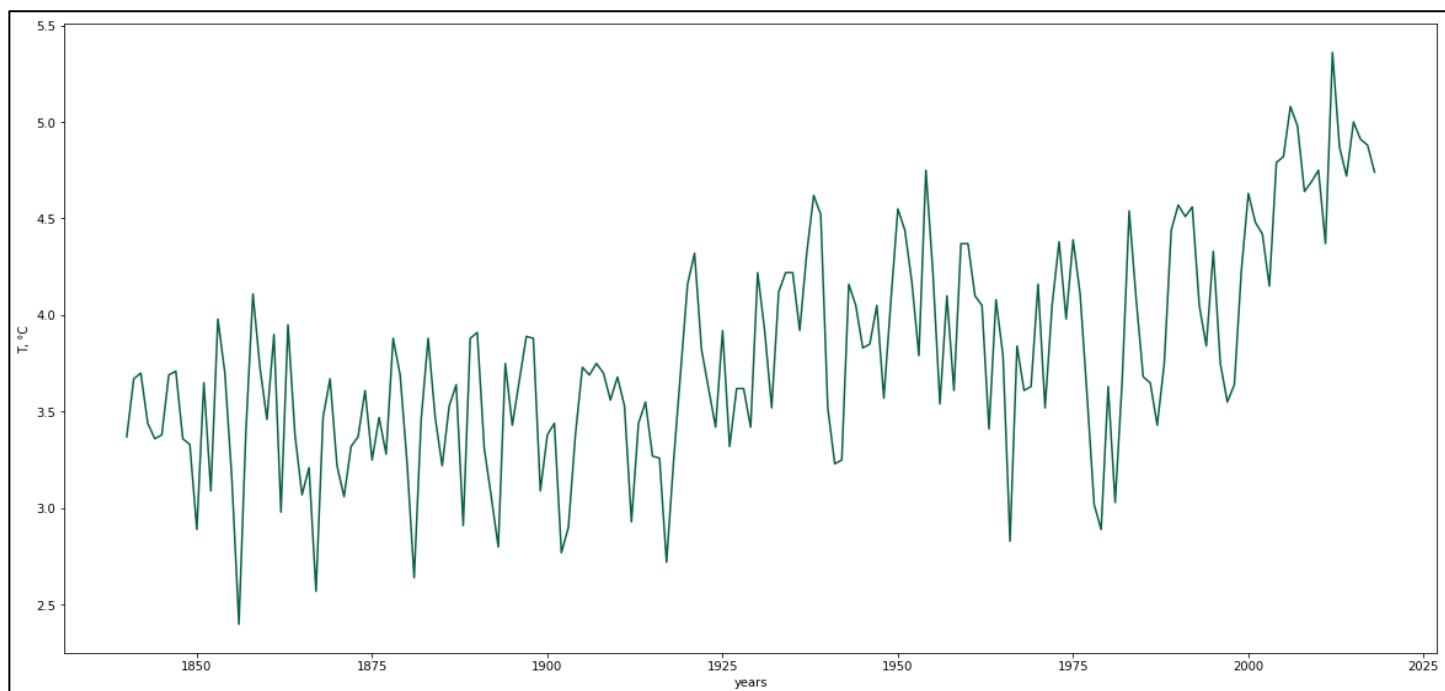


Рис. 1.9. Среднегодовые значения температуры воды на Кольском меридиане за период с 1840 по 2018г.

Хорошо видно, что данный процесс является квазигармоническим и на данном отрезке имеет выраженный положительный тренд (Рис. 1.10):

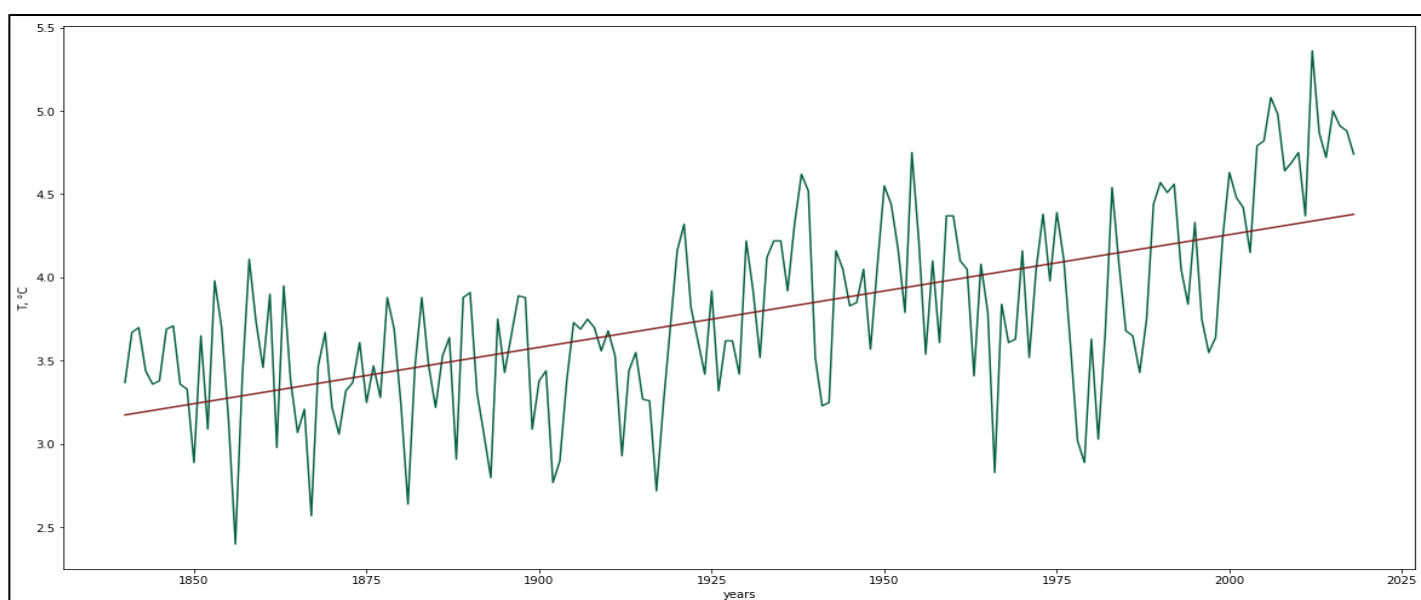


Рис. 1.10. Среднегодовые значения температуры воды на Кольском меридиане за период с 1840 по 2018г, линейный тренд.

Для ряда температуры воды также можно провести спектральный анализ, предварительно удалив тренд (Рис. 1.11.)

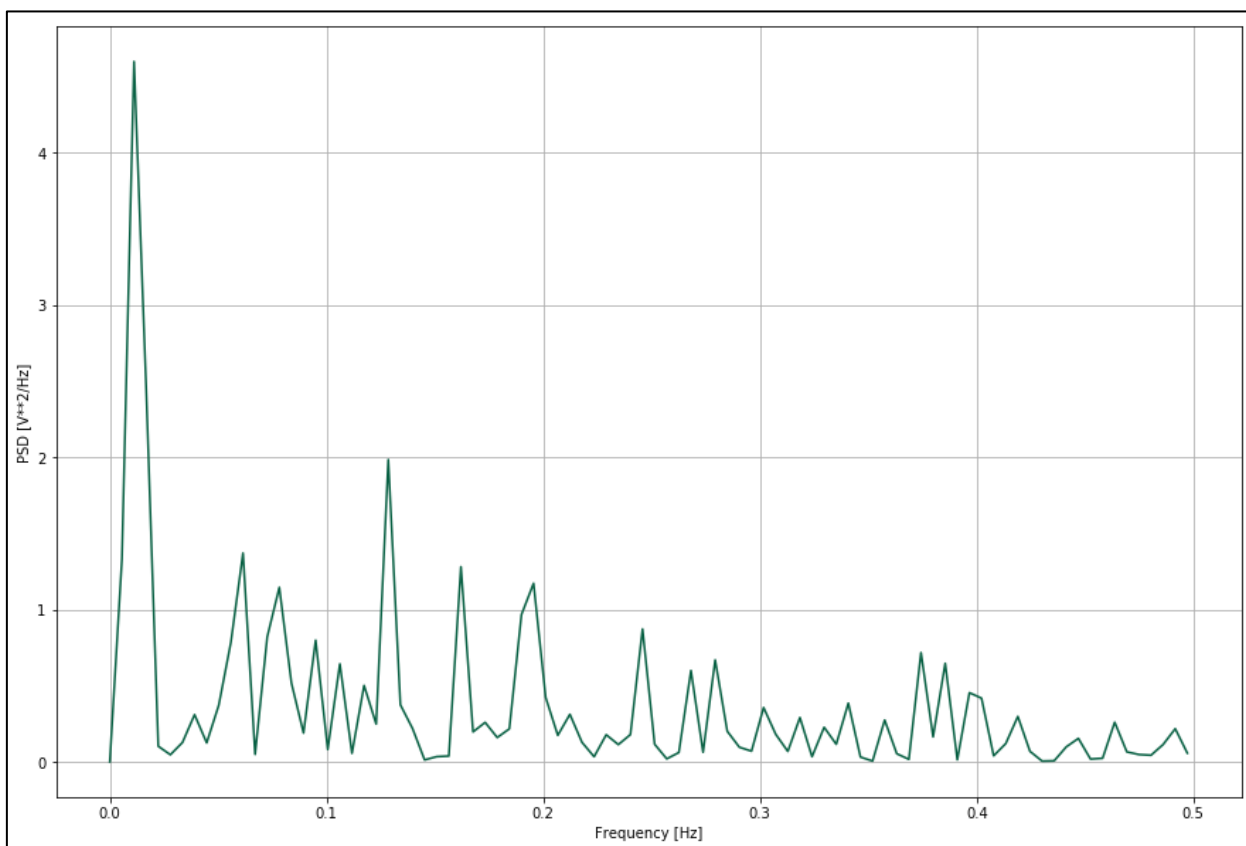


Рис. 1.11. Периодограмма для ряда значений температуры воды

При расчете периода наиболее мощной гармоники (Рис. 1.11), получаем, что большая часть энергии данного ряда описывается гармоникой с периодом 89,5 лет, что означает наличие квазивековой изменчивости.

1.4. Выводы по главе

Подводя итоги обзорной части, можно выделить как положительные, так и отрицательные моменты:

1. Исследования климата ведутся давно, в мире существует множество организаций, занимающихся проблемами климата, изучением климатической обстановки прошлого и прогнозированием климата будущего. Имеющиеся данные позволяют получить приблизительное представление о таких явлениях, как ледниковые периоды или глобальное потепление.

2. Главной невосполнимой проблемой является отсутствие достоверных климатических данных за периоды более 100 - 150 лет, а также разрозненность и отсутствие систематики в имеющихся данных, системного подхода в их обработке и общей гипотезы глобальных климатических изменений. Мы не имеем представления о короткопериодных климатических явлениях прошлых геологических эпох, а те явления, выявить которые представляется возможным, имеют периоды, исчисляемые миллионами лет.

3. К положительным моментам можно также отнести тот факт, что мы имеем данные о многих гидрометеорологических характеристиках за последние 100-150 лет и можем наблюдать, какие климатические изменения происходили в течение прошлого века. Однако с определением вектора развития данных процессов есть существенные трудности, т.к. происходящие явления могут иметь периоды, многократно превышающие длину выборки имеющихся данных, и, например, положительный линейный тренд, который мы видим на графике изменчивости какой-либо характеристики, может быть частью кривой, имеющей большой период.

4. Также можно отметить, что, хотя формулирование гипотез развития климата является важнейшей задачей для прогнозирования климатических явлений в будущем и научно-технический прогресс позволяет нам это делать, проверить состоятельность подобных гипотез физически не

представляется возможным. Можно лишь создавать различные математические модели, что неизменно приведёт к появлению погрешностей.

5. Также стоит упомянуть о том, что благодаря вышеупомянутому научно-техническому прогрессу получение и обработка новых данных о гидрометеорологических процессах стали доступными, однако с развитием человечества в изменчивость климата, который и так является сложнейшей динамической системой, добавился также антропогенный фактор. Он может усложнять имеющиеся климатические модели, вносить дополнительные погрешности и искажать направление вектора развития климатической изменчивости.

6. На основе имеющихся данных можно делать предположения о характере климатической изменчивости. Так, на основе изучения изменчивости некоторых климатических переменных, а именно, значений уровня Каспийского моря, чисел Вольфа и температуры воды на Кольском меридиане, можно сделать вывод о том, что данные процессы могут иметь квазигармонический характер, но вместе с тем не возвращаться неизменно в своё первоначальное состояние, а получать развитие во времени. Такой характер климатических процессов можно условно назвать спиральным и сформулировать гипотезу о том, что все климатические процессы имеют именно такой характер развития.

ЧАСТЬ II. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе обобщены все математические и другие методы, с помощью которых производились расчеты.

В ходе настоящей работы были задействованы следующие методы:

- Расчёт элементарных статистических моментов
- Спектральный анализ (Расчёт автокорреляционной функции и функции спектральной плотности)
- Вейвлет анализ
- Определение типов процессов и выявление особенностей их внутренней структуры
- Выявление закономерностей в изменчивости исследуемых процессов и сопоставление их с общедоступной информацией о климате прошлого
- Оценка возможности использования полученных результатов в целях прогнозирования климата будущего

2.1. Элементарная статистика

Расчёт элементарных статистических величин [9, 10], таких, как среднее, дисперсия ряда, амплитуда колебаний, необходим для получения первичного представления о характере исследуемого процесса.

В данной работе были использованы следующие параметры:

- среднее;
- амплитуда колебаний;
- дисперсия;
- среднеквадратическое отклонение;
- коэффициент асимметрии;
- коэффициент эксцесса.

2.1.1. Среднее

Простая выборочная средняя, или среднее арифметическое значение [11] – показывает положение центра тяжести ряда исходных значений. Рассчитывается как сумма значений ряда, деленная на их общее число:

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} = n^{-1} \sum x_i \quad (2.1)$$

2.1.2. Амплитуда колебаний

Амплитуда колебаний является простейшей характеристикой изменчивости ряда, показывает размах колебаний, т.е. расстояние, на которое отстоят друг от друга минимальное и максимальное значение выборки. Амплитуда дает первичное представление о характере изменчивости ряда:

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (2.2)$$

где X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значение выборки соответственно.

2.1.3. Дисперсия

Одним из наиболее распространенных характеристик изменчивости в исследуемом ряде является дисперсия [11]:

$$D = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.3)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение. Дисперсия имеет размерность квадрата исходной характеристики.

