



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления

прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

**«Уровень Каспийского моря как индикатор влагообмена в системе
океан-атмосфера-суша»**

Исполнитель: Сарадоева Елизавета Игоревна

Руководитель: доктор географических наук, профессор, Малинин Валерий
Николаевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

_____ кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

_____ Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

« » 2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Оглавление

Введение	3
ГЛАВА 1 Климатический режим Каспийского моря.....	4
1.1. Физико-географическое описание Каспийского моря.....	4
1.2. Границы и рельеф дна моря	4
1.3. Колебания уровня моря	6
1.4. Климатический режим.....	8
1.5. Температурный режим моря	12
1.6. Температура воды	15
ГЛАВА 2 Статистические методы обработки данных.....	18
2.1.1. Статистические методы обработки данных.....	18
2.1.2. Анализ тренда временного ряда	19
2.1.3. Гармонический анализ Фурье и спектр.....	21
2.1.4. Корреляционный анализ	23
2.1.5. Множественная линейная регрессия	24
2.2. Исходные данные	27
ГЛАВА 3 Исследование связей гидрометеорологических процессов и уровня Каспийского моря	28
3.1. Влияние Северной Атлантики на уровень Каспия	31
3.2. Анализ трендовой составляющей временных рядов.....	33
3.2.1. Анализ тренда по уровню моря	34
3.2.2. Анализ тренда температуры поверхности	35
3.2.3. Анализ тренда испарения.....	37
3.3. Гармонический анализ Фурье.....	38
3.3.1. Гармонический анализ Фурье по уровню моря	39
3.3.2. Гармонический анализ Фурье по температуре моря	40
3.3.3. Гармонический анализ Фурье по испарению моря	43
3.4. Корреляционный анализ	44
3.5. Множественная линейная регрессия.....	50
Заключение.....	53
Список литературы:	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	60

Введение

Актуальность работы заключается в уникальности Каспийского моря как самого большого замкнутого внутриконтинентального водоема на планете. Этот водоем обладает особенной экосистемой, насыщенной разнообразием биологических видов, что делает его непревзойденным в плане флоры и фауны.

Уровень Каспийского моря отражает глобальные изменения климата, затрагивающие практически все уголки Земли. Он является комплексным показателем взаимодействия различных элементов водного баланса, каждый из которых имеет свои физические характеристики и условия формирования [3]. Долгосрочные исследования свидетельствуют о тесной взаимосвязи между колебаниями уровня Каспийского моря и изменениями климата, причем понимание физических процессов, управляющих климатической системой, играет ключевую роль в их решении. Среди таких процессов можно выделить температуру воды и испарение с поверхности Каспийского моря. Поэтому важность заключается в выявлении особенностей их изменений в течение года в контексте уровня Каспийского моря.

Целью исследования является изучение воздействия гидрометеорологических условий на колебания уровня Каспийского моря.

Для достижения этой цели были поставлены и успешно выполнены следующие задачи:

1. Провести анализ климатического режима Каспийского моря;
2. С использованием статистических методов обработки информации выявить особенности взаимодействия гидрометеорологических факторов и уровня моря;
3. Проанализировать полученные результаты и оценить влияние гидрометеорологических данных на изменения уровня моря.

ГЛАВА 1 Климатический режим Каспийского моря

1.1. Физико-географическое описание Каспийского моря

Каспийское водохранилище – это уникальное водное пространство, лидирующее среди закрытых озер и морей по всему миру. Оно также признано самым большим бездонным озером на планете благодаря своей величине, происхождению, глубине, солености и особенностям дна, принадлежащего к океанической коре. Расположенное на стыке Европы и Азии, Каспийское водохранилище характеризуется значительными колебаниями уровня воды.

Россия имеет доступ к северной части Каспийского моря и к участку западного побережья в Дагестане, примыкающему к средней его части. Вдоль берегов Каспийского водохранилища также простираются территории Азербайджана, Ирана, Казахстана и Туркменистана [1].

Длина Каспийского моря с севера на юг достигает примерно 1200 километров ($36^{\circ}34'$ — $47^{\circ}13'$ с. ш.), ширина с запада на восток колеблется от 195 до 436 километров, при этом средняя ширина составляет 310-320 километров (46° — 56° в. д.). Площадь моря равна 386,4 тысячи квадратных километров, а объем воды в нем – 78 тысяч кубических метров.

1.2. Границы и рельеф дна моря

Каспийское море, благодаря своим рельефным и физико-географическим характеристикам, подразделяется на три основные зоны: северную (25% площади), среднюю (39%) и южную (39%). Разграничивание между северной и средней частями проходит по острову Чечень и мысу Тюб-Караган, а между средним и южным — по острову Жилой и мысу Куули.

Северная часть моря отличается сравнительно небольшой глубиной: здесь средняя глубина колеблется от 5 до 10 метров, при этом максимальная глубина достигает 15-21 метров вдоль границы с центральной частью.

В центральной части моря располагается изолированная котловина. В её центре находится Дербентская котловина, где зафиксированы наибольшие глубины, с некоторым смещением в сторону западного берега. Средняя глубина здесь достигает 190 метров, при максимальных показателях в 788 метров.

Южная часть моря отделена от центральной зоны Апшеронским порогом, который представляет собой продолжение горной системы Большого Кавказа. Глубины в этой области не превышают 180 метров. В Южно-Каспийской котловине, расположенной к востоку от устья реки Кури, зафиксирована самая глубокая точка, достигающая 1025 метров, и можно наблюдать несколько подводных хребтов, достигающих высоты в 500 метров [2].

«Прилегающий к Каспийскому морю участок земли именуется как Каспийское побережье. Протяженность береговой линии моря оценивается приблизительно в 6,5-6,7 тысяч километров, а если учесть острова, то до 7 тысяч километров. В основном побережье представляет собой равнинную и плоскую местность. На северном побережье Каспия преобладают водные пути и дельты рек Волги и Урала, также встречаются низкие берега и болотистые участки, а поверхность воды часто покрыта кустарником. На восточном побережье в основном встречаются известняковые берега, примыкающие к полупустыням и пустыням. Самые изрезанные берега можно увидеть на западном участке у полуострова Апшерон и на восточном у залива Казахстана и Кара-Богаз-Гол» (рис.1.1) [2,3].

Известно, что уровень воды в Каспийском море периодически изменяется, что является одним из его характерных особенностей. Ученые анализируют различные факторы [2,4], влияющие на эти изменения, включая климатические, геологические и человеческую деятельность. Как известно, Каспийское море изолировано от МО (Мирового океана), что приводит к его колеблющемуся уровню воды. Важно подчеркнуть, что на протяжении всей истории нашей планеты уровень воды в этом море неизменно оказывался ниже, чем в Мировом океане. С начала систематического наблюдения за уровнем моря в 1830 году амплитуда колебаний составила около 4 метров: от -25,3 метра в 1880-х годах до -29 метров в 1977 году.

«Несмотря на все прогнозы, в 1978 году началось повышение уровня моря. К 1994 году уровень Каспийского моря достиг -26,5 метра, что означает, что за примерно 20 лет уровень поднялся более чем на 2 метра. Скорость подъема составила 15 сантиметров в год. В некоторые годы уровень поднимался быстрее, и в 1991 году достигал 39 сантиметров» (Костяной, 2016) (рис.1.3).

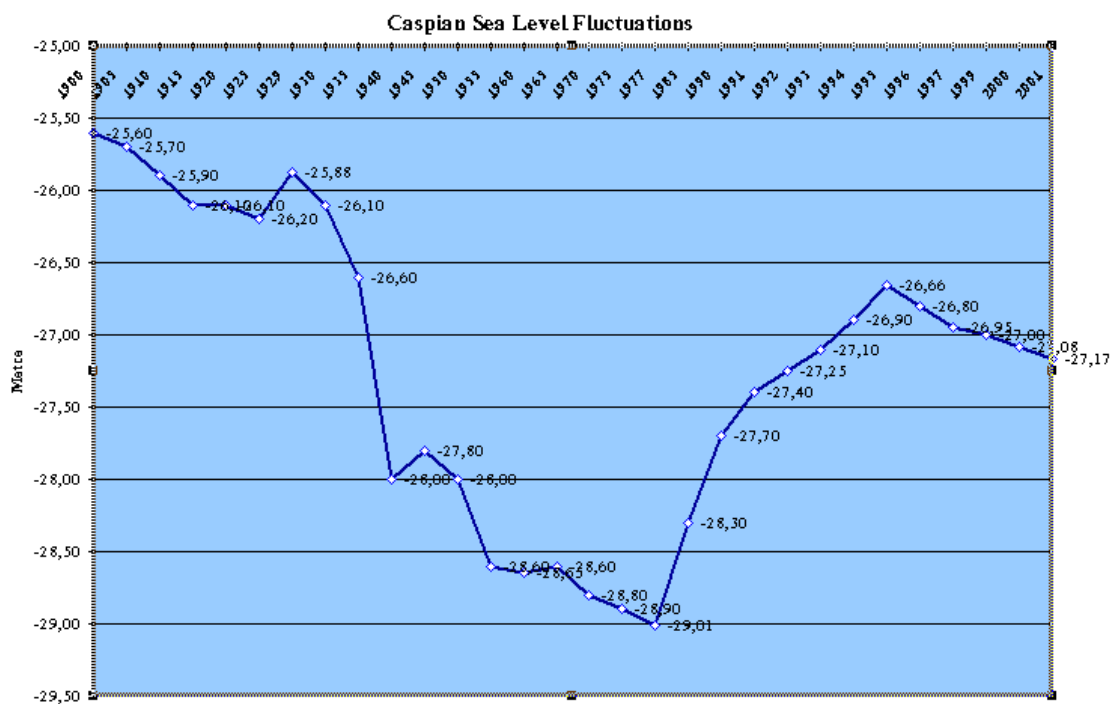


Рисунок 1.3 Изменение уровня моря в XIX в [5]

«К 2001 году уровень моря снизился до отметки -27,17 м, вскоре стал вновь повышаться, и в 2005 году достиг -26,91 м (повысился на 12 см.). С 2006 года прослеживалась тенденция снижения уровня Каспийского моря. К 2016-2017 г. средний уровень Каспийского моря составил -27,99 м. К концу 2021 года уровень Каспийского моря снизился еще на 30 см, а если сравнивать с 2005 годом, то уровень моря снизился на 119 см (-28,1 м). В декабре 2023 года уровень моря составил -29, 03 м» [5,6,7].

Изменения уровня воды в Каспийском море подвержены влиянию сезонных колебаний, средняя амплитуда которых составляет 40 сантиметров, а также приливно-отливных процессов. Особенно сильное воздействие эти процессы оказывают на уровень в Северном Каспии. В северо-западной части моря часто наблюдаются значительные приливы, вызванные преимущественно в холодное время года штормами из восточных и юго-восточных направлений. За последние десятилетия именно здесь было зафиксировано несколько крупных приливов, превышающих 1,5-3 метра.

1.4. Климатический режим

Каспийское море, которое простирается на 1200 километров, охвачено влиянием нескольких климатических зон: северные районы отличаются холодным континентальным климатом, западная часть наслаждается умеренно-теплыми температурами, южная и юго-западная территории омываются субтропическими влажными ветрами, в то время как восточные берега покрыты пустынями. Это разнообразие климата отражается в сезонных изменениях погоды и атмосферных процессов в пределах Каспийского бассейна. Влияние на атмосферные течения оказывают ключевые барические центры: зимой это азиатский антициклон, а летом — азорский. Преобладание антициклонов, значительные температурные перепады в течение года, прохладные и ветреные зимы, которые могут привести к образованию

ледяного покрова на Северном Каспии в различные зимы, а также в основном тёплое и спокойное лето — это основные особенности климата этого района.