2.1.4. Среднее квадратическое отклонение

Также распространенной характеристикой изменчивости ряда является среднее квадратическое отклонение, рассчитывается как квадратный корень из дисперсии [11]:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.4)$$

Среднее квадратическое отклонение имеет размерность исходной величины.

2.1.5. Коэффициент асимметрии

Коэффициент асимметрии характеризует скошенность, или асимметрию исходного ряда и является безразмерной величиной [11]:

$$As = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \quad (2.5)$$

Если $As = 0$, значения исследуемого ряда распределены симметрично относительно среднего значения. Это значит, что ряд содержит

положительные и отрицательные отклонения от среднего значения и повторяются в нем одинаковое количество раз.

При $As > 0$ в ряде наблюдается положительная асимметрия, т.е. в структуре ряда присутствуют редкие и большие положительные отклонения от среднего значения и более частые, но меньшие по величине отрицательные.

При $As < 0$ в ряде наблюдается отрицательная асимметрия, т.е. в ряде присутствуют редкие и большие отрицательные отклонения от среднего значения и более частые, но меньшие по величине положительные отклонения.

2.1.6. Коэффициент эксцесса

Коэффициент эксцесса характеризует степень крутости кривой распределения:

$$Ex = \frac{1}{n\sigma^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 - 3 \quad (2.6)$$

Величина коэффициента эксцесса показывает, на сколько отклоняется исследуемая кривая от нормальной кривой распределения (Рис 2.1). При этом, если исходная кривая имеет более остроконечную форму по сравнению с нормальной, $Ex > 0$, если более плоскую, то $Ex < 0$.

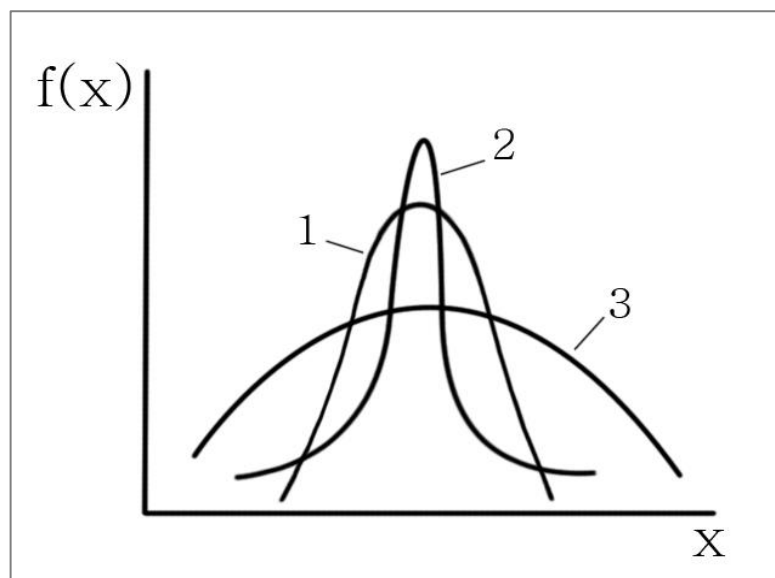


Рис. 2.1. Кривые с различной крутостью. 1 – нормальное распределение, 2 – кривая с положительным эксцессом, 3 – кривая с отрицательным эксцессом.

2.2. Спектральный анализ

Спектральный анализ – метод обработки различных сигналов, позволяющий получить представление о частотном содержании сигнала и выделить в нём наиболее мощные гармоники. В гидрометеорологии используется для выявления во внутренней структуре временных рядов скрытых закономерностей. В основе метода лежит преобразование Фурье и волновое уравнение, показывающее, что любую произвольную функцию $v(x)$ можно представить в виде бесконечной суммы гармоник [12]:

$$v(x) = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kax + B_k \sin kax) \quad (2.7)$$

Иными словами, преобразование Фурье раскладывает исходный сигнал на отдельные гармонические составляющие, рассматривая каждую из которых в отдельности, можно выделять наиболее значимые гармоники и исследовать частотную структуру процесса.

В ходе спектрального анализа необходимо получить функцию, которая показывает, как дисперсия случайного процесса распределена по частотам – эта функция носит название спектральной плотности и ее физический смысл в том, что она описывает плотность дисперсии случайной функции на определенной частоте [13]:

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_{XX}(f) df \quad (2.8)$$

Для этого в исходном ряде переходят к шкале частот и дисперсий, спектральные оценки рассчитываются по автокорреляционной функции с помощью обратного преобразования Фурье (Быстрое преобразование Фурье) или на основе регрессионных оценок [14].

$$S(f) = \frac{2}{m} \left(R_0 + 2 \sum_{i=1}^m R_i * \cos\left(\frac{2\pi f_i}{f_h}\right) + R_m * \cos\left(\frac{2\pi f_i}{f_h}\right) \right) \quad (2.9)$$

Здесь $f = \frac{1}{\tau}$ – частота

$f_h = \frac{1}{2\Delta t}$ – частота Найквиста

R_0, R_i, R_m – параметры АКФ

Прямое преобразование Фурье:

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \omega} dx \quad (2.10)$$

Обратное преобразование Фурье:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) e^{2\pi i x \omega} d\omega \quad (2.11)$$

Оценки АКФ рассчитываются по формуле:

$$R_i = \frac{1}{\sigma_x^2 (N - M) \sum_{j=1}^{N-M} (X_j - \bar{X}) * (X_{i+j} - \bar{X})}, \quad i = 0, \dots, M \quad (2.12)$$

Существует функция, называемая «спектральное окно», которая используется для того чтобы снизить влияние ограниченности длины исходного ряда и максимального сдвига АКФ на оценку спектральной плотности и удаления из неё мелких флуктуаций. Спектральные окна сглаживают оценки автокорреляционной функции и искажают оценки спектральной плотности, однако определение погрешностей представляется затруднительным [10].

$$\text{окно Хемминга: } H_i = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{\pi i}{\tau_0}\right) & i \leq \tau_0 \\ 0 & i > \tau_0 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\text{окно Парзена: } H_i = \begin{cases} 1 - \frac{6\tau^2}{\tau_0\left(1-\frac{i}{\tau}\right)^2} & i \leq \tau_0 \\ 0 & i > \tau_0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Спектр красного шума, а также верхний и нижний доверительные интервалы необходимо рассчитывать для оценки значимости полученных результатов.

Доверительные интервалы:

$$S_0(f) - \frac{x^2}{v} < S(f) < S_0(f) + \frac{x^2}{v} \quad (2.15)$$

$$S_0(f) = \sum_{f=0,01}^{2\pi} \frac{S(f)}{N}; \quad v = \frac{2N - \frac{m}{2}}{m}$$

Красный шум:

$$S(f)_h = \frac{1 - R_1^2}{1 + R_1^2 - 2R_1 \cos(2\pi f)} \quad (2.16)$$

Достоинства метода

- Метод преобразования Фурье позволяет получить информацию о частотном содержании исследуемого сигнала с помощью довольно несложных расчетов.

Недостатки метода

- Преобразование Фурье не является универсальным: оно позволяет получить информацию об исследуемом сигнале в целом, оставляя без внимания локальные особенности.

- Если в сигнале присутствуют скачки, пики или разрывы, это не отразится на результате преобразования.

- Метод не подходит для исследования свойств нестационарного сигнала, частотные характеристики которого меняются с течением времени.

- Метод показывает наличие каких-л частот в сигнале без привязки к временной координате, т.е. мы не можем сказать, присутствуют эти частоты в нем одновременно или, например, последовательно.

- Существуют трудности в интерпретации результатов преобразования Фурье, в некоторых случаях полученные результаты можно интерпретировать неоднозначно.

2.3. Вейвлет-анализ

Вейвлет-анализ применяется для обработки различных сигналов сравнительно недавно. Это метод анализа одномерного сигнала, при котором происходит разложение этого сигнала по базису, представляющему собой солитоноподобную функцию (вейвлет) при помощи масштабирования и переносов. Каждая его функция характеризует определенную пространственную частоту и её положение в пространстве. В результате вейвлет-анализ позволяет получить двумерную карту сигнала, на которой его свойства отображаются одновременно в частотном и физическом виде, в отличие от преобразования Фурье. Частота и физическая координата являются при этом независимыми переменными. Таким образом, мы можем видеть частотную структуру исследуемого процесса на всём его протяжении.

2.3.1. Вейвлет-преобразование

Рассмотрим пространство $L^2(\mathbb{R})$, для создания базиса которого необходимо подобрать простые функции [15].

Локальное среднее каждой функции $f(t)$, пространства $L^2(\mathbb{R})$, определенной на всей оси \mathbb{R} и обладающие конечной энергией

$$E_f = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (2.17)$$

должно стремиться к нулю, функция должна быть локализована во времени и пространстве. Синусоидальные волны не могут быть базисом данного пространства, но для этой цели подходят вейвлеты – маленькие солитоноподобные волны. С помощью одного вейвлета $\psi(t)$ конструируется функциональное пространство $L^2(\mathbb{R})$.

Далее с помощью этой функции необходимо покрыть целиком ось $\mathbb{R}(-\infty, \infty)$, это делается с помощью системы сдвигов по оси \mathbb{R} :

$$\psi(t - k)$$

Частоту запишем со степенью двойки:

$$\psi(2^j t - k)$$

j, k – целые числа.

Таким образом, с помощью одного вейвлета $\psi(t)$ представляется возможным описать частотную структуру исследуемого процесса на протяжении всей оси.

Если определение нормы:

$$\|p\|_2 = \langle p, p \rangle^{1/2},$$

$$\langle p, q \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} p(t)q^*(t)dt$$

(* - оператор комплексного сопряжения), то

$$\|\psi(2^j t - k)\|_2 = 2^{j/2} \|\psi(t)\|_2$$

Следовательно, все вейвлеты $\{\psi_{jk}\}$ вида

$$\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad j, k \in I \tag{2.18}$$

нормированы на единицу, т.е. $\|\psi_{jk}\|_2 = \|\psi\|_2 = 1$.

Если семейство вейвлетов $\{\psi_{jk}\}$, определенное соотношением (2.10), является ортонормированным базисом функционального пространства $L^2(\mathbb{R})$, вейвлет $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ является ортогональным:

$$\langle \psi_{jk}, \psi_{lm} \rangle = \delta_{jl} \delta_{km}$$

при этом каждая функция $f \in L^2(\mathbb{R})$ может быть представлена в виде ряда (2.11), который сходится в $L^2(\mathbb{R})$ (2.12):

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \psi_{jk}(t) \quad (2.19)$$

$$\lim_{M_1, N_1, M_2, N_2 \rightarrow \infty} \left\| f - \sum_{-M_2}^{N_2} \sum_{-M_1}^{N_1} c_{jk} \psi_{jk} \right\|_2 = 0 \quad (2.20)$$

Теперь можно сконструировать базис функционального пространства $L^2(\mathbb{R})$ с помощью переносов вейвлета $\psi(t)$. Базисные параметры при этом:

α – масштабный коэффициент

τ – параметр сдвига

$$\psi_{\alpha, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t - \tau}{\alpha}\right), \quad \alpha, \tau \in \mathbb{R}, \quad \psi \in L^2(\mathbb{R}) \quad (2.21)$$

Тогда интегральное вейвлет-преобразование:

$$[W_{\psi} f](\alpha, \tau) = |\alpha|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t - \tau}{\alpha}\right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{\alpha, \tau}^*(t) dt \quad (2.22)$$

Таким образом, функции $f \in L^2(\mathbb{R})$ могут быть получены с помощью преобразований масштаба и сдвигов базисного вейвлета и являются композицией вейвлетных волн, при этом коэффициенты преобразования зависят от номера волны и параметра сдвига.

Вейвлет-преобразования подразделяются на дискретное (DWT) и непрерывное (CWT). Дискретное вейвлет-преобразование применяется в тех случаях, когда необходимо свести к минимуму количество коэффициентов вейвлет-преобразования и иметь точную формулу обратного преобразования.

При анализе сигналов, в частности, в данной работе, используется чаще непрерывное преобразование. Оно представляется более удобным, т.к. позволяет более четко репрезентировать информацию о данном сигнале.

$W(\alpha, \tau)$ – коэффициенты вейвлет-преобразования, содержащие информацию о сигнале и об анализирующем сигнале, т.к. вейвлет-преобразование является скалярным произведением анализирующего вейвлета при заданном масштабе и анализируемого сигнала.

2.3.2. Виды вейвлетов

Выбор анализирующего вейвлета определяется особенностями потребностей анализа. Вейвлеты различаются по своим временным и частотным особенностям, с помощью разных вейвлетов можно решать разные задачи и подчеркивать разные особенности анализируемого сигнала [15].