Среднегодовая температура морской поверхности колеблется на уровне 60 ккал/см². Наличие избыточного тепла стимулирует активный процесс испарения воды и теплового обмена с атмосферой через конвекцию. В течение периода с марта по октябрь тепловой баланс морской акватории остается в плюсе, достигая своего пика в июне-июле с показателями 11-123 ккал/см², в то время как минимум отмечается в декабре – 1-2 ккал/см².

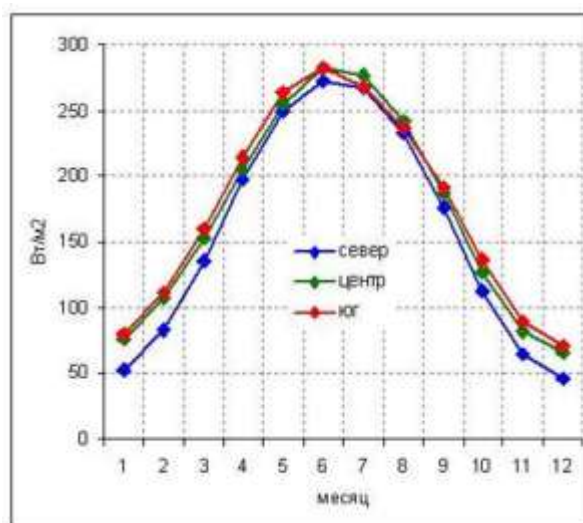


Рисунок 1.4 Годовая динамика поверхностного потока солнечной радиации в диапазоне коротких волн в разнообразных зонах Каспийского моря [8]

Влияние разнообразных воздушных потоков на климат Каспийского моря оказывает ключевое воздействие. В этом регионе происходит слияние холодных воздушных потоков с севера, влажных ветров, прибывающих из Атлантического океана, сухой атмосферы из Сибири и влажных тропических воздушных масс, приходящих из Средиземноморья и Малой Азии. Этот комплексный поток воздуха порождает многообразие погодных условий, влияющих на водное равновесие в регионе моря и его уровень. Процессы взаимодействия этих потоков характеризуются динамичностью и неустойчивостью, что делает их сложными для классификации. Чтобы

оценить вклад каждой из этих групп в колебания уровня моря, необходимо опираться на статистические данные, учитывая, что эти процессы имеют стохастическое (случайное) происхождение.

«В холодное время года большая часть водной области моря находится под воздействием отрогов сибирского антициклона. Зимой в горных районах Армении и Ирана наблюдается увеличение давления, что приводит к повышению давления в самой южной части морской зоны. На Средиземноморье формируется область сближения воздушных потоков с большими различиями в температуре, что способствует развитию циклонической циркуляции зимой и перемещению области низкого давления на юг из Черного и Средиземного морей. Весной наблюдается высокая изменчивость синоптических процессов и частая смена воздушных масс. Летом температурные различия уменьшаются, а циркуляционные процессы ослабевают. С запада синоптические процессы в Каспийском море подвержены воздействию Североатлантического колебания. Горные хребты Урала и Кавказа являются преградами для воздушных масс, поступающих с востока и юга, и оказывают значительное воздействие на климат в Каспийском бассейне. Каспийское море является открытым арктическим бассейном, что способствует глубокому проникновению холодных воздушных масс с севера на юг, в то время как Кавказские и Уральские горы препятствуют поступлению теплого воздуха с юга. В большей части территории бассейна господствует умеренно-климатический пояс, характеризующийся тёплым летом и прохладной зимой. В то время как на самом южном краю бассейна климат имеет субтропический характер, что приводит к тёплому, солнечному лету и влажной, ветреную зиму на западе и жаркому, сухому лету с прохладной зимой на востоке» [3].

Годовой уровень осадков варьируется от 200 мм в районе с засушливым климатом на востоке до 1700 мм в субтропической зоне на юго-западе. Испарение воды с поверхности водоемов достигает в среднем 1000 мм в год. Особенно высокие значения испарения фиксируются на Апшеронском

полуострове и в восточной части Каспия, где оно может составлять до 1400 мм в год.

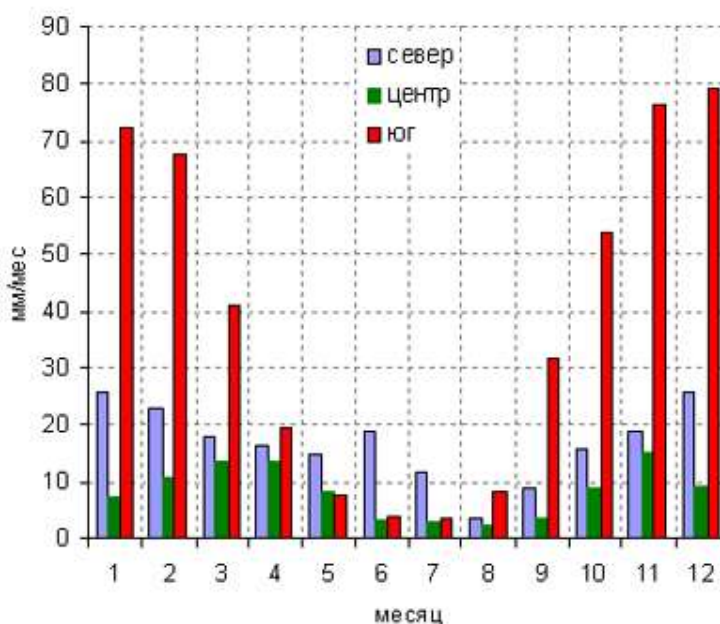


Рисунок 1.5 Среднемесячный уровень осадков на территории моря, мм/месяц [8]

«Скорость ветра в основном составляет 3-7 метра в секунду, преобладают больше северные ветра. В осенние и зимние ветры усиливаются, бывает, что скорость ветра достигает 35-40 метров в секунду. Наиболее ветреные территории – Апшеронский полуостров, окрестности Махачкалы и Дербента» [9].

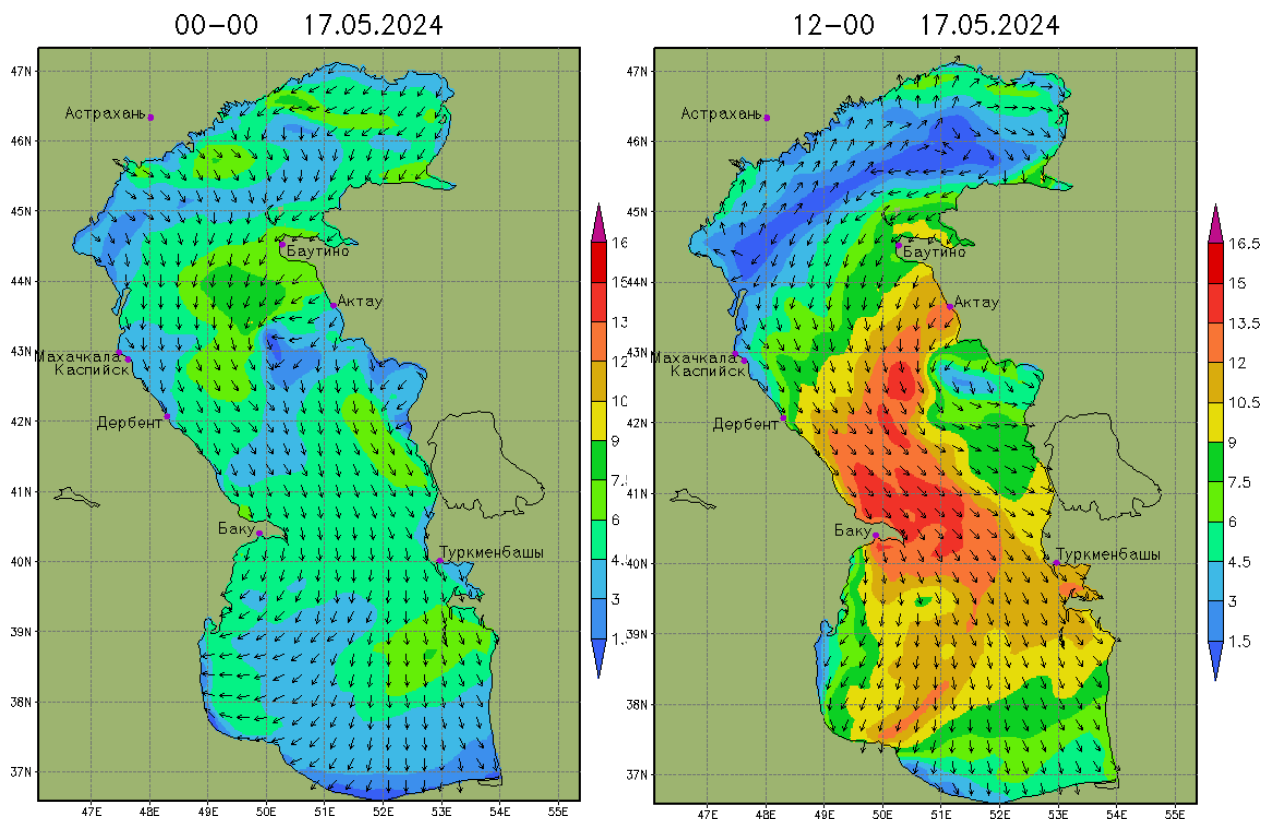


Рисунок 1.6 Карта распределения скорости и направления ветра за 17.04.2024 г [10]

1.5. Температурный режим моря

«Большую часть года (с конца августа по апрель) температура воздуха над открытым морем выше, чем на побережье, однако во вторую половину весны и летом ситуация меняется. Февраль считается самым холодным месяцем над центральными и юго-западными районами моря» [11]. Распределение температуры по сезонам представлено на рисунке 1.7.