Функция Гаусса, на основе производной которой конструируются вещественные базисы:

$$\psi_m(t) = (-1)^m \partial_t^m \left[\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right] \quad (2.23)$$

$$\hat{\psi}_m(k) = m(ik)^m \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right) \quad (2.24)$$

$$\partial_t^m, m \geq 1$$

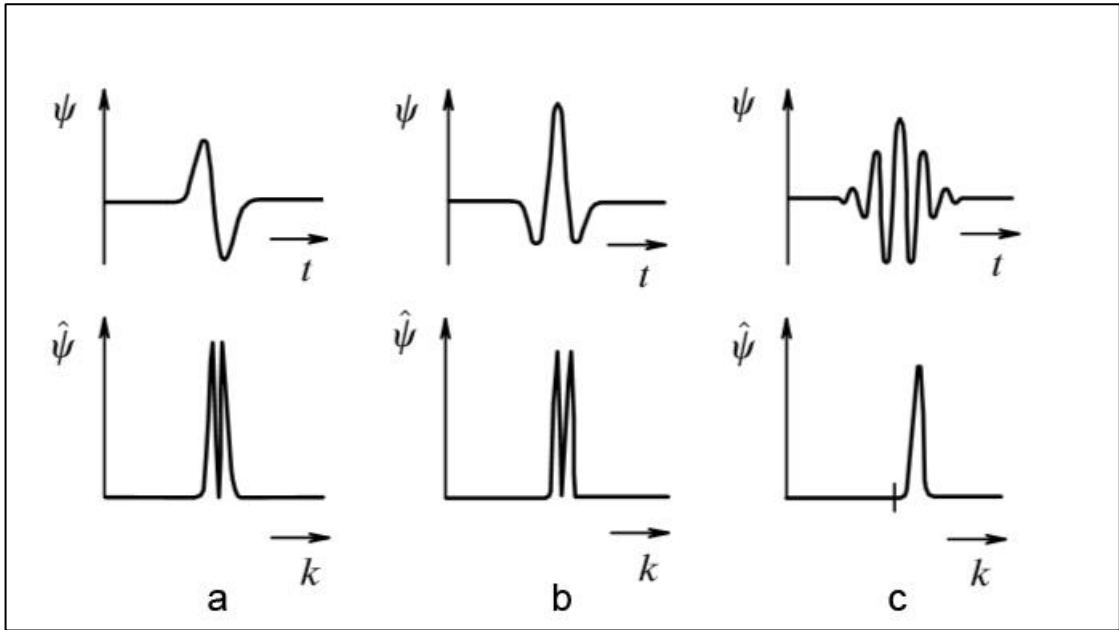


Рис. 2.2. Примеры вейвлетов

На рис. 2.2 представлены три из наиболее часто использующихся вейвлетов. Первые два из них (a, b) получены при $m = 1$ и $m = 2$:

a – WAVE-вейвлет

b – МНАТ-вейвлет (Mexican hat, мексиканская шляпа, назван так из-за формы, напоминающей шляпу) используется для анализа сложных сигналов, в том числе, изотропных полей, имеет узкий энергетический спектр.

c – вейвлет Morlet - комплексный вейвлет, хорошо локализован в k и r пространстве:

$$\psi(r) = \exp(ik_0r) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (2.25)$$

$$\hat{\psi}(k) = \theta(k) \exp\left[-\frac{(k - k_0)^2}{2}\right] \quad (2.26)$$

Вейвлет Морле наиболее часто используется, на рис. 2.2(c) представлен при $k_0 = 6$. В данной работе при анализе данных был использован именно Morlet вейвлет (рис. 2.3):

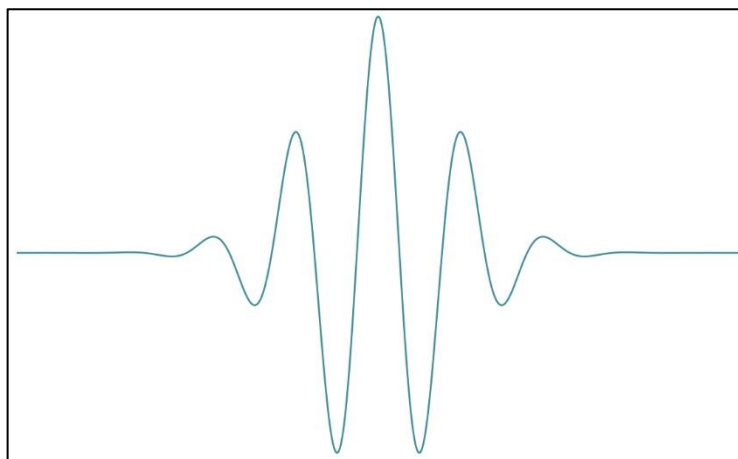


Рис. 2.3. Вейвлет Morlet

2.3.3. Интерпретация результатов

Вейвлет-преобразование позволяет получить двумерные массивы значений коэффициентов преобразования $W(\alpha, \tau)$. По распределению этих значений в пространстве можно понять, каков вклад компонент различных частот в общую дисперсию исследуемого ряда. Это распределение несет название спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, или вейвлет-спектром.

Существуют различные способы визуализации вейвлет-спектра. Часто его представляют в виде двумерной карты с изолиниями, которая позволяет проследить изменчивость амплитуд вейвлет-преобразования на разных временных отрезках исследуемого ряда и на разных масштабах.

На рис. 2.4 представлен временной ход ряда значений содержания дейтерия δD с 997 по 1997 год (рис. 2.4, а), сопоставленный с картой коэффициентов его вейвлет-преобразования (рис. 2.4, б). Карта построена в программе PAST.

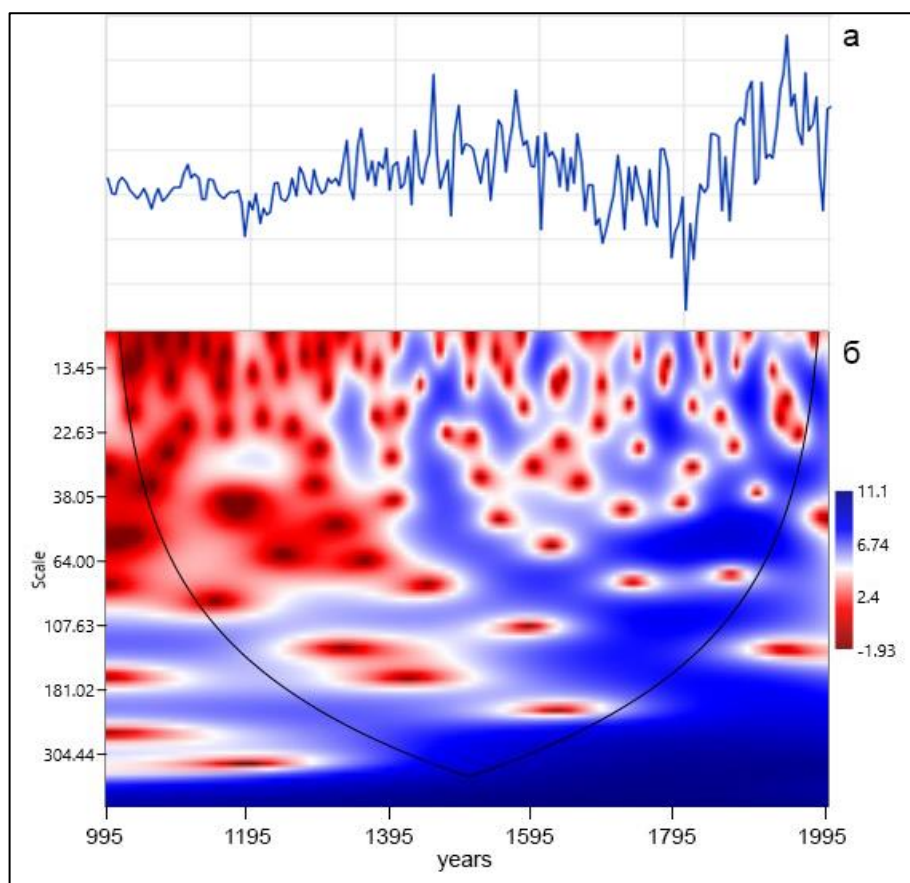


Рис. 2.4. Временной ход исследуемого ряда (а), карта распределения коэффициентов вейвлет-преобразования (б).

На рис. 2.4(б) синие области соответствуют положительным значениям коэффициентов вейвлет-преобразования, а красные – отрицательным. Например, внизу карты мы видим большое синее пятно, которое показывает наличие долгопериодной компоненты в этом отрезке времени. По оси абсцисс отложен параметр масштаба α , по оси ординат – время (τ).

Значение коэффициента (амплитуды) вейвлет-преобразования в точке (α_0, τ_0) тем больше, чем более четко совпадают в этой точке анализирующий вейвлет данного масштаба и поведение исследуемого ряда. На рис. 2.4 (б) видно, что во внутренней структуре анализируемого процесса присутствуют компоненты разных частот.

Таким образом, вейвлет-преобразование раскладывает исходный ряд на компоненты различных частот, давая возможность рассматривать каждую

из них по отдельности. Результатом вейвлет-преобразования является двумерная карта, содержащая значения коэффициентов вейвлет-преобразования, с помощью которых можно выделять компоненты с различными частотами во внутренней структуре исследуемого процесса. Этот метод позволяет наиболее пристально изучать частотное содержание исследуемого сигнала и выявлять скрытые закономерности в его внутренней структуре.

Достоинства метода:

- Вейвлет-анализ показывает наличие различных частот в сигнале, соотнесенных с временной координатой, что очень важно, когда существует необходимость не только выявить наличие наиболее мощных гармоник во внутренней структуре исследуемого сигнала, но и отследить их положение во времени.
- В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование подходит для исследования свойств нестационарного сигнала, частотные характеристики которого меняются с течением времени.
- Вейвлет-анализ хорошо подходит для изучения локальных особенностей исследуемого сигнала.
- Вейвлет-преобразование удобно для процессов с перемежаемостью.
- Метод сохраняет хорошее разрешение на разных масштабах.
- Вейвлет-анализ хорошо подходит для обработки коротких высокочастотных сигналов.

Недостатки метода:

- Метод использует довольно сложные статистические расчеты

2.4. Выводы по главе

Подводя итоги данной главы, можно сказать, что с исходными данными в данной производятся следующие действия:

1. Техническая подготовка исходных данных к анализу: приведение данных к удобному формату, визуальная оценка имеющихся рядов, удаление пустых ячеек и т.д.

2. Расчет элементарных статистических параметров, сведение результатов в общую таблицу, оценка этих результатов для каждого исходного ряда данных.

3. Построение временной изменчивости каждого ряда данных, нанесение тренда, визуальная оценка полученных графиков, выделение максимумов и минимумов значений, выявление общих тенденций, наличия аномалий, пиков, разрывов и т.д., сопоставление выявленных событий в каждом из исследуемых рядов с дополнительными данными и друг с другом, поиск закономерностей.

4. Спектральный анализ. Расчет спектра для каждого из исследуемых рядов в программе PAST. Выявление во внутренней структуре рядов гармоник, вносящих наибольший вклад в их общую изменчивость. Построение периодограмм для каждого ряда, расчет значений частот и периодов для этих гармоник. Составление сводной таблицы, содержащей по 4 таких гармоники для каждого ряда и значения их периодов. Анализ полученных результатов, поиск закономерностей, сопоставление полученных результатов для каждого ряда друг с другом.

5. Вейвлет-анализ. Построение в программе PAST карт коэффициентов вейвлет-преобразования, анализ особенностей внутренней структуры исследуемых рядов, выявление в ней наиболее значимых компонент и их положения во временной структуре рядов. Сопоставление полученных результатов с общедоступной информацией о климате прошлого

б. Подведение итогов. Оценка возможности использования полученных результатов в целях прогнозирования климата будущего.

Таким образом, в данной работе используются как общепринятые стандартные методы статистического анализа данных, такие, как расчет элементарных статистических моментов, так и менее распространенные, такие, как вейвлет-анализ, который начали широко использовать наряду с другими статистическими методами сравнительно недавно.

Для целей и задач, поставленных в данной работе, вейвлет-анализ подходит очень хорошо и позволяет более детально рассмотреть исследуемые данные с точки зрения их частотного содержания. Этот метод является универсальным средством для изучения внутренней структуры гидрометеорологических рядов данных.

ЧАСТЬ III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ

В качестве исходных в данной работе были использованы геохимические данные из кернов, взятых на леднике Восточный Ронгбук, Гималаи, Южная Азия, гора Эверест, 2002 год, за период 997 – 1997г., осредненные за 5 лет [3], данные о тропических осадках за последние 2000 лет, с 2000г. в.р (50 лет до н.э.) по -50г. в.р (2000 год), осредненные за 10 лет [4], а также данные о температуре за последние 2000 лет, с 5 по 1995 г., осредненные за 10 лет [5].

Были проведены расчеты элементарных статистических моментов, а также спектральный и вейвлет-анализ.

3.1. Элементарная статистика

В начале статистических исследований необходимо рассчитать первичные статистические моменты и построить временной ход для имеющихся данных для того чтобы составить общее представление об исследуемых процессах. В данной работе были использованы следующие параметры:

- среднее значение;
- дисперсия;
- среднеквадратическое отклонение.
- амплитуда колебаний;
- коэффициент асимметрии;
- коэффициент эксцесса;

Расчеты производились в программе PAST и Excel. Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Первичные статистические моменты

	среднее	дисперсия	среднеквадратическое отклонение	амплитуда колебаний	коэффициент асимметрии	коэффициент эксцесса
Ca	131,71	9235,87	96,10	665,6	3,19	13,53
Cl	22,12	637,05	25,24	161,5	3,88	16,34
δD	-135,03	73,06	8,55	61,4	0,470	1,30
T	-0,482	92,79	9,63	2,3	-14,14	200,33
Prec	0,032	0,099	0,315	1,6	-0,612	0,426

Также в программе Python 3.6 были построены графики временного хода исследуемых данных.

Как видно по таблице 3.1, имеющиеся ряды данных сильно различаются по своим статистическим свойствам. Кроме того, они имеют различные интервалы осреднения.

3.2. Анализ внутренней структуры исследуемых рядов

После расчета элементарных статистических моментов и получения первичного представления о характере изменчивости имеющихся рядов необходимо более детально рассмотреть свойства внутренней структуры исследуемых процессов. В программе Python 3.6 были построены графики временного хода исследуемых данных с линейными трендами и рассчитаны спектры. Также в программе PAST были построены карты коэффициентов вейвлет-преобразования для всех рядов с постоянным шагом по времени.

Спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье, позволяет выявить во внутренней структуре исследуемых процессов наличие частот, наиболее полно описывающих общую дисперсию ряда, или наиболее мощных гармоник. В данной работе были взяты 4 гармоники для каждого ряда, в порядке уменьшения их вклада в общую изменчивость. Значения таких частот для всех исследуемых рядов сведены в таблицу 3.2, которая представлена в конце раздела.

Однако для изучения внутренней структуры интересующих нас процессов результатов одного спектрального анализа, при всем его удобстве, недостаточно, так как он показывает наличие определенных частот во внутренней структуре ряда, но не дает информации о том, каким образом эти частоты распределены во времени. При исследовании же гидрометеорологических рядов и прогнозировании климатической обстановки будущего именно эта информация представляется наиболее важной.

Для того чтобы учитывать также распределение наиболее мощных гармоник в временной структуре исследуемых рядов, в данной работе был использован вейвлет-анализ.

3.2.1. Свойства внутренней структуры ряда содержания кальция

По исходным данным был построен временной ход содержания кальция, мкг/л, с 997 по 1997 год (Рис. 3.1), данные осреднены за пять лет.