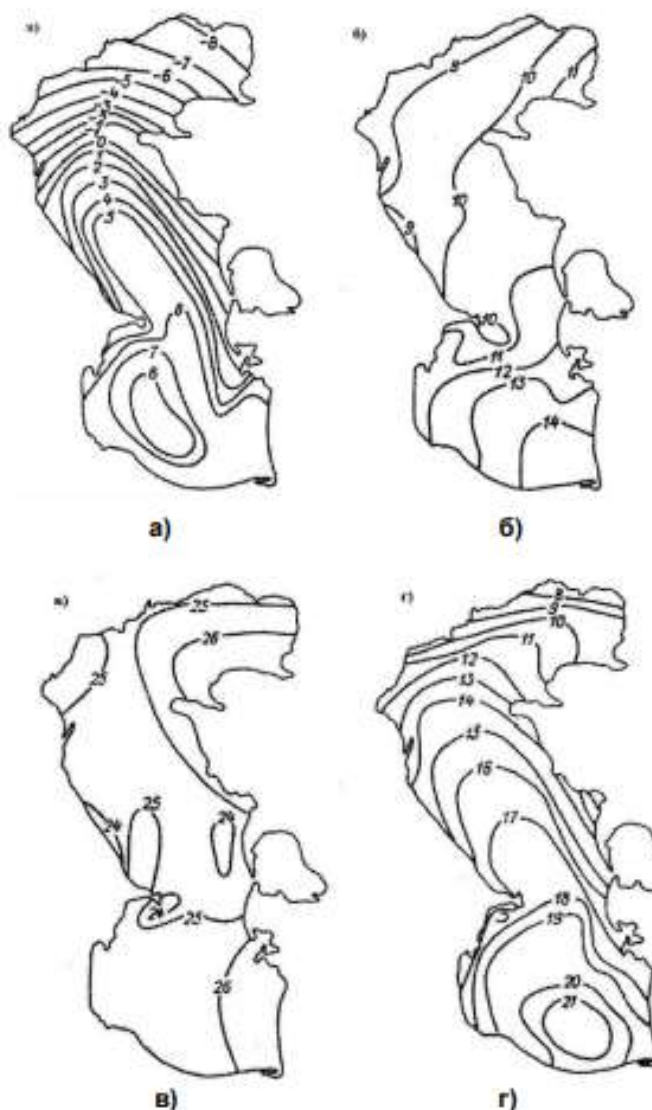


Рисунок 1.7 Среднемесячная температура воздуха (°С): январь (а), апрель (б), июль (в), октябрь (г) [3]

Зимой температура в воздухе в северной части моря держится в пределах от минус 8 до минус 10 градусов Цельсия, в центральной зоне она колеблется между плюс 3 и минус 5 градусами, а в южной части отмечаются показатели в диапазоне от плюс 8 до плюс 12 градусов. В летние месяцы, когда температура достигает своего пика (июль-август), средняя температура воздуха варьируется от плюс 24 градусов на севере до плюс 30 градусов на юге.

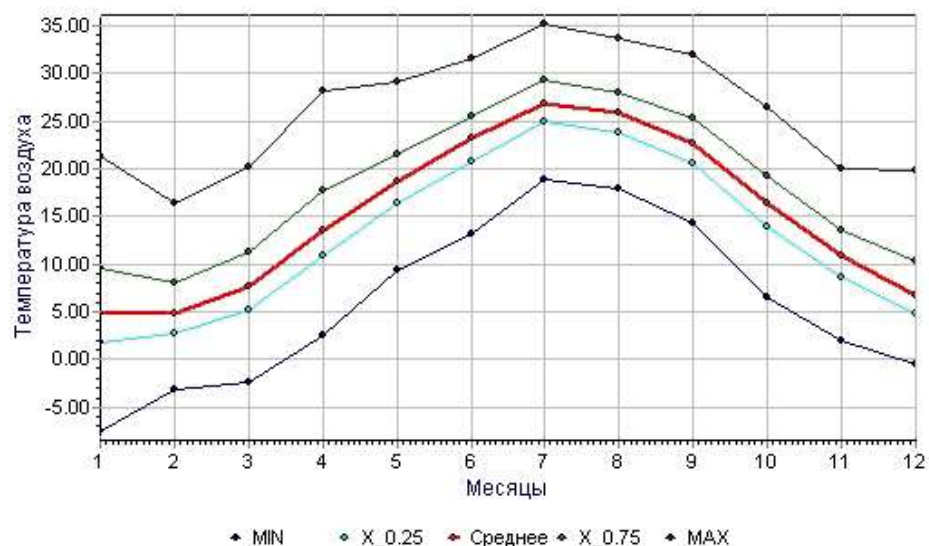


Рис.1.8 Годовой ход температуры воздуха: средняя, минимальная, максимальная, 0,25 и 0,75 квантили. Данные ЕСИМО. Ленкорань за 1981 - 2010 г [8]

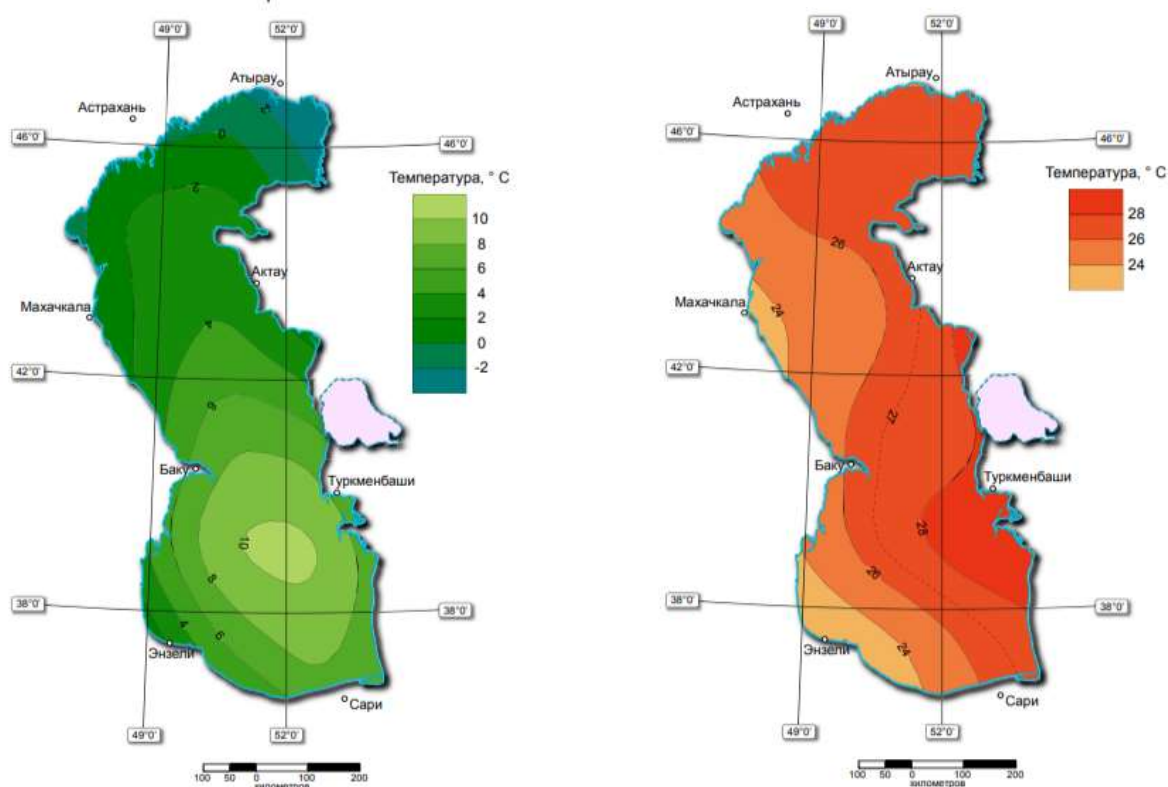


Рисунок 1.9 Средняя температура воздуха, 2 м от уровня моря за февраль(слева) и август (справа). По базе реанализа NCEP/NCAR, осреднение за 1981-2010 г [8]

«Среднегодовая приповерхностная температура воздуха в регионе Каспийского моря (море и прилегающие территории) за 41-летний период (1980-2020 гг.) почти монотонно увеличилась на 0,030 °С, т.е. на 1,2 °С. Потепление температуры поверхности моря было еще более значительным (1,4 °С)» [12].

1.6. Температура воды

«Температура воды может сильно меняться в зависимости от широты, особенно заметно это проявляется зимой, когда отметки могут колебаться от 0 °С у ледяного покрова на севере моря до 14 °С, то есть разница в температуре превышает 10 °С. В районах с небольшой глубиной, менее 25 метров, годовая разница может достигать 25-27 °С. В среднем температура воды у западного побережья на 1-2 °С выше, чем у восточного, а в открытом море температура воды на 2-4 °С выше, чем у прибрежных районов» [9,11,13].

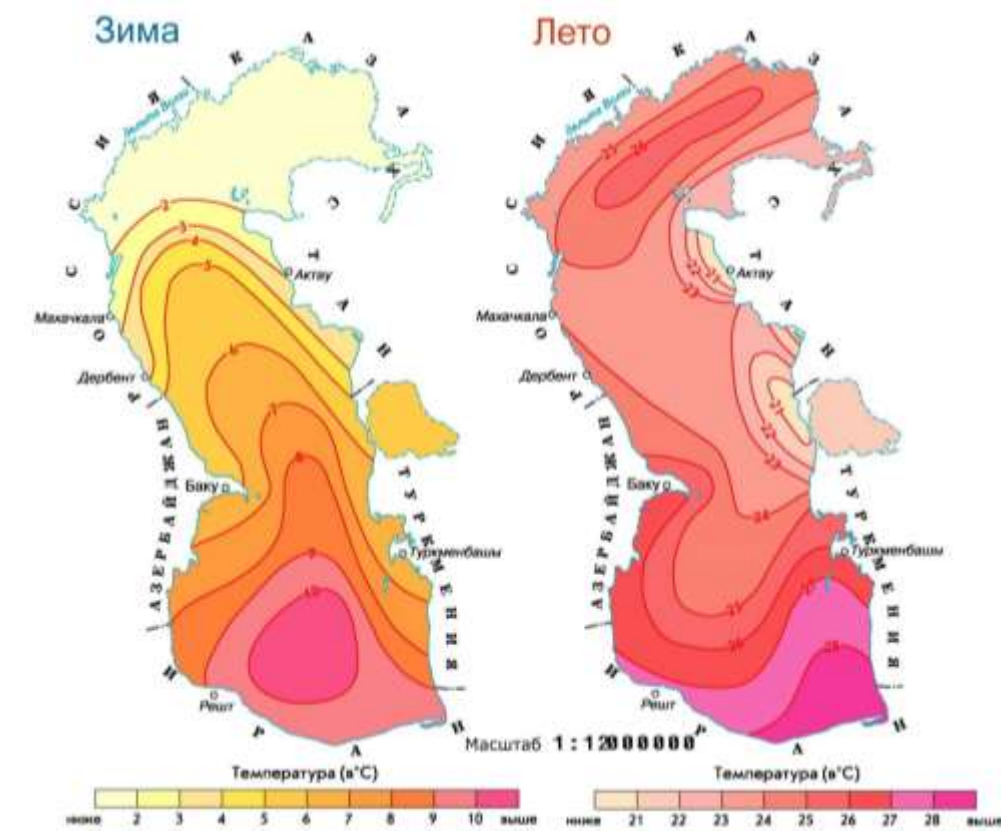


Рисунок 1.10 Изменение температуры воды на поверхности Каспийского моря в зимнее и летнее время за 1981-2010 года [14]

«В годовом цикле изменчивости температуры воды в верхнем двухметровом слое можно выделить три периода с различной горизонтальной структурой. С октября по март наблюдается увеличение температуры воды в южном и восточном направлениях, особенно заметное в районе Среднего Каспия. Существуют две стабильные квазиширотные зоны с высокими градиентами температуры. Первая находится на границе северной и средней частей моря, вторая — между средней и южной частями. На северной фронтальной зоне у края льда в феврале-марте температура повышается с 0 °С до 5 °С, а на южной фронтальной зоне, в районе Апшеронского порога, — с 7 до 10 °С» [3].

С приходом весенних дней в регионе Среднего Каспия наблюдается тенденция к повышению температуры воздуха, что связано с интенсивным нагревом воды в прибрежных участках Северного Каспия из-за ее сравнительно небольшой глубины. В начале весны большая часть тепла уходит на таяние ледяных покровов, однако к маю температура воздуха поднимается до 16-17 градусов Цельсия. В то время как температура воды в Среднем Каспии держится на уровне 13-15 градусов, на юге она может достигать 18 градусов. Ускоренное прогревание воды в этом регионе сглаживает температурные контрасты в горизонтальном направлении, доводя разницу между температурами в прибрежной и открытой зонах до менее чем полуградуса Цельсия. Процесс начального нагрева поверхностного слоя воды в начале сезона нарушает ранее установленную температурную структуру по глубине.