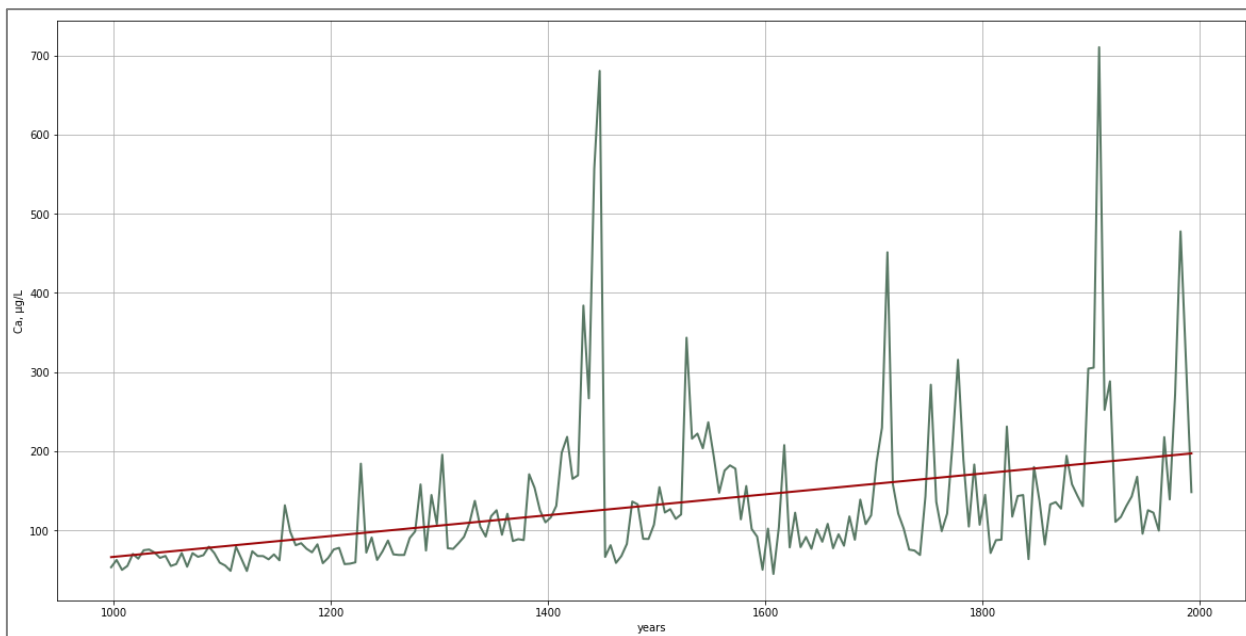


Рис. 3.1. Временной ход значений содержания кальция

Как видно на рис. 3.1, во временном ходе содержания кальция наблюдается положительный тренд, максимумы значений приходились на 1907 г. (710,3 мкг/л), 1447 г. (680,4 мкг/л), 1982 г. (477,6 мкг/л), 1712 г. (451,18 мкг/л), 1527 г. (343,3 мкг/л). Максимум в 1447 году совпал с извержением вулкана Кувае в 1452 году, история вулканической активности за последнее тысячелетие представлена на рис. 3.19. Поскольку данные осреднены за 5 лет, следует считать извержение причиной резкого повышения содержания кальция.

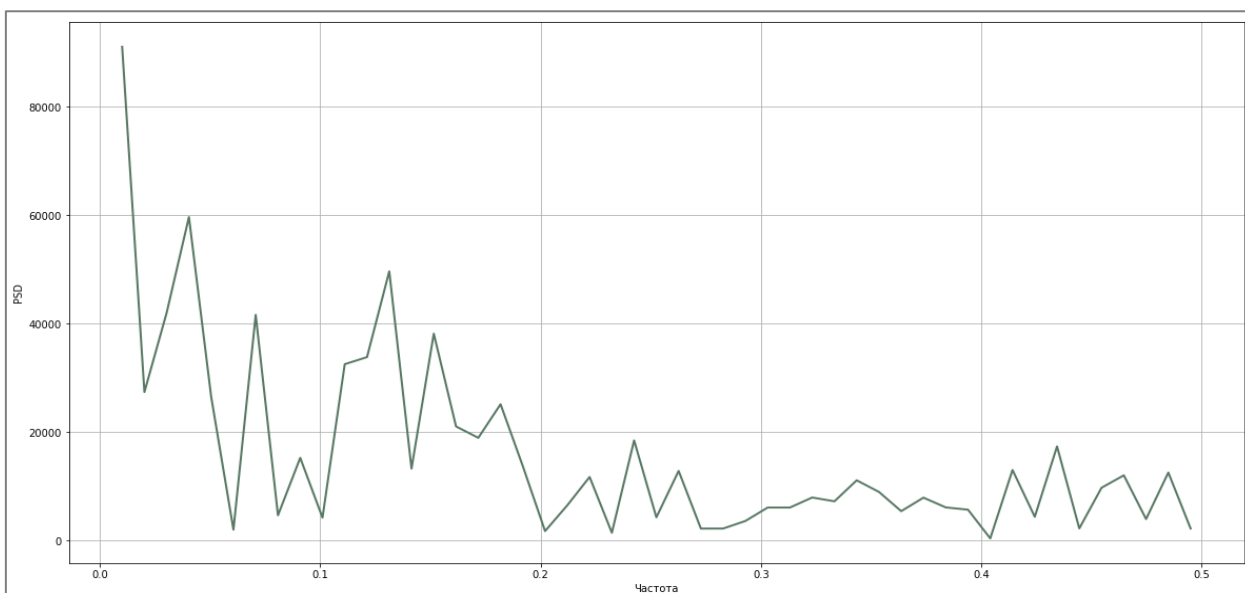


Рис. 3.2. Периодограмма для ряда содержания кальция

Спектральный анализ этого ряда показал, что наиболее мощная гармоника имеет период 91 год (Рис. 3.2, таблица 1), однако ее вклад в общую дисперсию не одинаков на протяжении исследуемого периода, начинается приблизительно с 1800 года, также как и гармоники с периодом 66,5 лет (Рис. 3.3). Также в ряде присутствует долгопериодная компонента с периодом 500 лет, ее вклад в дисперсию общего ряда незначительно меняется в течение исследуемого периода.

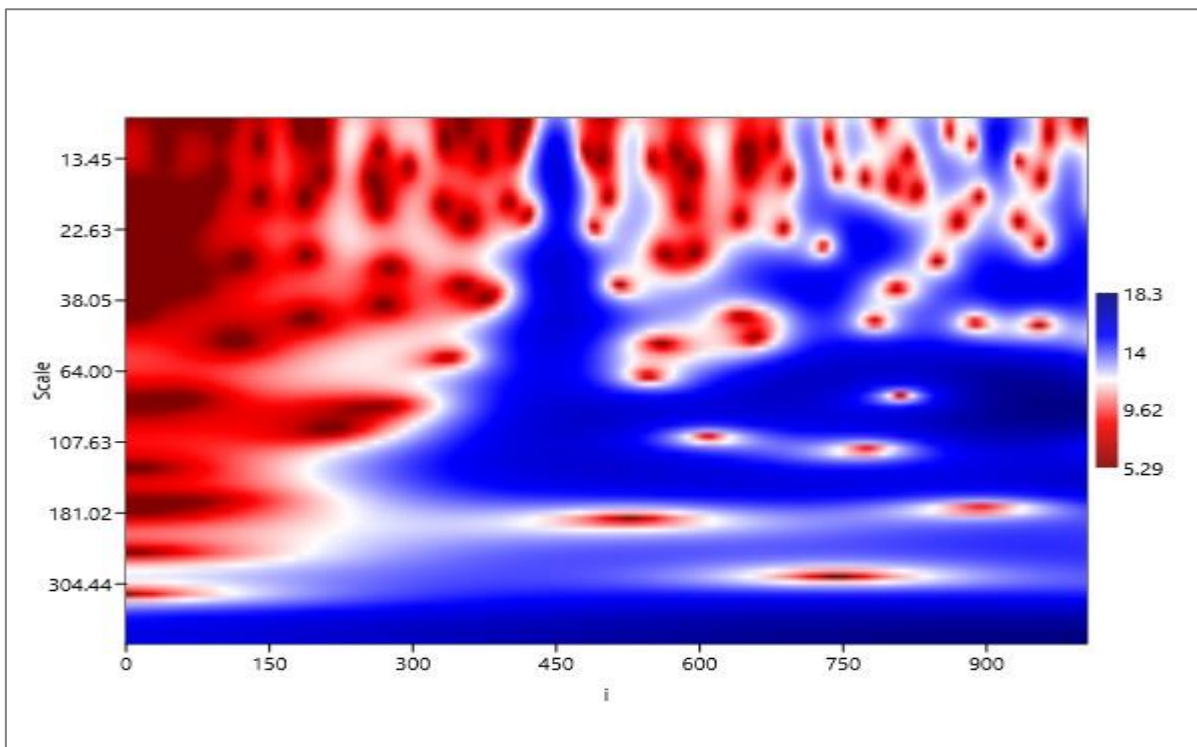


Рис. 3.3. Карта коэффициентов вейвлет-преобразования для кальция

3.2.2. Свойства внутренней структуры ряда содержания дейтерия

По исходным данным был построен временной ход содержания дейтерия, δD , с 997 по 1997 год (Рис. 3.4), данные осреднены за пять лет.

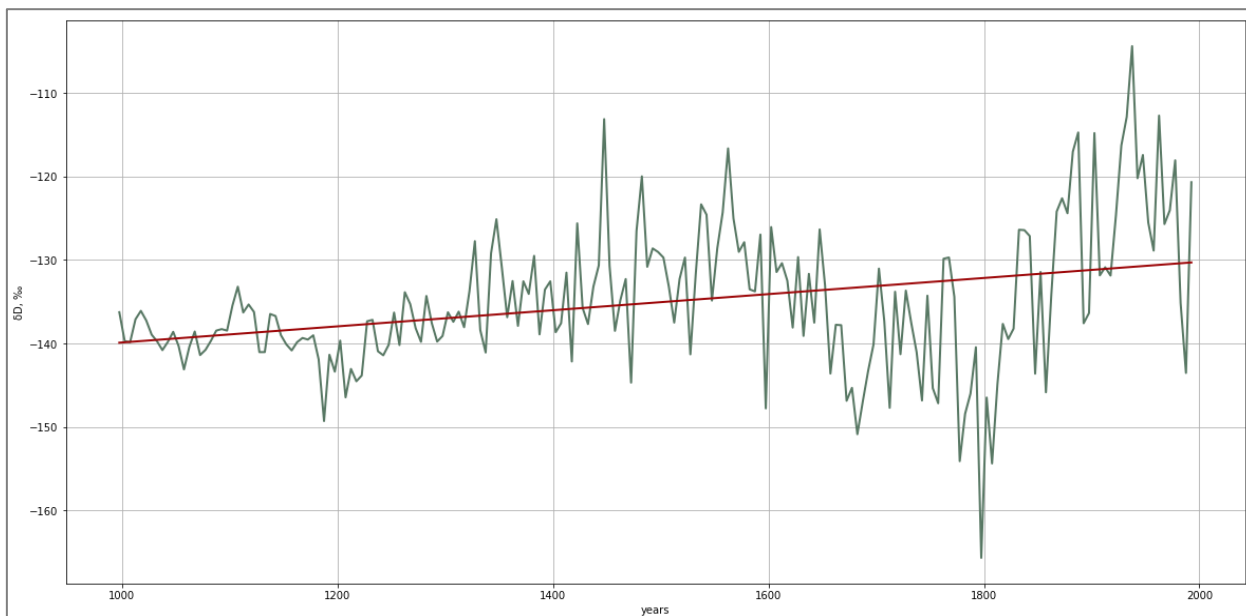


Рис. 3.4. Временной ход значений содержания дейтерия, δD

Для наглядности значения содержания дейтерия δD были переведены в ppm по формуле:

$$\text{conc}^2H[\text{ppm}] = \frac{(1000 + \delta^2H)}{6,420135} \quad (3.1)$$

По рассчитанным значениям содержания дейтерия также был построен график (Рис. 3.5):

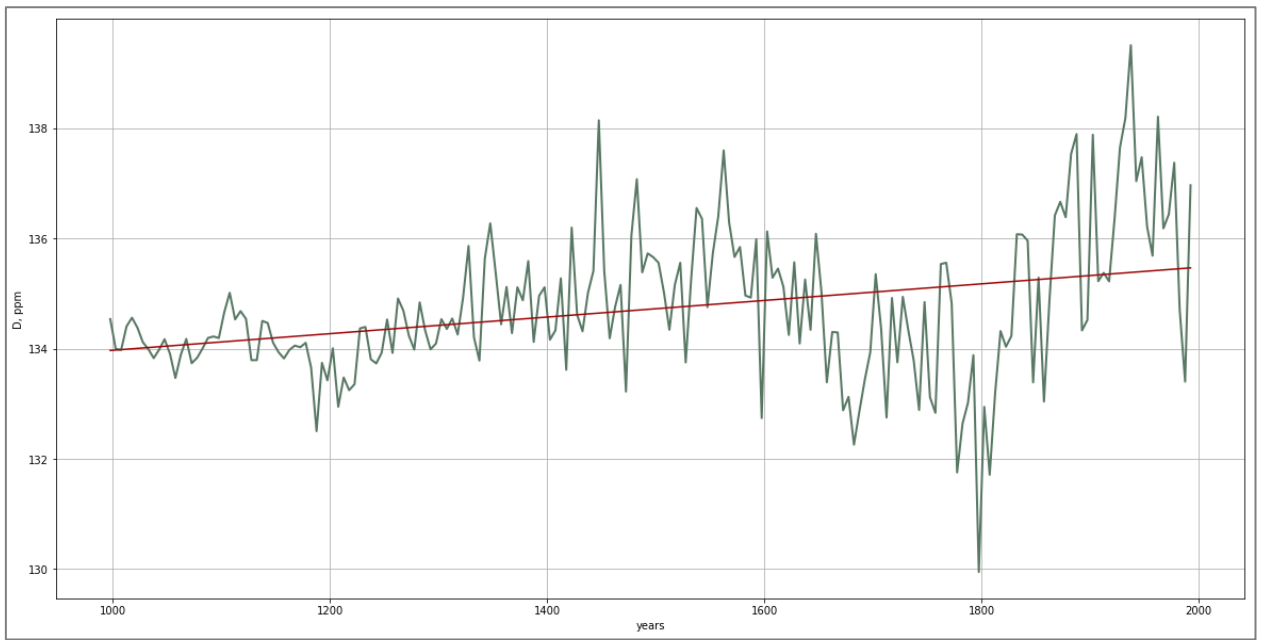


Рис. 3.5. Временной ход значений содержания дейтерия, ppm

Как видно на рис. 3.5, во временном ходе содержания дейтерия наблюдается положительный тренд, максимумы значений приходились на 1937 г. (139,5 ppm), 1447 г. (138,1 ppm) – в тот же год, что и у одного из максимумов содержания кальция, 1562 г. (137,6 ppm). Минимальное значение наблюдалось в 1797 г. (129,9 ppm)