С начала лета до окончания осени в верхних слоях воды Каспийского моря наблюдается однородная температура по горизонтали. В августе температура достигает максимальных значений, особенно в районах с мелководьем, таких как залив Красноводск, где температура может расти до 32 °С. Это время года отмечено апвеллингом, ежегодным явлением, которое происходит вдоль восточного берега Среднего Каспия и частично влияет на

Южный Каспий. Процесс апвеллинга обычно начинается в июне и достигает апогея в июле-августе, приводя к понижению температуры на поверхности воды на 7–15 °С. Горизонтальные различия температуры составляют 2,3 °С на поверхности и 4,2 °С на глубине 20 метров. Апвеллингный центр медленно перемещается с 41–42° северной широты в июне на 43–45° северной широты к сентябрю. Летний апвеллинг оказывает существенное воздействие на Каспийское море, значительно изменяя динамику процессов в глубоководной области.

В Северном Каспии и на восточном побережье Южного Каспия заметно выражены максимальные суточные перепады температуры морской воды, достигающие 20 градусов Цельсия. Эти колебания обусловлены активным нагреванием воды летом и её быстрым охлаждением зимой в прибрежных мелководных зонах. В отличие от этого, центральная часть Южного Каспия отличается минимальными сезонными колебаниями температуры, что соответствует специфике климата данного региона.

ГЛАВА 2 Статистические методы обработки данных

2.1.1. Статистические методы обработки данных

«Объектом исследования в прикладной статистике являются статистические данные, которые были получены в результате наблюдений или экспериментов. Статистические данные – это совокупность объектов (наблюдений, случаев) и признаков (переменных), их характеризующих. Статистический ряд записывается в виде столбца. Если одновременно измерялось несколько характеристик объекта, получается несколько рядов. Совокупность статистических рядов можно записать как матрицу наблюдений (матрицу исходных данных), где каждая строка представляет собой случай наблюдений, а столбец – признак. Часто столбцы в статистической матрице называют «переменные»» [17].

Среднее значение, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, мода и медиана являются ключевыми показателями, которые характеризуют как генеральную, так и выборную совокупности. Исследователю также может быть важно изучить распределение элементов по определенным признакам в обеих совокупностях, где частоты соответственно классифицируются как генеральные и выборочные [15,16]. В идеале, все возможные значения характеристики любого естественного объекта представляют собой бесконечную генеральную совокупность. Но в реальной жизни мы зачастую используем выборку, частичкой генеральной совокупности, так как наблюдается ограниченность ресурсов.

В контексте временного ряда, элементы выборки представлены точками времени, в которые происходит измерение изучаемой характеристики. Порядок элементов в временном ряду имеет особую важность, и изменение его может привести к искажению информации. Есть множество вариантов статистической обработки данных, которые используются для исследования временных рядов. В данной работе будут использованы такие методы как:

1. Анализ тренда временного ряда.

2. Гармонический анализ Фурье и спектр.
3. Корреляционный анализ.
4. Множественная линейная регрессия.

В данной работе будет рассмотрена технология расчетов с помощью табличного процессора Microsoft Excel, который входит в состав пакета Microsoft Office и, как правило, установлен на каждом компьютере под управлением ОС Windows, а также свободно распространяемого пакета статистических программ PAST4.

2.1.2. Анализ тренда временного ряда

Для того чтобы эффективно использовать различные методы временного анализа, крайне важно, чтобы последовательность демонстрировала стабильность, что означает, что ее основные статистические атрибуты сохраняются неизменными в течение времени и пространственных измерений. В частности, это относится к среднему значению и изменчивости. Следовательно, во время начальной фазы анализа временной серии важно оценить ее константность со временем, и если нестационарность обнаруживается, серия должна соответственно трансформироваться в стационарный вид.

Кроме того, если последовательности отсутствует стабильность, то это означает, что среднее значение и/или изменчивость показывают непредсказуемые колебания в разных сегментах образца, потенциально проявляющиеся как резкие прыжки или непрерывные тенденции в данных.

Для оценки непрерывной нестационарности проводится анализ трендовой составляющей. Анализ данных указывает на то, что наблюдается долговременная нестабильность в измеряемом параметре, чья амплитуда значительно превосходит временной интервал исследования. В зависимости от динамики долгосрочных изменений, прослеживаемый тренд может быть, как линейным, так и иметь квадратичную форму.

Уравнение для линейного тренда: $y = a_1 t + a_0 + \varepsilon$, (1)

Уравнение для нелинейного (квадратичного) тренда: $y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 + \varepsilon$
(2), где t – время, a_1 и a_2 – коэффициенты тренда.

Основными характеристиками тренда являются:

1. Коэффициент детерминации R^2 , используемый для оценки линейной зависимости, и корреляционная энергия η^2 , применяемая для анализа нелинейных связей, отражают степень влияния тренда на варьированность данных. Величина этого влияния может варьироваться от высокой до минимальной.

2. Величина тренда – это изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени.

3. Оценка значимости линейного тренда. Она проводится на основе оценки значимости коэффициента тренда a_1 по t -критерию Стьюдента:

Для оценки выдвигается гипотеза:

$$H_0: a_1 = 0;$$

$$H_1: a \neq 0;$$

Для проверки рассчитывается критерий Стьюдента t^* :

$$t_{a1}^* = \frac{|a_1|}{\sigma_{a1}}, \quad \sigma_{a1} = \frac{\sigma_y(1-r^2)}{\sigma_t(\sqrt{N-1})} \quad (3),(4)$$

где σ_a – стандартная случайная погрешность расчета коэффициента a_1 ; r – коэффициент корреляции исходного ряда и ряда времени, σ_y и σ_t – стандартные отклонения исходного ряда и ряда времени; N – длина ряда

Критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-2$, где N -длина ряда.

Сравниваем t^* с $t_{кр}$.

Если $t^* > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, коэффициент тренда значим, следовательно линейный тренд значим.

Если $t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, коэффициент тренда незначим, значит линейного тренда нет.

4. Оценка значимости нелинейного тренда. Она производится на основе оценки значимости коэффициента тренда при нелинейном члене a_2 по t -критерию Стьюдента. Для линейного аналогично.

2.1.3. Гармонический анализ Фурье и спектр

Для выявления циклических компонентов в изучаемом процессе часто применяют гармонический или спектральный анализ.

Основная идея гармонического анализа заключается в способности разбить любой ряд на ограниченное число гармоник с помощью техники Фурье. Эти гармоники являются тригонометрическими функциями, чьи периоды являются кратными длине исходного ряда, то есть каждая гармоника может точно вписаться в исходный ряд определённое количество раз.

Формула гармоники: $G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k)$, $\omega_k = 2\pi/T_k$ (5), (6)

где k – номер гармоники; A_k – амплитуда k -той гармоники; ω_k – частота k -той гармоники; T_k – период k -той гармоники; φ_k – фаза k -той гармоники; t – время.

Полное разложение в ряд Фурье предполагает определение гармоник количеством $N/2$.

Гармоники, как правило, нумеруются. Гармоника № 1 (G_1) имеет период равный длине ряда N , далее период гармоники уменьшается: G_2 имеет период $N/2$; G_3 – $N/3$ и т.д. Последняя гармоника имеет период равный 2 единицы дискретности, соответствующая ей частота называется частотой Найквиста.

Характеристики гармоники определяются на основании коэффициентов Фурье a_k и b_k :

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k \cdot t_i)], \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k \cdot t_i)], \quad (7), (8)$$

где x_i – исходный ряд; N – длина ряда; ω_k – частота k -той гармоники; t_i – ряд времени $t_i = i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Характеристики гармоники определяются по формулам:

$$\text{Амплитуда гармоники; } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (9)$$

$$\text{Фаза гармоники; } \varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi \quad (10)$$

$$\text{Дисперсия гармоники; } D_k = \frac{A_k^2}{2} \quad (11)$$

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда: $V_k = \frac{D_k}{D_y}$ где D_y – дисперсия исходного ряда. (12)

Величина амплитуды гармонического элемента отражает максимальное изменение показателя от его среднего уровня в течение определенного временного отрезка.

Фазовая координата гармонической компоненты представляет собой временной шаг и показывает момент, когда значение достигает своего пика в рамках этого периода.

Вклад в дисперсию от гармонического элемента может быть интерпретирован как эквивалент коэффициента детерминации r^2 . В ходе анализа становится ясно, что этот элемент оказывает значительное воздействие на дисперсию ряда или же его вклад оказывается незначительным.

2.1.4. Корреляционный анализ

Взаимоотношения между двумя переменными могут быть организованы по функциональному или вероятностному принципу.

Чтобы определить степень и характер взаимодействия между этими переменными, используется коэффициент корреляции r .

Если наблюдается прямая связь между двумя переменными, то это означает, что изменение одной из них происходит по прямой линии, приводя к увеличению или уменьшению другой.

На графике, где горизонтальная и вертикальная оси соответствуют значениям двух переменных, точки, отражающие их сочетания, создают облако точек. Это облако часто напоминает овал, с наклонной осью, который демонстрирует природу связи между данными переменными. Пропорция между длиной и шириной этого овала показывает специфику их взаимодействия.

Когда овал превращается в прямую линию, где присутствует только одна ось, это указывает на функциональную связь, где для каждого значения одной переменной есть строго однозначное значение другой, при этом коэффициент корреляции равен единице.

В случае, когда овал трансформируется в круг, что означает, что длины обеих осей равны, связь между переменными считается совершенно случайной. В таком случае для каждого значения одной переменной может быть любое значение другой, а коэффициент корреляции равен нулю.

В большинстве ситуаций взаимосвязь между переменными носит вероятностный характер, то есть каждому уровню первой переменной соответствует определенное значение второй с определённой вероятностью, причем r находится в промежутке $(0, 1)$.

Свойства взаимосвязи определяются на основе анализа изменения значений обеих переменных. Когда одновременное увеличение одной переменной сопровождается ростом другой, это свидетельствует о прямой корреляции, что означает, что r больше нуля. В то же время, когда увеличение одной переменной приводит к снижению другой, мы имеем дело с обратной корреляцией, что соответствует условию r меньше нуля. Коэффициент корреляции может быть рассчитан по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)]}{N\sigma_1\sigma_2} \quad (13)$$

где x_{1i} и x_{2i} – значения первой и второй переменных соответственно; \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – средние значения первой и второй переменных соответственно; σ_1 и σ_2 – стандартные отклонения первой и второй переменных соответственно; N – длина рядов первой и второй переменных.

В рамках проводимого исследования будут рассмотрены и анализированы множественные факторы и их связи, что позволит составить корреляционную таблицу.

Если зависимость между переменными является случайной, то коэффициент корреляции r может варьироваться от высоких до низких значений, демонстрируя степень взаимосвязи между этими переменными. Для того чтобы оценить эту взаимосвязь, необходимо выполнить статистическую проверку значимости коэффициента корреляции, как это было описано в предыдущем разделе.

2.1.5. Множественная линейная регрессия

Часто высота уровня моря связана с другими физическими характеристиками. В данном исследовании будет применен метод множественной линейной регрессии для выявления этой связи.

Общее уравнение связи переменных: $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + b + \varepsilon$, (14)

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

Y и X_i формируют в виде матрицы исходных данных: $(n+1)$ столбцов на N строк.

Для определения коэффициентов линейной регрессии с использованием метода наименьших квадратов необходимо решить систему из n линейных уравнений с n неизвестными. Этот процесс довольно трудоемкий и хорошо изучен в специализированных статистических программных продуктах.

Параметры МЛР для оценки качества модели:

1. Коэффициенты регрессии и их значимость

Оценка значимости коэффициентов регрессии производится на основе проверки гипотезы.

Для оценки выдвигается гипотеза:

$$H_0: a_i = 0;$$

$$H_1: a_i \neq 0;$$

Для проверки рассчитывается критерий Стьюдента t^* :

$$t_{ai}^* = \frac{|a_i|}{\sigma_{ai}}; \quad t_b^* = \frac{|b|}{\sigma_b} \quad (15),(16)$$

где σ_{ai} и σ_b – стандартная случайная погрешность расчета коэффициента a_i и b (рассчитываются совместно с расчетом коэффициентов).

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

Сравниваем t^* с $t_{кр}$.

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

Если $t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, соответствующий коэффициент регрессии незначим.

2. Адекватность регрессионной модели

Для оценки адекватности регрессионной модели выдвигаем нулевую гипотезу о равенстве дисперсий:

$$H_0: D_y = D_\varepsilon;$$

$$H_1: D_y \neq D_\varepsilon;$$

Для проверки используется критерий Фишера $F^* = \frac{D_y}{D_\varepsilon} \cdot \frac{N}{m}$ (17), который сравнивается с $F_{кр}$ при заданном уровне значимости α ($\alpha=0,05$) и степенях свободы $\nu_1=m$, $\nu_2=N-m-1$. Если $F^* > F_{кр}$, то нулевая гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, что означает адекватность регрессионной модели.

3. Коэффициент детерминации R^2

R^2 показывает долю дисперсии исходного ряда, которая описывается моделью регрессии и представляет собой квадрат коэффициента множественной корреляции.

Коэффициент множественной корреляции: $R = \sqrt{\frac{D_y}{D_y}}$ (18)

4. Стандартная ошибка модели $\sigma_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon}$

Модель будет считаться качественной, если выполняются следующие условия:

1. Все коэффициенты регрессии значимы.

2. Коэффициенты детерминации больше 0,70. Это говорит о том, что независимых переменных достаточно для описания дисперсии исходного ряда.

3. Модель должна быть адекватна по F-критерию.

4. Стандартная ошибка модели должна быть меньше стандартного отклонения ряда зависимой переменной y [17].

2.2. Исходные данные

В рамках данной работы были применены данные о годовом уровне Каспийского моря, охватывающие период с 1993 по 2022 годы [5]. Были учтены средние месячные показатели температуры поверхности моря и уровня испарения на трех ключевых точках Каспийского бассейна с начала 1993 года по конец 2022 года. Информационный ресурс, откуда были собраны данные, представляет собой веб-сайт Колумбийского университета, где был выбран источник, предоставленный организацией NOAA (Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы, США) [18,19]. Работа также включает в себя основные климатические показатели, охватывающие временной отрезок с 1993 по 2022 годы, касающиеся Северной Атлантики. Все эти и другие климатические показатели доступны для ознакомления на веб-ресурсе физической научной лаборатории NOAA: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> [20]. К тому же, в исследовании были применены оценки общей теплоотдачи в атмосферу в Бермудской, Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зонах океана (ЭАЗО).

Первая точка: Северный Каспий - 44°76' с.ш. и 48°75' в.д.

Вторая точка: Средний Каспий - 48°856' с.ш. и 50°625' в.д

Третья точка: Южный Каспий - 39°04' с.ш. и 50°625' в.д

Данные для дальнейшей обработки были переведены в среднегодовые. Таблицы исходных данных представлены в приложениях 1 и 2.

ГЛАВА 3 Исследование связей гидрометеорологических процессов и уровня Каспийского моря

Конечно, объем воды, вливающейся в океан через речные системы и атмосферные осадки, имеет ключевое значение для поддержания водного равновесия. Тем не менее, самое значительное влияние оказывает процесс испарения. Этот процесс напрямую связан с свойствами воздушных потоков, пролетающих над водой, и в значительной степени зависит от условий на поверхности моря, включая скорость ветра, температуру воды и воздуха, уровень влажности и прочие факторы. При понижении уровня моря уменьшается его поверхность, что приводит к снижению объема испаряемой воды и, соответственно, к замедлению темпа уменьшения уровня воды [3].

Интенсивность испарения находится в тесной зависимости от климатообразующих факторов. В частности, к ним относится температура воздуха.

Каспийское море играет ключевую роль в комплексной системе, включающей Северную Атлантику, атмосферные процессы, Волжский бассейн и уровень Каспийского моря. Исследования свидетельствуют о том, что объем воды в море подвержен изменениям под влиянием разнообразных гидрологических и атмосферных условий, которые варьируются как в пространстве, так и во времени с разной степенью предсказуемости. На основные колебания объема воды и уровня моря оказывает влияние годовой сток из Волги, который, в свою очередь, зависит от количества осадков в ее бассейне. Изменения в количестве осадков в бассейне Волги в значительной мере связаны с перемещением водяного пара через границы этого региона. Значимо, что перенос водяного пара из Северной Атлантики играет ключевую роль в формировании осадков как зимой, так и летом в бассейне Волги. Повышение активности циклонов в области Северной Атлантики, в частности в пределах Норвежского моря, способствует усилению процесса испарения

воды из поверхности океана и перемещению водяного пара в направлении Европы и бассейна реки Волги. Этот процесс, в свою очередь, приводит к увеличению количества осадков, объема стока по Волге и, как результат, к росту уровня Каспийского моря. В то время как уменьшение циклонической активности в Северной Атлантике наоборот приводит к противоположным изменениям. Таким образом, колебания уровня Каспийского моря являются отражением колебаний в системе водного обмена между океаном, атмосферой и сушей.

Под действием крупномасштабных процессов взаимодействия океана с атмосферой в Северной Атлантике формируется атмосферный перенос. Еще в 1994 году Малинин высказал следующее мнение: «...если вследствие крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике эффективное испарение оказывается выше нормы, то большее количество влаги будет переноситься на континент и, соответственно, большее количество осадков выпадает в бассейне Волги. Следовательно, происходит увеличение годового стока и наблюдается положительное приращение уровня моря. Обратная картина отмечается при ослаблении эффективного испарения в Северной Атлантике. Таким образом, именно изменчивость эффективного испарения является, очевидно, наиболее важным «уровнеобразующим» фактором...» [21].

«При увеличении циклонической активности в Северной Атлантике, особенно в районе Исландской депрессии, наблюдается увеличение испарения и влажности в атмосфере, а также снижение температуры поверхности воды. Это также приводит к увеличению зональной составляющей скорости горизонтального переноса влаги в атмосфере, что определяет количество водяного пара, переносимого системой средней циркуляции атмосферы и крупномасштабными синоптическими вихрями.

При увеличении циклонической активности происходит углубление Исландского минимума давления и его перемещение. Это углубление

усиливает североатлантическое колебание, которое влияет на зональный перенос атмосферы в умеренных широтах за счет средней циркуляции. Все это приводит к увеличению зонального переноса водяного пара в системе общей циркуляции и синоптических вихрях на европейском континенте и территории России. При ослаблении циклонической активности и увеличении антициклонической активности ситуация изменится» [24].

Следовательно, мы можем описать процесс возникновения годовых изменений уровня Каспийского моря через следующую концептуальную схему (см. рисунок 3.1). Эта схема демонстрирует, что предшествующие события, вызывающие колебания уровня моря, связаны с уникальными аспектами взаимодействия между океаном и атмосферой в регионе Северной Атлантики. Следовательно, уровень Каспия отражает общий баланс влаги в системе, включающей в себя океанические и атмосферные процессы, а также земную поверхность.



Рисунок 3.1 Модель генетического развития годовых изменений уровней Каспийского моря [20]

3.1. Влияние Северной Атлантики на уровень Каспия

Для выявления связей между колебаниями циркуляции атмосферы и уровнем Каспийского моря была построена корреляционная матрица среднегодовых значений (таблица 1). В таблице 1 представлены такие индексы как: NAO (Североатлантическое колебание), GSNW (индекс северной стены Гольфстрима), оценки суммарной теплоотдачи в атмосферу в Бермудской, Норвежской и Лабрадорской энергоактивных зонах океана (ЭАЗО), АМО (Атлантическая мультидекадная осциляция), расход ФТ, АО (Арктическая осциляция), ТПО ЛМ (температура моря Лабрадор), ТПО ИМ (температура моря Ирмингера), ТПО ГК (температура Гренландской котловины), среднегодовой уровень Каспийского моря.

Табл.1 Корреляционная матрица индексов Северной Атлантики

	NAO	GSNW	ВБерЭАЗО	ВНьюфаундЭАЗО	ВЛабрЭАЗО	ВНорвЭАЗО	АМО	Расход ФТ	АО	ТПО ЛМ	ТПО ИМ	ТПО ГК	уровень
NAO	1												
GSNW	0,128	1											
ВБерЭАЗО	0,213	0,091	1										
ВНьюфаундЭАЗО	0,284	0,413	0,349	1									
ВЛабрЭАЗО	0,403	0,061	-0,259	0,108	1								
ВНорвЭАЗО	-0,378	-0,120	0,087	-0,280	0,068	1							
АМО	-0,159	-0,327	0,128	-0,469	-0,517	0,290	1						
Расход ФТ	0,304	0,111	0,145	0,225	0,055	-0,053	0,127	1					
АО	0,743	0,191	0,019	0,147	0,310	-0,359	-0,203	0,119	1				
ТПО ЛМ	-0,457	-0,438	-0,077	-0,559	-0,463	0,390	0,714	-0,125	-0,275	1			
ТПО ИМ	-0,560	-0,501	-0,046	-0,489	-0,414	0,436	0,615	-0,275	-0,424	0,918	1		
ТПО ГК	0,299	0,102	0,303	-0,023	-0,226	-0,063	0,461	-0,053	0,187	0,141	0,050	1	
уровень	-0,238	-0,047	-0,096	0,088	0,424	0,175	-0,427	-0,207	-0,248	-0,163	0,047	-0,702	1,000

Видно, что с уровнем моря больше всего связаны ТПО ГК (коэффициент корреляции $r = -0.702$), АМО (коэффициент корреляции $r = -0.427$) и ВЛабрЭАЗО (коэффициент корреляции $r = -0.424$).

Методом включения переменных была рассчитана множественная линейная регрессия. Идея этого метода заключается в том, что на первом шаге выбирается характеристика с более коррелированным индексом, а потом рассчитываются все параметры модели парной регрессии.

Табл.2 Характеристики качества всех моделей и их параметры

шаг	предиктор	R ²	СКО
1	ТПО ГК	0,493	0,423
2	ТПО ГК, АМО	0,507	0,425
3	ТПО ГК, АМО, Влабр ЭАЗО	0,568	0,425
4	ТПО ГК, АМО, Влабр ЭАЗО, АО	0,624	0,386

При проверке значимости коэффициентов корреляции из таблицы 1 было выявлено, что только три характеристики прошли проверку на значимость по t-критерию (ТПО ГК, АМО, ВлабрЭАЗО). В таблице 2 были включены коэффициент детерминации R², который показывает долю дисперсии исходного ряда, которая описывается моделью регрессии, а также СКО (среднее квадратическое отклонение). Оптимальная модель является на третьем шаге, которая включает в себя три переменных, которые имеют вклад 56,8 % в исходный ряд. Стандартная ошибка модели (0,425 м) оказалась меньше стандартного отклонения ряда зависимой переменной y (0,509 м).