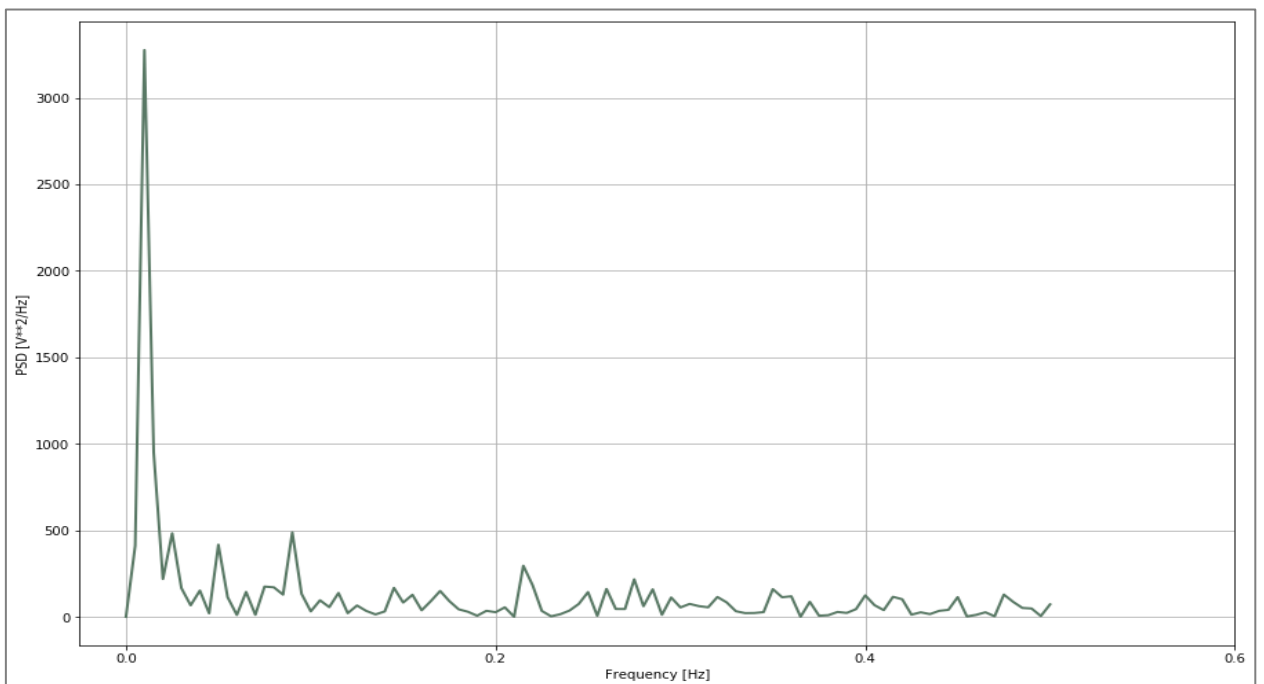


Рис. 3.6. Периодограмма для ряда содержания дейтерия

Спектральный анализ показал, что наиболее мощная гармоника имеет период 500 лет (Рис. 3.6, Таблица 3.2).

В изменчивости содержания кальция и дейтерия наблюдаются похожие события, а именно, возрастание значений с начала 1400-х годов (у кальция очень резкое, у дейтерия более плавное), далее через 100 лет ещё один локальный максимум (1527г. для кальция, 1562г. для дейтерия), а также рост значений концентрации с 1900-х годов и максимумы значений в 1907 г. у кальция и в 1937 г. у дейтерия.

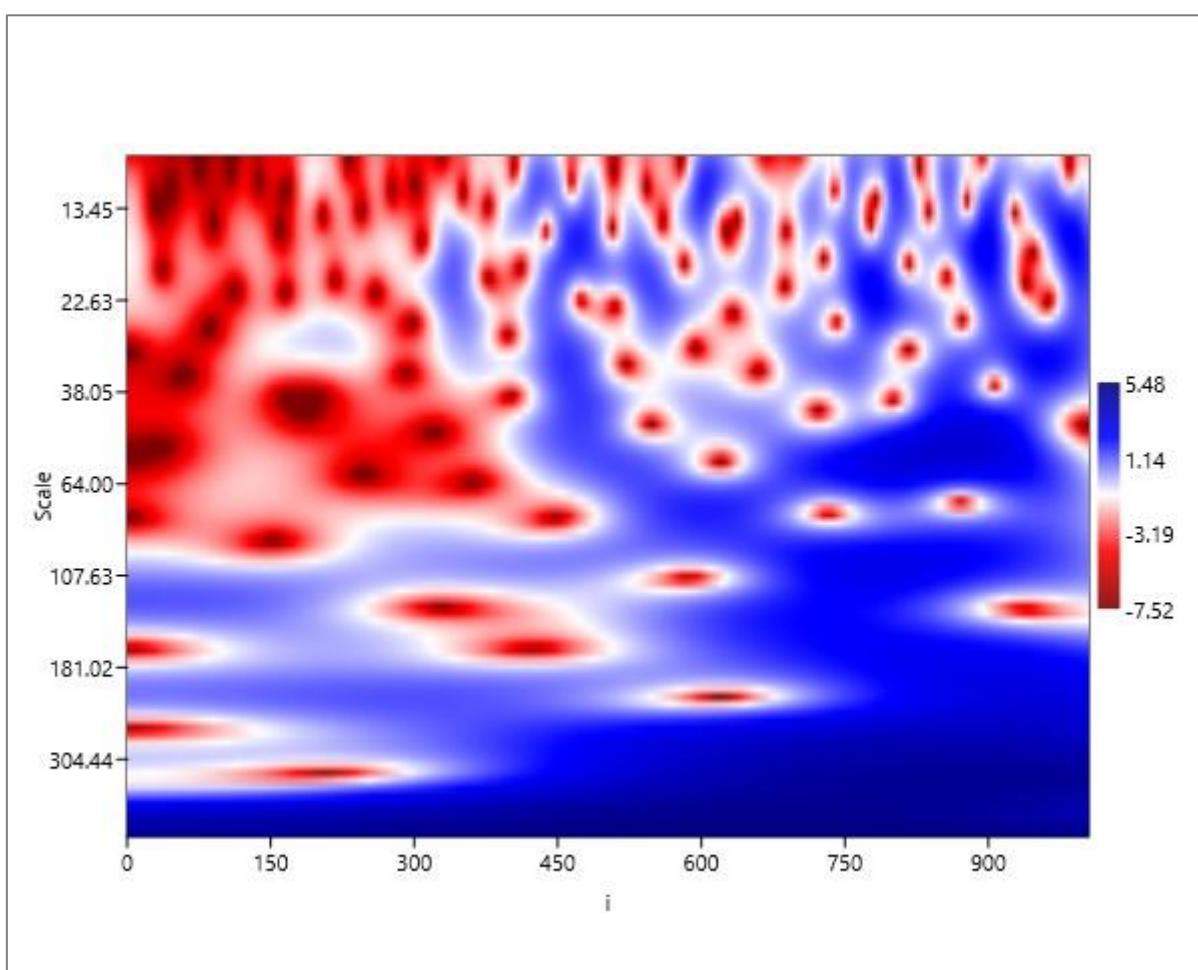


Рис. 3.7. Карта коэффициентов вейвлет-преобразования для дейтерия

Изменения содержание дейтерия отражают изменения температуры, т.к. так известно, для того чтобы испарить молекулы, содержащие тяжелые изотопы, необходимо затратить большее количество энергии. На рис. 1.2.б видно, что понижение содержания дейтерия в начале 1400-х годов совпадает с

понижением температуры. В это время происходил так называемый малый ледниковый период (XIV – XV в.)

Вейвлет-анализ (Рис. 3.7) показал, что вклад 500-летней гармонике в общую дисперсию ряда не одинаков на протяжении исследуемого периода (Рис. 1.2.в). Так, примерно с 1000 по 1400г она была выражена лучше. Также в ряде присутствует гармоника с периодом 333 года, ее вклад в общую изменчивость максимален в период с 1500 по 2000 год, также наблюдается полувековая составляющая, с 1750 по 1950г.

В ряде значений содержания дейтерия так же, как и в ряде значений кальция, присутствует локальный максимум в 1447 году. Можно предположить, что резкое возрастание значений содержания этих элементов связано с вулканической активностью, в частности, вызвано извержением вулкана Куаве в 1452 году (Рис. 3.19).

3.2.3. Свойства внутренней структуры ряда содержания хлора

По исходным данным был построен временной ход содержания хлора, мкг/л, с 997 по 1997 год (Рис. 3.8), данные осреднены за пять лет. В данных имеется ряд значений содержания свободного хлора и морского хлора, но, так как различия во внутренней структуре этих рядов незначительны, спектральный и вейвлет-анализ были проведены для первого ряда.

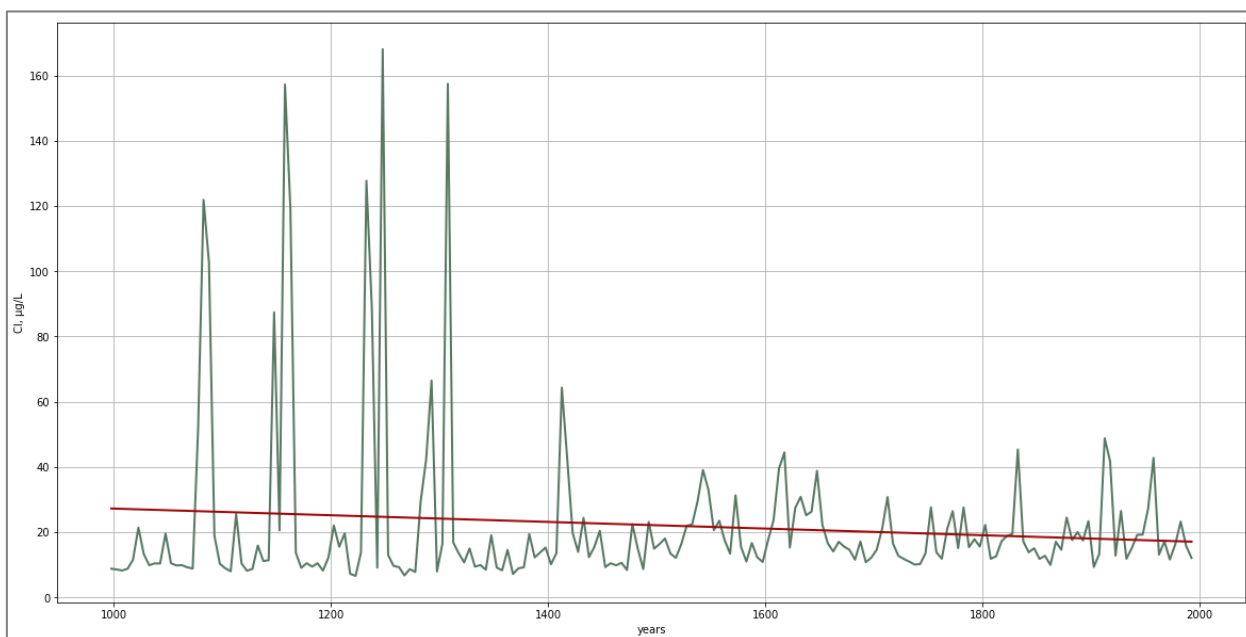


Рис. 3.8. Временной ход значений содержания хлора

Во временном ходе содержания хлора (Рис. 3.8) наблюдается отрицательный тренд, максимумы значений приходились на 1247г. (168 мкг/л), 1307 г. (157,5 мкг/л), 1157г. (157,3 мкг/л), 1082 г. (121,9 мкг/л), 1412 г. (64,3 мкг/л), 1912 г. (48,8 мкг/л), 1832 г. (45,3 мкг/л), 1617 г. (44,4 мкг/л), 1957 г. (42,8 мкг/л).

Минимальное значение наблюдалось в 1222 году (6,56 ppm)

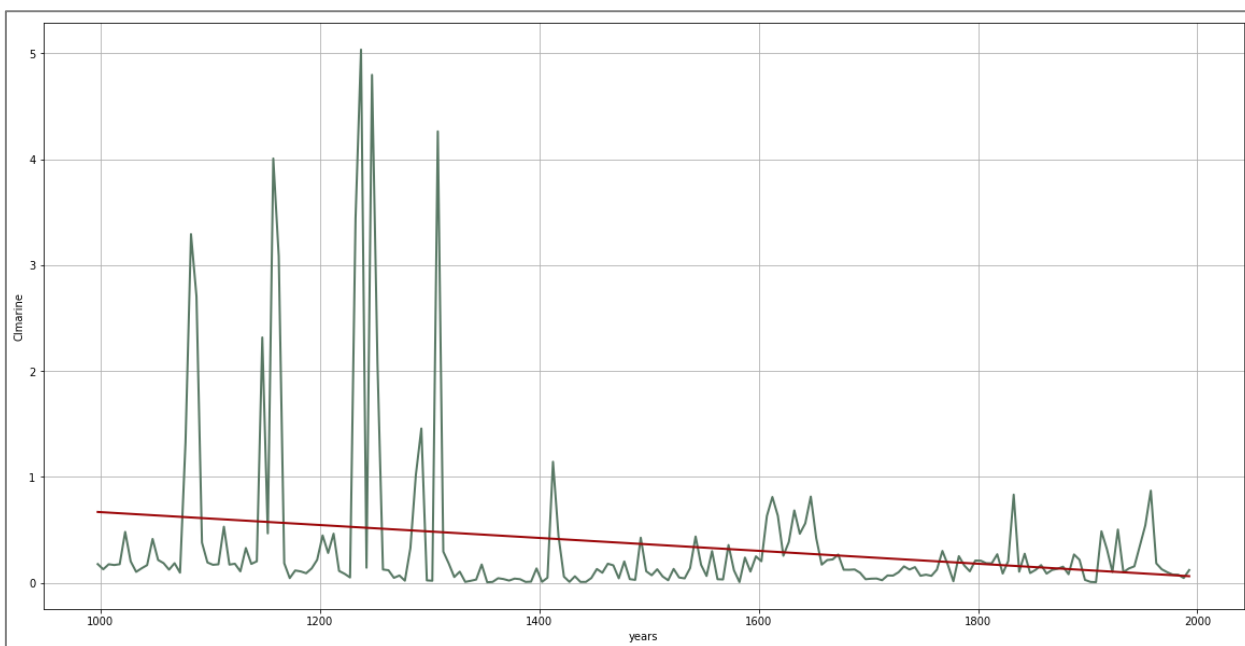


Рис. 3.9. Временной ход значений содержания морского хлора

Как видно на графиках (Рис. 3.8 и 3.9), в среднем значения содержания хлора снизились с 1000 по 2000 г. Максимальные значения приходятся на период с 1050 по 1300г. Далее значения максимумов содержания хлора в среднем в 3 раза меньше. Один из локальных максимумов пришелся на первую половину 1400-х, как и в случае с временным ходом кальция и дейтерия.