Для создания наиболее подходящей модели были вычислены прогнозные показатели уровня Каспийского моря, а также был составлен диаграмма (рис. 3.2), демонстрирующая изменения реальных и прогнозируемых уровней моря в течение времени.

Для наиболее оптимальной модели получилось следующее уравнение:

$$\text{УКМ} = 0,031 * \text{ВлабрЭАЗО} + 0,085 * \text{АМО} - 0,818 * \text{ТПО ГК} - 27,626 \pm \varepsilon$$

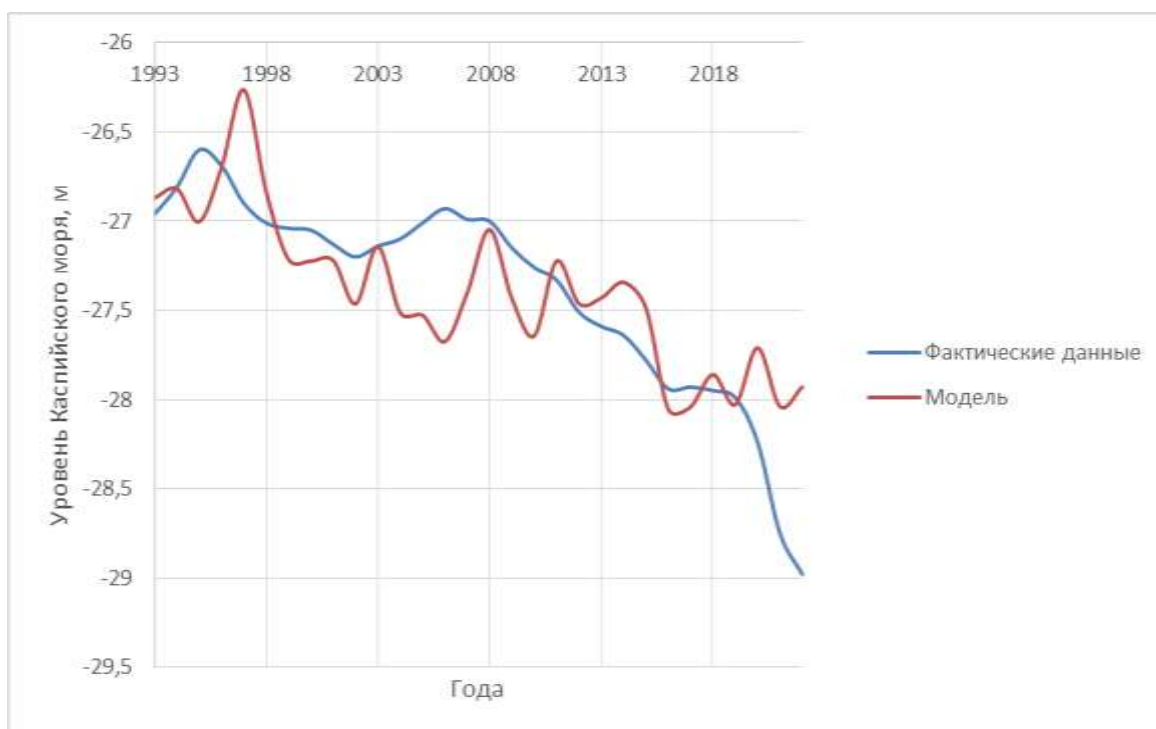


Рисунок 3.2 Фактические и рассчитанные по уравнению регрессии значения уровня моря

Анализируя график 3.2, можно сказать, что модель отражает ход уровня моря и имеет отрицательный тренд, как и тренд фактического ряда соответственно. Самые большие ошибки можно увидеть в 2006 и 2002 годах, 0,755 м и -1,050 м соответственно. Стандартное отклонение ряда УКМ: $\sigma_{\text{УКМ}} = 0,509^{\circ}\text{C}$. Обе ошибки превышают стандартное отклонение ряда, но при этом эта модель довольно с большей точностью может описать исходный ряд.

3.2. Анализ трендовой составляющей временных рядов

Был проведен расчет регрессии, где независимой переменной выступает ряд времени. Затем были сформированы линейные и множественные модели регрессии по формулам (1), (2). Далее были рассчитаны характеристики моделей.

3.2.1. Анализ тренда по уровню моря

Табл.2 Коэффициенты линейной и нелинейной регрессии для среднегодовых значений уровня моря за 1993-2022 гг

Уровень моря, м		
Хар-ка	Линейный тренд	Нелинейный тренд
R^2/η^2	0,792	0,923
σ_ε , м	0,271	0,168
F*	106,780	162,449
a_2	-	-0,003
a_1	-0,059	0,037
a_0	-26,471	-26,985
$t_{a_2}^*$	-	-6,790
$t_{a_1}^*$	-10,333	2,549
$t_{a_0}^*$	-260,945	-274,493
t_{sp}	2,048	

Был построен график временного хода исходного ряда. Также на график были нанесены линейная и нелинейные модели трендов.

Уравнение линейного тренда: $H = -0,059 * t_i - 26,471 \pm \varepsilon$

Уравнение для нелинейного тренда: $H = -0,003 * t_i^2 + 0,037 * t_i - 26,985 \pm \varepsilon$

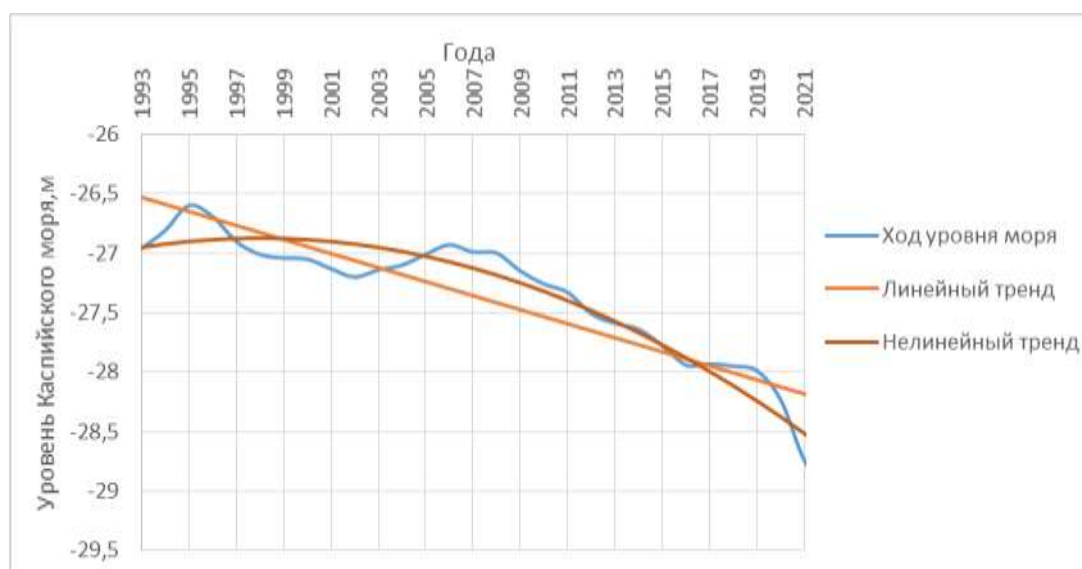


Рисунок 3.3 Межгодовая изменчивость уровня моря и его линейные и нелинейные тренды

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что коэффициент детерминации r^2 (для линейного тренда) составляет 0,792, что

означает вклад линейного тренда в общую дисперсию ряда составил 79,2 %. Корреляционное отношение η^2 (для нелинейного тренда) составляет 0,923, что означает вклад нелинейного тренда в общую дисперсию ряда составил 92,3 %. Величина тренда (только для линейного тренда).

Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и показывает насколько изменяется характеристика за единицу дискретности. $a_1 = -0,059$ м/год. Тогда величина тренда $H = -0,059$ м/год. А значит только за последние 10 лет уровень моря понизился на 0,59 м.

При оценке значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента оба тренда оказались значимыми.

Оба тренда оказались значимыми, а значит они абсолютно точно несут в себе информацию о межгодовой изменчивости уровня моря.

3.2.2. Анализ тренда температуры поверхности

Табл.3 Коэффициенты линейной и нелинейной регрессии для среднегодовых значений температуры поверхности моря за 1993-2022 гг

Хар-ка	Северный Каспий		Центральный Каспий		Южный Каспий	
	Линейный тренд	Нелинейный тренд	Линейный тренд	Нелинейный тренд	Линейный тренд	Нелинейный тренд
R^2/η^2	0,646	0,701	0,665	0,693	0,695	0,730
σ_{ε} , м	0,623	0,583	0,391	0,381	0,310	0,297
F^*	51,058	31,636	55,673	30,541	63,685	36,577
a_2	-	0,004	-	0,002	-	0,002
a_1	0,094	-0,016	0,062	0,011	0,052	0,005
a_0	11,075	11,662	14,344	14,615	17,479	17,733
$t_{a_2}^*$	-	2,230	-	1,573	-	1,894
$t_{a_1}^*$	7,145	-0,317	7,461	0,325	7,980	0,180
$t_{a_0}^*$	47,451	34,097	97,902	65,358	150,413	101,852
$t_{кр}$	2,048					

Изучив выводы исследования, можно утверждать, что нелинейные тенденции в различных секторах моря не проявили статистическую значимость в ходе теста на основе t-статистики Стьюдента. В то же время, все линейные тенденции успешно прошли критерии значимости. Кроме того,

линейные тенденции в каждой из исследованных зон моря вносят примерно равный вклад в изменение дисперсии исходных данных: 64,6% в Южном Каспии, 66,5% в Среднем Каспии и 69,5% в Северном Каспии. На основе проведённого анализа предлагается создать график изменения температуры в Южном Каспии, включающий в себя изображения как линейных, так и нелинейных тенденций.

$$\text{Уравнение линейного тренда: } T = 0,052 * t_i + 17,479 \pm \varepsilon$$

$$\text{Уравнение для нелинейного тренда: } T = 0,002 * t_i^2 + 0,005 * t_i + 17,733 \pm \varepsilon$$

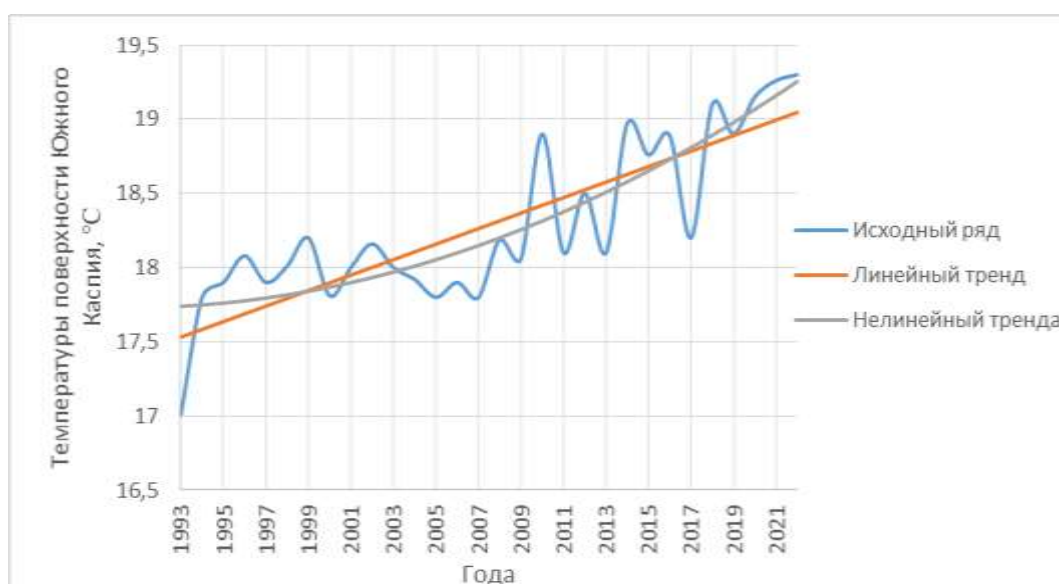


Рисунок 3.4 Межгодовая изменчивость температуры Южного Каспия и его линейные и нелинейные тренды

Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и показывает насколько изменяется характеристика за единицу дискретности. $a_1 = 0,052$ °C/год. Тогда величина тренда $T = 0,052$ °C/год. Температура поверхности Южного Каспия имеет положительную величину и по графику линии тренда также видно положительный рост. Температура увеличилась на 1,5 °C и это только за последние 30 лет.

3.2.3. Анализ тренда испарения

Табл.4 Коэффициенты линейной и нелинейной регрессии для среднегодовых значений испарения с поверхности моря за 1993-2022 гг

Хар-ка	Северный Каспий		Центральный Каспий		Южный Каспий	
	Лин. тренд	Нелин. тренд	Лин. тренд	Нелин. тренд	Лин. тренд	Нелин. тренд
R^2/η^2	0,212	0,325	0,007	0,239	0,290	0,614
σ_ε , м	0,112	0,106	0,153	0,136	0,151	0,113
F*	7,549	6,506	0,188	4,231	11,427	21,462
a2	-	-0,001	-	-0,001	-	-0,001
a1	-0,007	0,013	-0,001	0,032	0,011	0,056
a0	1,284	1,183	1,247	1,070	1,153	0,910
ta2*	-	-2,125	-	-2,868	-	-4,760
ta1*	-2,748	1,356	-0,434	2,665	3,380	5,708
ta0*	30,575	19,080	21,778	13,393	20,412	13,696
$t_{\text{кр}}$	2,048					

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что только в Южном Каспии оба тренда оказались значимы. В южной части моря линейный и нелинейные тренды описывают 29 % и 61,4 % дисперсии исходного ряда. В Центральном Каспии линейный тренд оказался незначим, линейный тренд описывает всего 0,7 % дисперсии исходного ряда, а нелинейный тренд 23,9 %. В Северном Каспии линейный и нелинейный тренды также имеют незначительный вклад в дисперсию исходного ряда, 21,2 % и 32,5 % соответственно.

Исходя из анализа, построим график временного хода исходного ряда испарения Южного Каспия с графиками линейного и нелинейного трендов.

$$\text{Уравнение линейного тренда: } E = 0,011 * t_i + 1,153 \pm \varepsilon$$

$$\text{Уравнение для нелинейного тренда: } E = -0,001 * t_i^2 + 0,056 * t_i + 0,910 \pm \varepsilon$$



Рисунок 3.5 Межгодовая изменчивость испарения Южного Каспия и его линейные и нелинейные тренды

Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и показывает насколько изменяется характеристика за единицу дискретности. $a_1 = 0,011$ м/год. Тогда величина тренда $E = 0,011$ °C/год. Испарение поверхности Южного Каспия имеет положительную величину и по графику линии тренда также видно положительный рост. Испарение с поверхности моря увеличилось на 0,5 м и это только за последние 30 лет.

3.3. Гармонический анализ Фурье

Из исходного ряда был удален тренда. Получается ряд отклонений. Далее в программе PAST4 были рассчитана периодограмма для ряда отклонений от тренда. Рисунок спектра и ему соответствующая таблица перенесены в MS Excel. Затем по формулам (5) – (12) были рассчитаны характеристики гармоник. Далее была проведена оценка значимости гармоник и построены нужные графики.

3.3.1. Гармонический анализ Фурье по уровню моря

Табл.5 Параметры гармоник временного ряда для среднегодовых значений уровня моря

	Период, год	Вклад гармоник, %	Вклад тренда, %
Уровень моря	25,641	13,1	64,6
	9,259	3,0	
	5,650	2,6	
Итого		18,7	

При оценке значимости только первые три гармоники прошли проверку на значимость. Гармоники имеют незначительный вклад каждая. Сумма трех значимых гармоник оказалась 18,7 %, однако вместе с трендом они имеют вклад более 80% в дисперсию исходного ряда.

Был построен совмещенный график общей гармоник от отклонений.

Уравнения гармоник:

Гармоника 1: $G_k=0,299*\cos(0,245*t-0,041)$

Гармоника 2: $G_k=0,678*\cos(0,678*t-0,010)$

Гармоника 3: $G_k=1,112*\cos(0,177*t-0,005)$

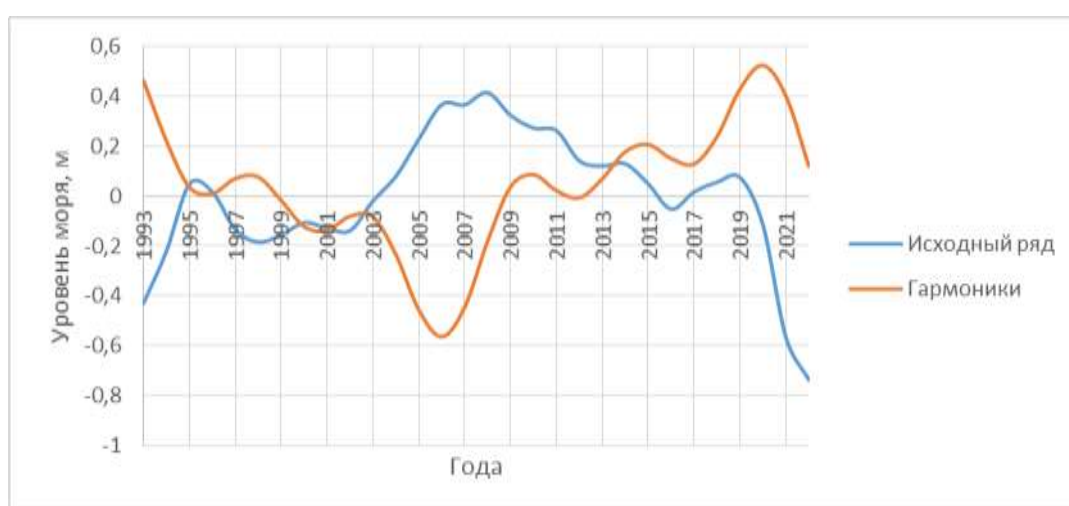


Рисунок 3.6 Совместный график трех гармоник и среднегодовых отклонений уровня моря

Анализируя полученный график, можно сказать, что ход общей гармоник и отклонений отличаются. Фазами, которые характеризуют время наступления максимума в некотором периоде, являются: для гармоник с периодом 25 лет 0,041 рад в 1993 году; для гармоник с периодом 9 лет -0,010 рад в 1993 году; для гармоник с периодом 5 лет 0,005 рад в 1993 году.

Для гармоник с периодом 25 лет первый максимум наступит в 1993 году, второй максимум наступит в 2018.

Для гармоник с периодом 9 лет первый максимум наступит в 1993 году, второй максимум наступит в 2002 году, а третий в 2011 году.

Для гармоник с периодом 5 лет первый максимум наступит в 1993 году, второй максимум наступит в 1998 году, а третий 2003 году.

3.3.2. Гармонический анализ Фурье по температуре моря

Табл. 6 Оценка вклада в дисперсию значений температуры моря гармоник и тренда

	Период, год	Вклад гармоник, %	Вклад тренда, %
Северный Каспий	4,000	8,6	64,6
	9,259	5,8	
	3,367	5,5	
	29,412	4,8	
	2,899	4,1	
Итого		28,8	
Средний Каспий	3,367	6,8	66,5
	5,051	5	
	4,000	5,2	
	12,195	4,3	
	2,000	8,5	
Итого		29,8	
Южный Каспий	23,256	7,2	69,5
	2,000	11,1	
	2,016	10,6	
	1,965	9,1	
	2,169	4	
Итого		42	

Из таблицы 6 видно, что гармоники по отдельности имеют невесомый вклад в общую дисперсию ряда, однако их сумма имеет значительный вклад. Вместе с трендом они полностью описывают ход исходного ряда. В Южном Каспии вообще отсутствуют случайные колебания. Все гармоники оказались значимы.

Далее был построен совмещенный график гармоники от отклонений в Южном Каспии.

Уравнения гармоник:

$$\text{Гармоника 1: } G_k = 0,210 \cdot \cos(0,270 \cdot t - 0,010)$$

$$\text{Гармоника 2: } G_k = 0,260 \cdot \cos(3,140 \cdot t + 0,002)$$

$$\text{Гармоника 3: } G_k = 0,254 \cdot \cos(3,115 \cdot t + 0,027)$$

$$\text{Гармоника 4: } G_k = 0,125 \cdot \cos(3,197 \cdot t - 0,025)$$

$$\text{Гармоника 5: } G_k = 0,155 \cdot \cos(2,895 \cdot t - 0,012)$$

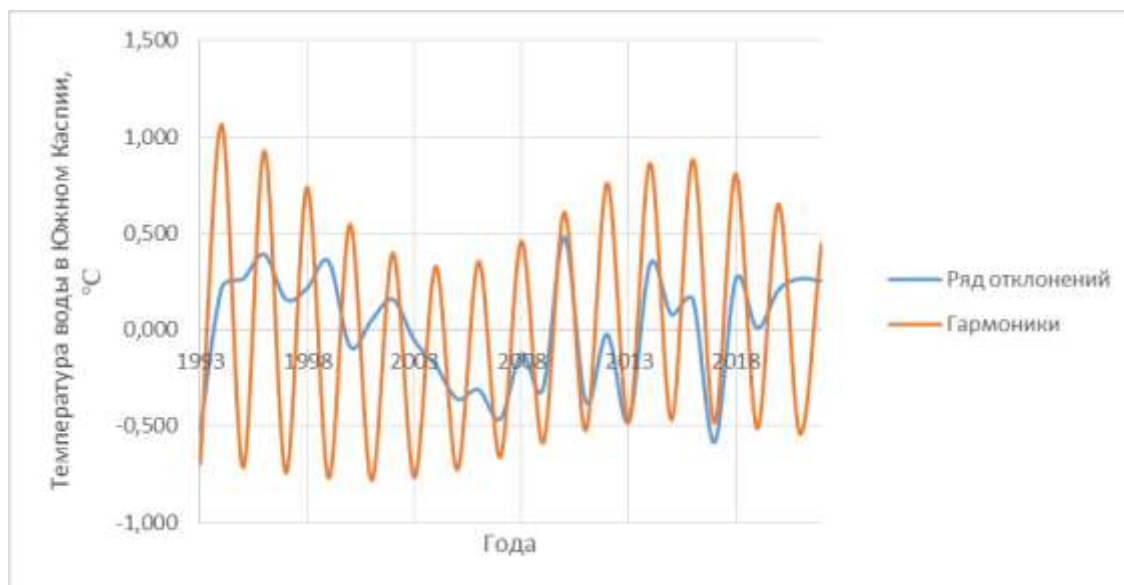


Рисунок 3.7 Совместный график пяти гармоник и среднегодовых отклонений температуры моря

Анализируя полученный график, можно сказать, что ход общей гармоники и отклонений отличаются, но прослеживается общий характер.