Хлор в свободном состоянии встречается в вулканических газах, и появление абсолютного максимума значений в 1247 году и следующего за ним локального максимума в 1307 году также могут быть связаны с вулканической активностью (Рис. 3.19) и извержением вулкана в 1259 году.

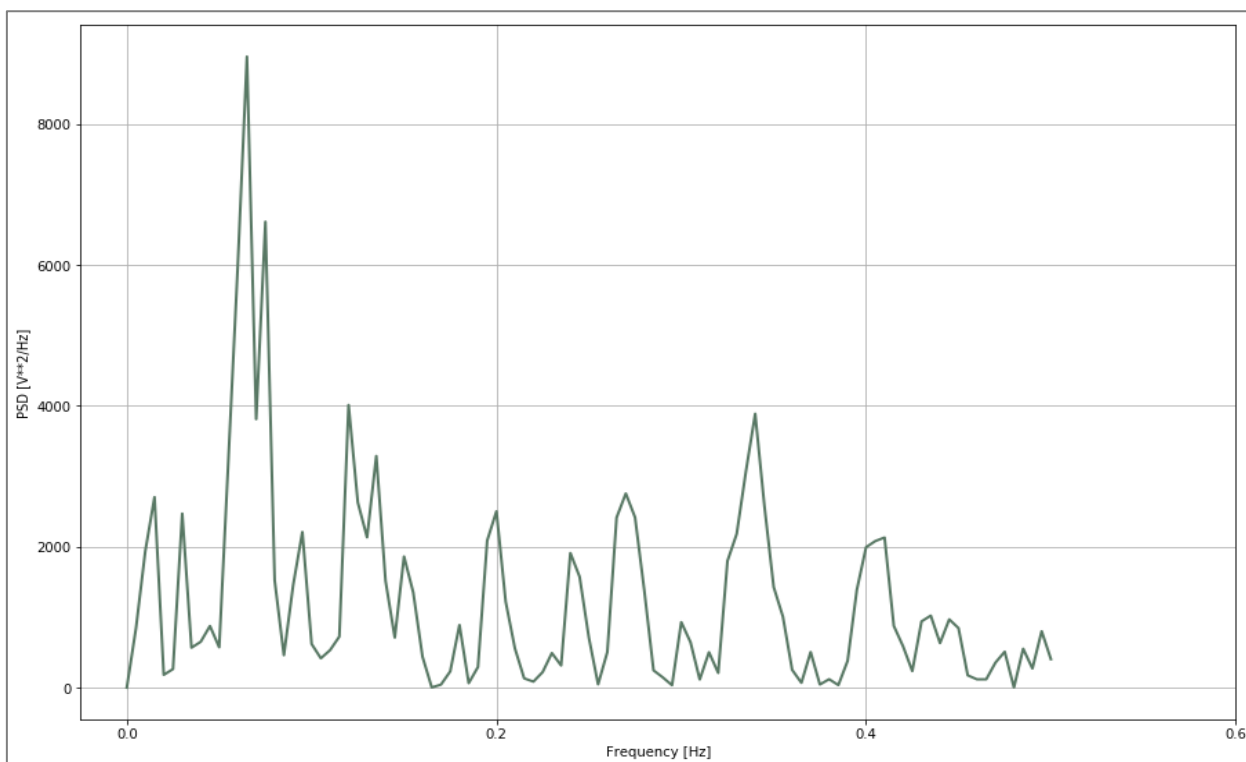


Рис. 3.10. Периодограмма для ряда содержания хлора

Спектральный анализ показал, что наиболее мощная гармоника имеет период 77 лет (Рис. 3.10, таблица 3.2). Как видно по таблице 3.2, ряд значений содержания хлора – единственный ряд из всех имеющихся рядов данных, в котором долгопериодная компонента не вносит значимого вклада в общую изменчивость ряда. Во внутренней структуре ряда хлора, кроме первых двух гармоник с периодами 77 и 66,5 лет, присутствует только квазивековая компонента с периодом 83,5 года.

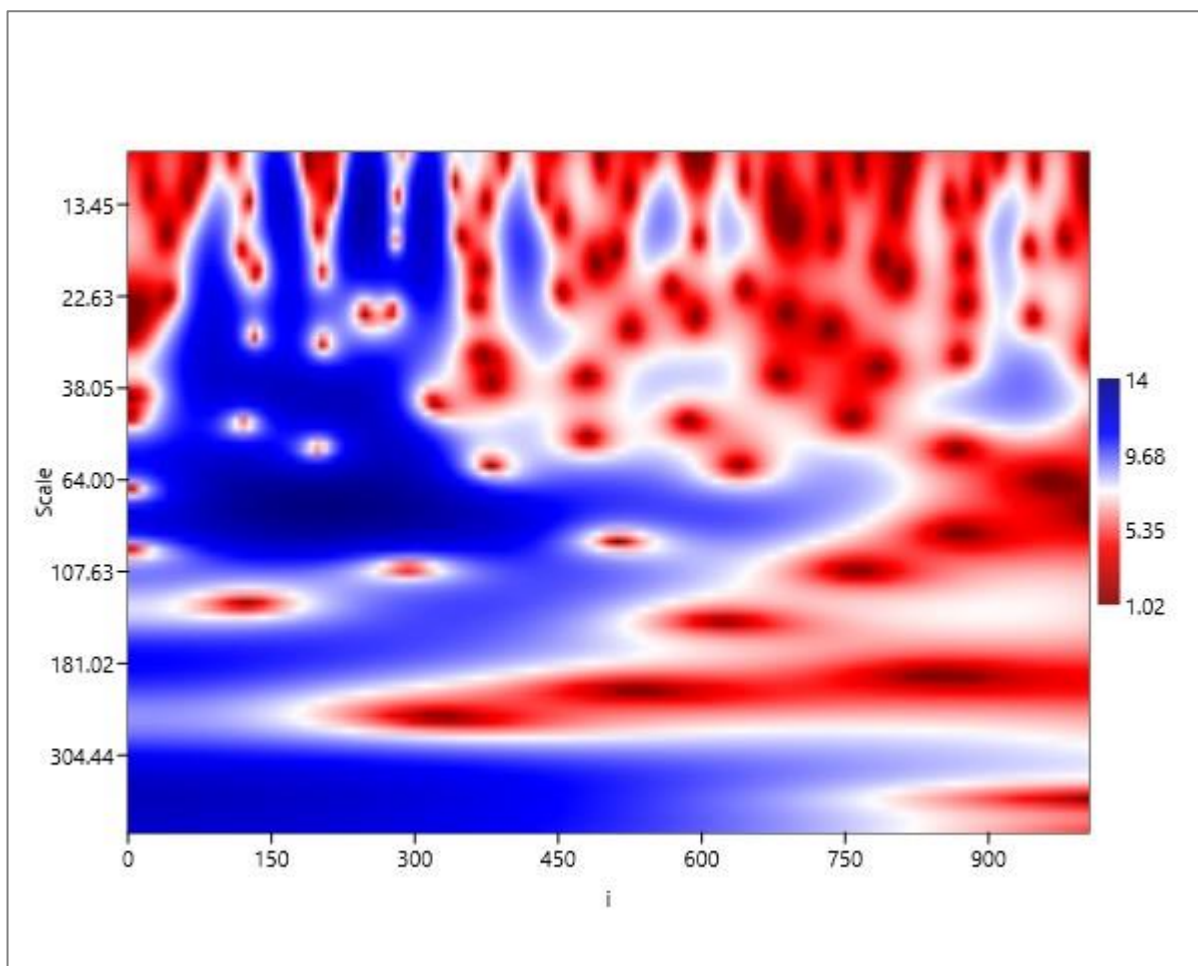


Рис. 3.11. Карта коэффициентов вейвлет-преобразования для хлора

Как видно на рис. 3.11, самая мощная гармоника с периодом 77 лет присутствует только в первой половине исследуемого ряда, как и гармоника с периодом 83,5 года. Долгопериодная компонента выражена плохо.

3.2.4. Свойства внутренней структуры ряда значений температуры

По исходным данным был построен временной ход изменчивости значений температуры, с 5 г. по 1995 год (Рис. 3.12), данные осреднены за десять лет.

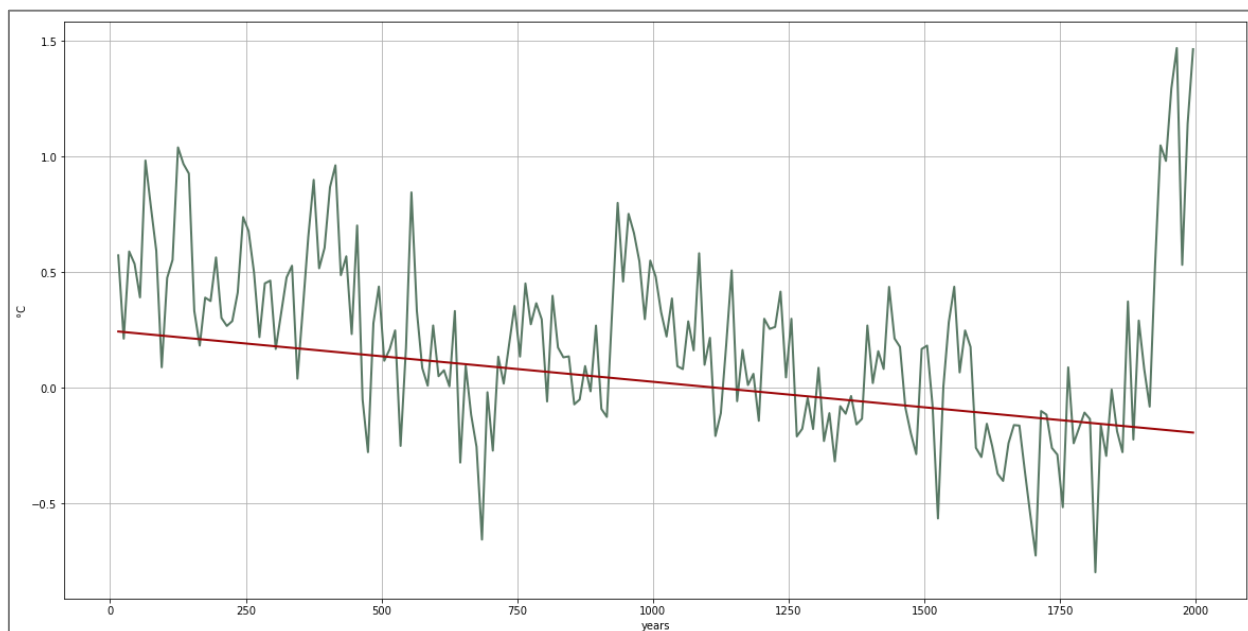


Рис. 3.12. Временной ход значений температуры

Как видно на рис. 3.12, во временном ходе значений количества осадков присутствует отрицательный тренд. Максимумы значений пришлись на 1965 г. ($1,47^{\circ}\text{C}$), 135 г. ($0,97^{\circ}\text{C}$), 405 г. ($0,87^{\circ}\text{C}$), 555 г. ($0,86^{\circ}\text{C}$), 935 г. ($0,8$). Минимумы значений наблюдались в 1815 г. ($-0,8^{\circ}\text{C}$), 1705 г. ($-0,72^{\circ}\text{C}$), 685 г. ($-0,66^{\circ}\text{C}$), 1525 г. ($-0,56^{\circ}\text{C}$). С 950 по 1250 г. наблюдался т.н. средневековый климатический оптимум (Рис. 3.18), в течение которого средние значения температуры возросли. В XIV-XIX наблюдался Малый ледниковый период (Рис. 3.18), в течение которого наблюдалось уменьшение средних значений температуры вплоть до абсолютного минимума в 1815 г., после чего началось резкое их увеличение.

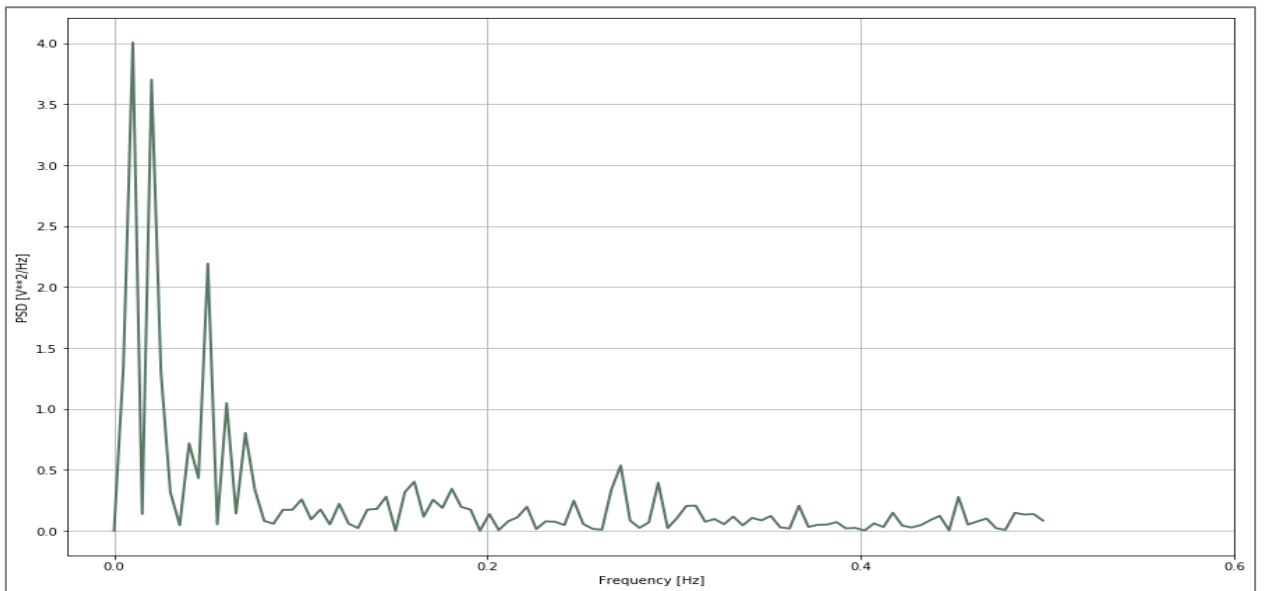


Рис. 3.13. Периодограмма для ряда значений температуры

На рис. 3.13 и по таблице 3.2 видно, что во внутренней структуре ряда значений температуры также преобладают долгопериодные компоненты (Рис. 3.14): гармоника с периодом 497,5 лет хорошо выражена в середине исследуемого ряда, а с периодом 248,8 лет – в конце, начиная примерно с 1600 года.

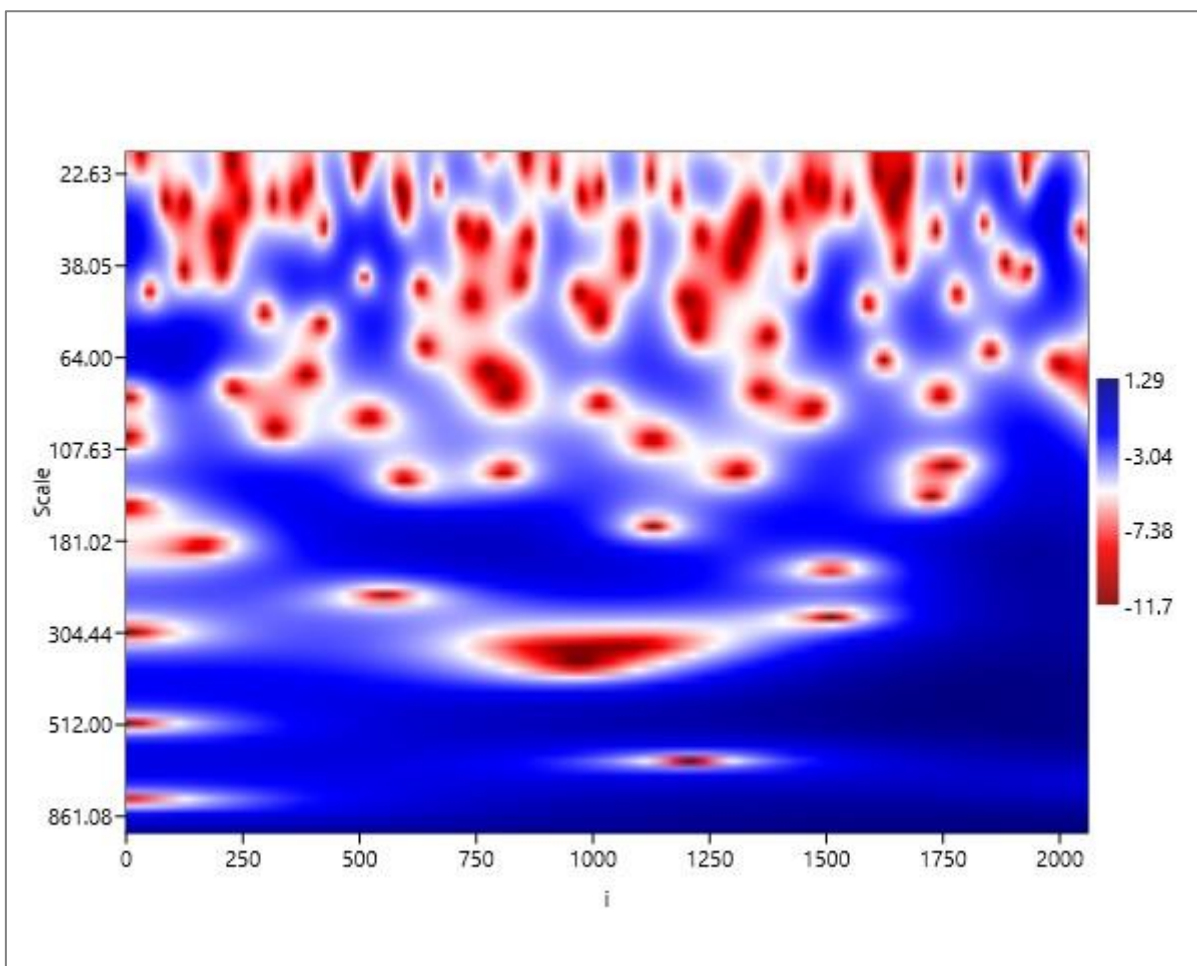


Рис. 3.14. Карта коэффициентов вейвлет-преобразования для температуры

Также имеется хорошо выраженная квазивековая составляющая (99,5 лет), которая возникла, судя по всему, сравнительно недавно, примерно 200 лет назад (Рис. 3.14). Возникновение квазивековой компоненты во внутренней структуре ряда значений температуры, как и присутствие таковой в ряде значений содержания кальция, можно связать с влиянием индустриальной революции в XVIII—XIX веках и последующей развивающейся деятельностью человечества.

3.2.5. Свойства внутренней структуры ряда количества осадков

По исходным данным был построен временной ход изменчивости количества осадков, σ , с 50 г. до н. э. по 2000 год (Рис. 3.15), данные осреднены за десять лет.

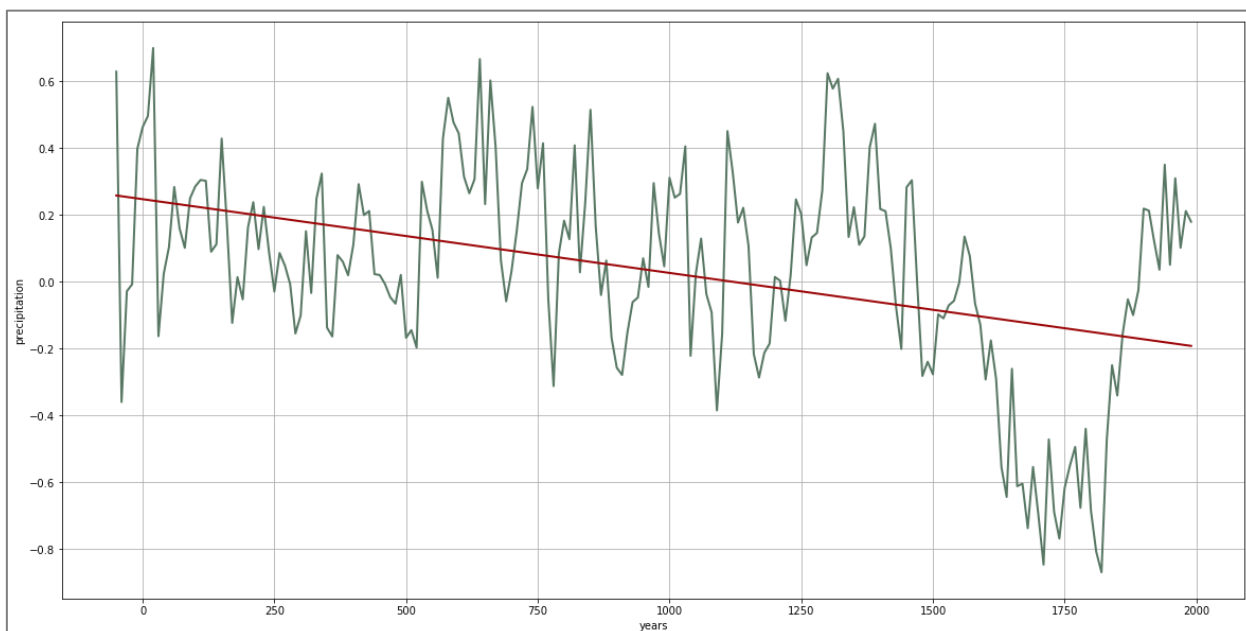


Рис. 3.15. Временной ход значений осадков

Как видно на рис. 3.15, во временном ходе значений количества осадков присутствует отрицательный тренд. Максимумы значений пришлись на 20 г. (0,7), 640 г. (0,67), 1300 г. (0,62). Абсолютный минимум значений наблюдался в 1820 г. (-0,87). С середины XVI века во временном ходе осадков наблюдался спад средних значений, вплоть до 1820 года и абсолютного минимума, далее начался резкий рост до 1940 года, где наблюдался локальный максимум (0,35). Этот провал в средних значениях совпадает с Малым ледниковым периодом (XIV – XV в).

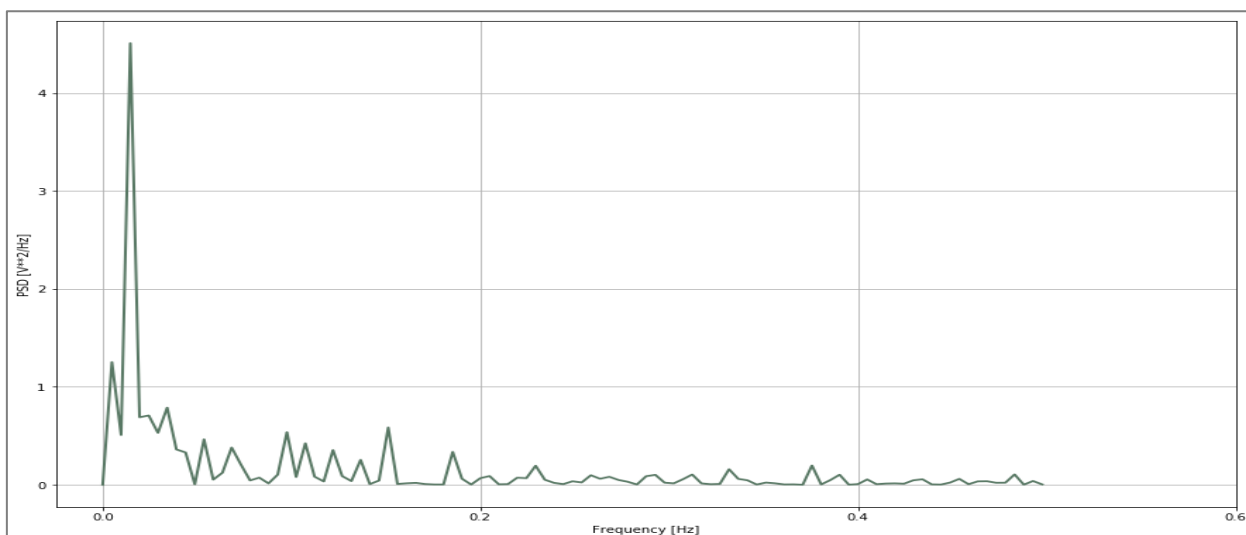


Рис. 3.16. Периодограмма для ряда количества осадков

Спектральный и вейвлет анализы показали, что в ряде значений осадков преобладают долгопериодные компоненты, а именно, с периодами 683 и 293 года (Рис. 3.16, таблица 3.2). Вклад первой составляющей в общую изменчивость относительно постоянен на протяжении всего периода, вторая наблюдается начиная примерно с 1300 года (Рис. 3.17).

Ряд значений осадков – единственный ряд из всех рассмотренных в работе данных, во внутренней структуре которого отсутствует 100-летняя компонента и любая высокочастотная изменчивость (Таблица 3.2). Соответственно, за последние 300 лет во внутренней структуре ряда не наблюдалось существенных изменений или появления какой-либо новой гармоника с квазивековым периодом. (Рис. 3.17). Таким образом, можно предположить, что деятельность человека влияет на изменчивость количества осадков в меньшей степени.

В подтверждение этого необходимо отметить, что запасы влаги на Земле являются величиной конечной, а режим осадков носит локальный характер и имеет сравнительно маленькие временные масштабы – значительно меньше, чем трехсотлетние или даже вековые. Запасы влаги перераспределяются по планете независимо от деятельности человека. Этими особенностями режима осадков можно объяснить также отсутствие

высокочастотной компоненты во внутренней структуре ряда количества осадков.

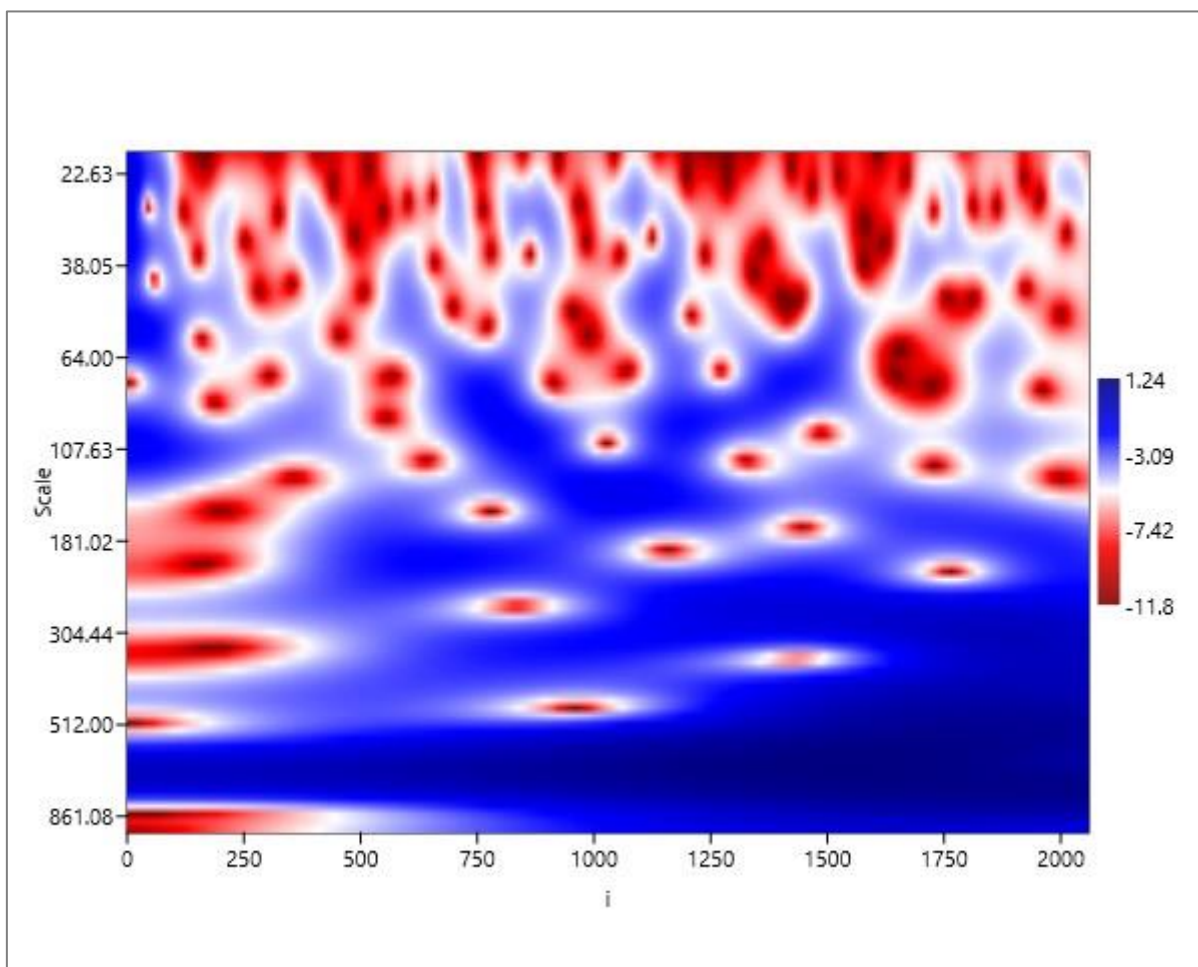


Рис. 3.17. Карта коэффициентов вейвлет-преобразования для осадков

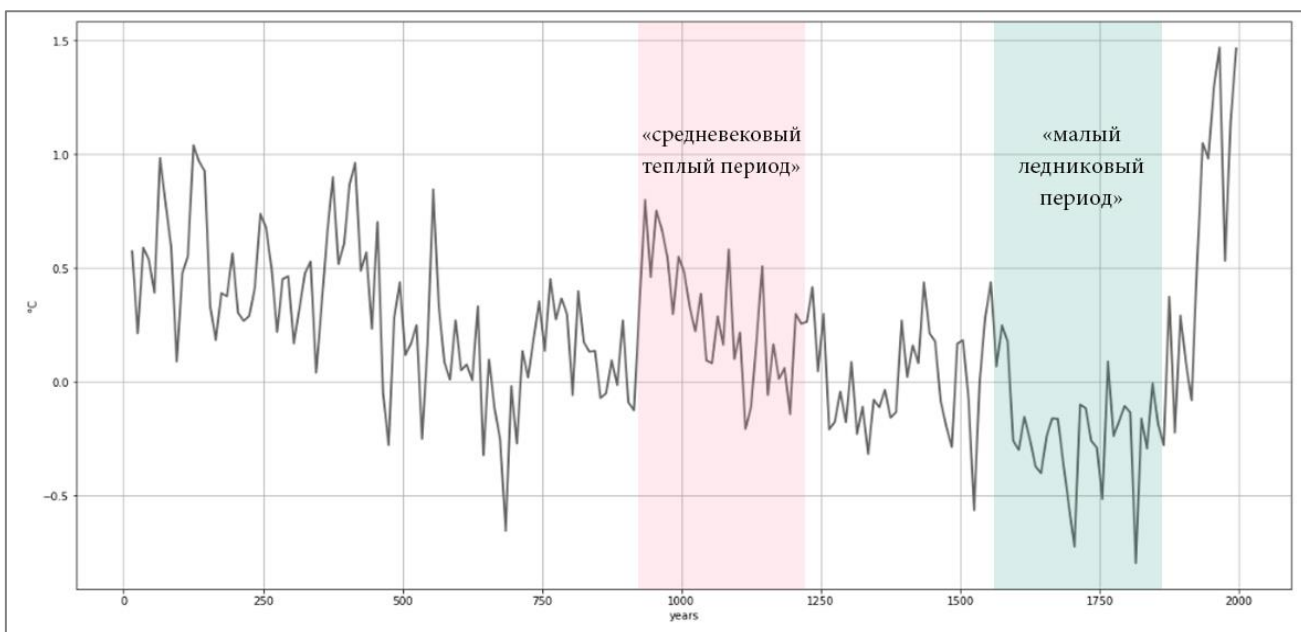


Рис. 3.18. Средневековый теплый период и малый ледниковый период

Существует гипотеза [16] о том, что малый ледниковый период был вызван вулканической активностью. Предполагается, что извергаемые вулканами газ и пепел распределяются в атмосфере и отражает часть поступающей солнечной радиации, что приводит в общему охлаждению поверхности Земли. Как видно на рис. 3.19, в период между XIV и XIX в., действительно, наблюдалась повышенная вулканическая активность, начиная с извержения вулкана Кувае в 1452 г., с которым совпало резкое увеличение содержания кальция (Рис. 3.1) и дейтерия (Рис. 3.5).

Также считается, что на снижение средней температуры в этот период могли повлиять снижение солнечной активности и замедление циркуляции в океане, вызванное распреснением воды около полюсов, которое, в свою очередь, стало следствием таяния ледников в период средневекового климатического оптимума.

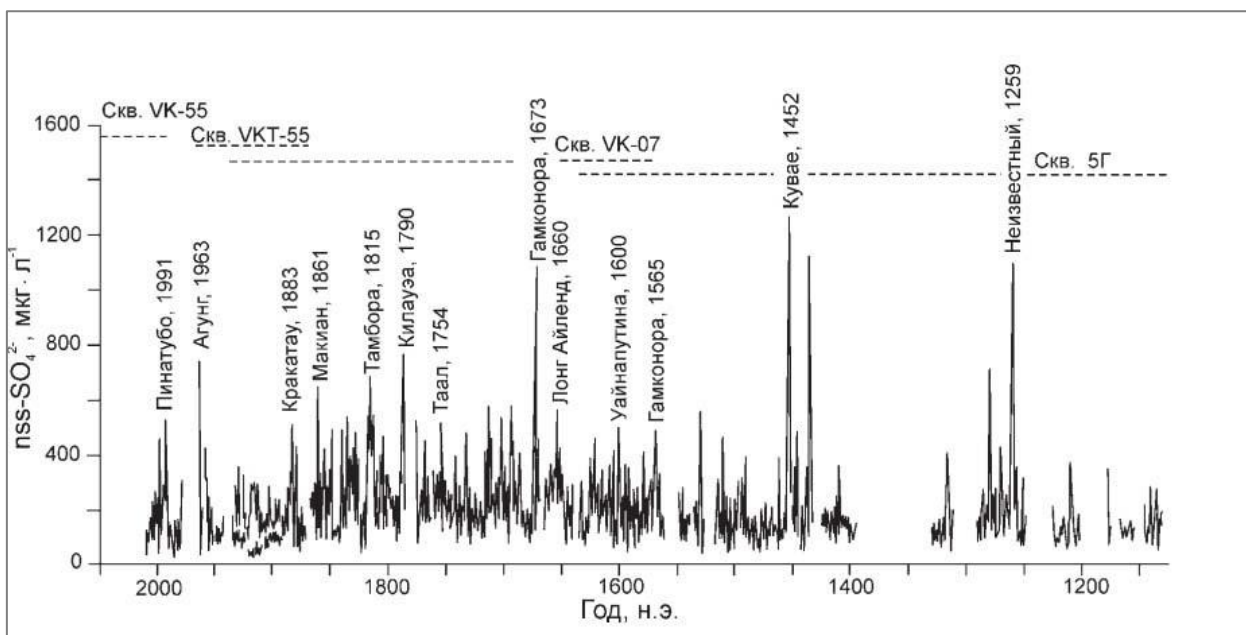


Рис. 3.19. Вулканическая активность в период 1200-2000 г.

Таблица 3.2. Наиболее мощные гармоники

Параметр	Период, лет			
	1	2	3	4
Гармоника по.	1	2	3	4
Ca	91*	66,5	500	111
D	500**	333,5	55,5	200
Cl	77	66,5	83,5	41,5
Marine Cl	77	83,5	71,5	333,5
Осадки	683	2050	293	410
T	497,5	248,8	99,5	995

* – квазивековая компонента

** – долгопериодная компонента

3.3. Выводы по главе

Проанализировав свойства внутренней структуры имеющихся рядов гидрометеорологических характеристик и сопоставив результаты исследований с общеизвестной информацией о характере некоторых природных процессов, климатических событий прошлых лет и с историческими данными, можно сформулировать следующие выводы:

1. Во внутренней структуре двух исследуемых рядов, а именно, значений температуры и содержания кальция, была обнаружена квазивековая изменчивость (периоды равны 99,5 и 91 год для температуры и кальция соответственно), максимальный вклад которой в общую дисперсию рядов наблюдался начиная приблизительно с конца XVIII – начала XIX веков, что совпадает с началом индустриальной революции и развитием деятельности человечества в сфере промышленного производства. В ряде значений содержания дейтерия присутствует полувековая компонента, максимальный вклад которой в общую дисперсию ряда также наблюдался в этот же период (1750-1950 г.) Это свидетельствует о том, что на изменчивость климата действительно может сильно влиять деятельность человека, причем, судя по всему, это влияние началось уже тогда, когда машинное производство еще не было распространено так, как в наше время, и находилось на начальной стадии развития.

2. Также можно предположить, что влияние человеческой деятельности формирует во внутренней структуре изменчивости климата именно квазивековую компоненту.

3. Сравнивая вклад долгопериодных и высокочастотных компонент в изменчивость всех исходных рядов, можно сделать вывод, что практически во всех рядах преобладает долгопериодная составляющая, с периодом около 500 лет. Именно она определяет характер глобальных климатических событий и оказывает основное влияние на формирование изменчивости характеристик

климата. Роль же высокочастотной составляющей невелика, она встречается реже и оказывает скорее локальное влияние на климат планеты.

4. Сравнивая частотное содержание исследуемых рядов за весь исследуемый период и в последние 300 лет, можно условно разделить климатическую изменчивость на планете на «внешнюю», обусловленную только природными процессами, и «внутреннюю», обусловленную деятельностью человека. При этом, из всех исследуемых в этой работе данных, ко «внешней» изменчивости, очевидно, можно отнести ряд количества осадков, ко «внутренней» - все остальные параметры.

5. Таким образом, можно предположить, что за последние 300 лет, начиная с конца XVIII века, климатическая изменчивость примерно на 60-70% была обусловлена деятельностью человека и на 30-40% - природными процессами.

6. Существуют разные гипотезы, объясняющие наступление Малого ледникового периода в XIV-XIXв. Сравнивая поведение исходных рядов данных с изменчивостью вулканической активности за последние 800 лет, можно сказать, что гипотеза о том, что на снижение глобальной температуры в тот период повлияли мощные извержения вулканов, представляется правдоподобной. Экстремумы исследуемых рядов и ряда вулканической активности частично совпадают.

7. Исследование внутренней структуры гидрометеорологических рядов дает представление о том, каким образом необходимо прогнозировать будущую климатическую изменчивость. Согласно результатам вейвлет-анализа, наиболее целесообразным представляется прогнозирование климатической изменчивости в двух направлениях:

- чистая изменчивость климата, с использованием рядов гидрометеорологических данных за 2-4 тыс. лет с отфильтрованными 50 и 100летними компонентами;

- исследование влияния на климат деятельности человека, т.е. 300-400-летняя компонента с отфильтрованной чистой климатической изменчивостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи.

Были сформулированы гипотезы о природе изменчивости климата: предположительно, природные процессы развиваются по спиральному типу, т.е. имеют квазигармонический характер, но не возвращаются неизменно в своё первоначальное состояние, а получают развитие во времени.

Для всех рядов исходных данных были рассчитаны первичные статистические моменты, проведен спектральный и вейвлет-анализ, результаты расчетов представлены в виде таблиц и графиков.

Полученные результаты были исследованы на предмет наличия в их внутренней структуре каких-либо закономерностей и сопоставлены с общеизвестной информацией о характере некоторых природных процессов, климатических событий прошлых лет и с историческими данными.

По результатам расчетов были выявлены некоторые закономерности в изменчивости рядов гидрометеорологических данных, а также наличие их связи с другими природными явлениями за последнее тысячелетие, составлено представление о характере изменчивости исходных рядов значений содержания кальция, дейтерия, хлора, осадков и температуры, а также о том, какие компоненты внутренней структуры этих характеристик оказывают максимальное влияние на глобальную изменчивость климата.

Было установлено, какие частоты преобладают во внутренней структуре рядов исходных данных, а также их расположение во временной структуре исследуемых рядов.

Также была сформулирована гипотеза климатических изменений на планете: предположительно, все климатические процессы можно разделить по признаку степени влияния на них человеческой деятельности на «внешние» и «внутренние». При этом доля «внутренней» климатической изменчивости,

обусловленной деятельностью человека, может составлять 60-70%, тогда как «внешняя» изменчивость, обусловленная только природными процессами и не зависящая от человека – только 30-40%. Данное разделение имеет место начиная с конца XVIII века, т.е. с началом развития человеческой деятельности в сфере машинного производства.

Также были определены оптимальные направления для дальнейшего прогнозирования климата будущего.

Благодарности

Автор работы выражает признательность научному руководителю Густоеву Дмитрию Владимировичу за ценные комментарии и информационную поддержку в ходе написания работы; Березиной Анфисе Владимировне за помощь в освоении языка программирования Python; Лапенкову Артёму Евгеньевичу за помощь в технических моментах, связанных с организацией дистанционной защиты данной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Государственный океанографический институт, каталог уровня Каспийского моря
2. Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO), Sunspot number series, July 2015.
3. NOAA Paleoclimatology Program, East Rongbuk Glacier Col Ice Core 1,000 Year 2Geochemical Data
4. NOAA Paleoclimatology Program, <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/22315>
5. NOAA Paleoclimatology Program, 2,000 Year Decadal Scale Arctic Temperature Synthesis
6. Котляков В.М., Гросвальд М.Г., Кренке А.Н. Климат Земли: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Знание, 1985
7. Монин А. С., Шишков Ю. А. Климат как проблема физики Апрель 2000
8. Бедрицкий А. И., Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития российской федерации – 2005
9. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии. - М.: Мир, 1990. - 356с.
10. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации (одномерный анализ).- Л.: ЛГМИ, 1991. - 136 с.
11. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – РГГМУ, 2008. – 408 с.
12. Марпл-мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М: Мир, 1990. – 583 с.
13. Г. Дженкинс, Д. Ватс Спектральный анализ и его приложения - М: Мир, 1971. – 583 с.

14. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. - М.: Статистика, 1979. - 80 с.
15. Н. М. Астафьева Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения, Успехи физических наук, 1996
16. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, 2012