Фазами, которые характеризуют время наступления максимума в некотором периоде, являются: для гармоника с периодом 23 года 0,010 рад в 1993 году; для гармоника с периодом 2 года -0,002 рад в 1992 году; для гармоника с периодом 2,016 года -0,027 рад в 1992 году; для гармоника с периодом 1,965 года 0,025 рад в 1993 году; для гармоника с периодом 2,169 года 0,012 рад в 1993 году.

Для гармоника с периодом 23 года первый максимум наступит 1993 году, второй максимум наступит в середине 2016 году.

Для гармоника с периодом 2 года первый максимум наступит 1994 году, второй максимум наступит в середине 1996 году, третий максимум наступит в 1998 году.

Для гармоника с периодом 2,016 года первый максимум наступит 1992 году, второй максимум наступит в середине 1994 году, третий максимум наступит в 1996 году.

Для гармоника с периодом 1,965 года первый максимум наступит 1993 году, второй максимум наступит в середине 1994 году, третий максимум наступит в 1996 году.

Для гармоника с периодом 2,169 года первый максимум наступит 1993 году, второй максимум наступит в середине 1995 году, третий максимум наступит в 1997 году.

3.3.3. Гармонический анализ Фурье по испарению моря

Табл. 7 Анализ влияния гармонических и линейных трендов на дисперсию параметров испарения над морским горизонтом

	Период, год	Вклад гармоника, %	Вклад тренда, %
Северный Каспий	23,256	15,2	21,2
	5,814	12,1	
	2,016	17,2	
	1,934	9,5	
Итого		54	
Средний Каспий	23,256	30,9	0,7
	7,463	20,2	
	4,831	14,1	
Итого		65,2	
Южный Каспий	23,256	41,9	29
	6,098	10,3	
Итого		52,2	

В таблице 7 представлены только значимые гармоники. В Среднем Каспии вклад гармоник в дисперсию исходного ряда гораздо больше, чем в других частях моря. Вклад в Северном и Южном Каспии практически одинаковый (54% и 52,2% соответственно). Однако в Южном Каспии вместе с трендом гармоника описывает более 80% изменчивости исходного ряда, что является самым высоким показателем среди других частей моря.

Далее был построен совмещенный график гармоники от отклонений в Южном Каспии.

Уравнения гармоник:

$$\text{Гармоника 1: } G_k = 0,161 * \cos(0,270 * t - 0,007)$$

$$\text{Гармоника 2: } G_k = 0,080 * \cos(1,030 * t - 0,002)$$

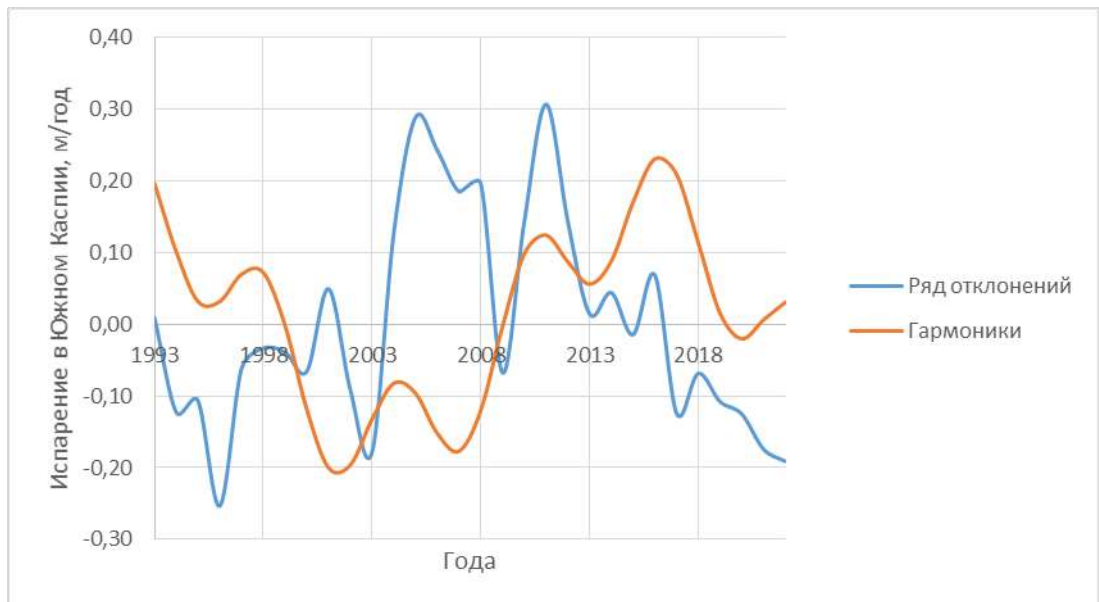


Рисунок 3.8 Совместный график двух гармоник и среднегодовых отклонений испарения с поверхности моря

Анализируя полученный график, можно сказать, что ход общей гармоник и отклонений отличаются, но прослеживается общий характер. Фазами, которые характеризуют время наступления максимума в некотором периоде, являются: для гармоник с периодом 23 года 0,007 рад в 1993 году; для гармоник с периодом 6 лет 0,002 рад в 1993 году

Для гармоник с периодом 23 года первый максимум наступит начале 1993 года, второй максимум наступит в 2016 году.

Для гармоник с периодом 6 лет первый максимум наступит начале 1993 года, второй максимум наступит в 1999 году, третий максимум наступит в 2005 году.

3.4. Корреляционный анализ

Далее была рассчитана корреляционная матрица среднегодовых значений уровня моря, температуры моря и испарения для трех частей моря. В таблице 8 представлены температура воды Северного Каспия (T_c , °C), Среднего Каспия (T_c , °C) и Южного Каспия (T_y , °C); испарение с поверхности

Северного Каспия (Ис, м/год), Среднего Каспия (Иц, м/год) и Южного Каспия (Ию, м/год); уровень Каспийского моря (УКМ, м).

Табл.8 Корреляционная матрица для среднегодовых значений уровня моря, температуры воды и испарения с поверхности моря

	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_{ц}, ^\circ\text{C}$	$T_{ю}, ^\circ\text{C}$	$I_c, \text{ м/год}$	$I_{ц}, \text{ м/год}$	$I_{ю}, \text{ м/год}$	$УКМ, \text{ м}$
$T_c, ^\circ\text{C}$	1						
$T_{ц}, ^\circ\text{C}$	0,925	1					
$T_{ю}, ^\circ\text{C}$	0,864	0,912	1				
$I_c, \text{ м/год}$	-0,443	-0,360	-0,453	1			
$I_{ц}, \text{ м/год}$	-0,142	-0,032	-0,100	0,685	1		
$I_{ю}, \text{ м/год}$	0,310	0,384	0,244	0,193	0,502	1	
$УКМ, \text{ м}$	-0,830	-0,780	-0,829	0,560	0,235	-0,235	1

Все коэффициенты корреляции в матрице проверены на значимость по t-критерию Стьюдента.

Когда значение t^* превышает пороговую величину $t_{кр}$, нулевая гипотеза отбрасывается, что указывает на то, что коэффициент корреляции имеет статистическую значимость, то есть между двумя изучаемыми переменными установлена статистически значимая прямая (или обратная, в зависимости от знака) взаимосвязь. В случае, когда t^* оказывается меньше $t_{кр}$, предполагается, что нет достаточных оснований для отклонения нулевой гипотезы, что означает, что коэффициент корреляции не имеет статистической значимости, то есть между двумя переменными не обнаружена статистически значимая линейная взаимосвязь. Результаты представлены в таблице 9.

Табл.9 Значения коэффициентов Стьюдента для среднегодовых значений уровня моря, температуры воды и испарения с поверхности моря (желтым отмечены значимые коэффициенты корреляции) ($t_{кр}=2,048$)

t^*	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_y, ^\circ\text{C}$	$T_{ю}, ^\circ\text{C}$	$I_c, \text{м/год}$	$I_y, \text{м/год}$	$I_{ю}, \text{м/год}$	$УКМ, \text{м}$
$T_c, ^\circ\text{C}$	1						
$T_y, ^\circ\text{C}$	35,218	1					
$T_{ю}, ^\circ\text{C}$	18,644	29,663	1				
$I_c, \text{м/год}$	-3,020	-2,266	-3,121	1			
$I_y, \text{м/год}$	-0,794	-0,178	-0,554	7,059	1		
$I_{ю}, \text{м/год}$	1,879	2,463	1,419	1,100	3,674	1	
$УКМ, \text{м}$	-14,634	-10,885	-14,518	4,462	1,360	-1,362	1

Из таблицы 9 видно, что между уровнем моря и температурой моря существует значительная связь. Коэффициент может быть, как положительный, так и отрицательный. Если он положительный, то это значит, что при возрастании одной переменной, возрастает вторая. А если отрицательный, то при возрастании одной переменной, вторая убывает. Так как в этой работе несколько переменных, то для получения коэффициентов корреляции была использована матрица, которая называется корреляционной.

Связь между уровнем моря и испарением очень слабая. Между температурами в разных частях моря прослеживается очень высокая связь, а значит межгодовые колебания температуры происходят синхронно.

Были построены графики связи: 1) Уровень Каспийского моря и T (северной части) – с максимальным коэффициентом корреляции (по модулю); 2) T (северной части) и T (центральной части) – с максимальным коэффициентом корреляции (по модулю).

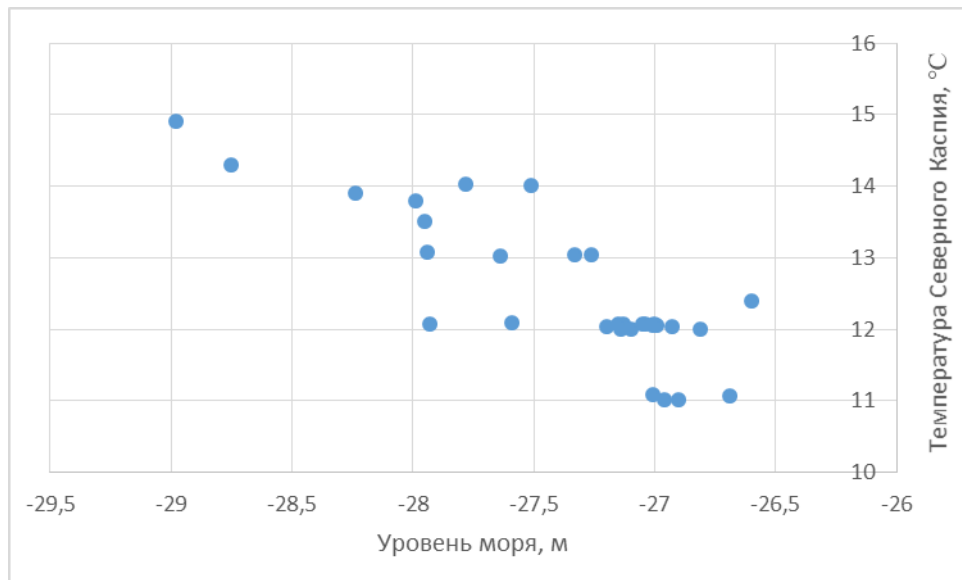


Рисунок 3.9 График связи УКМ и Тс (с максимальным коэффициентом корреляции) за период с 1993 по 2022 гг

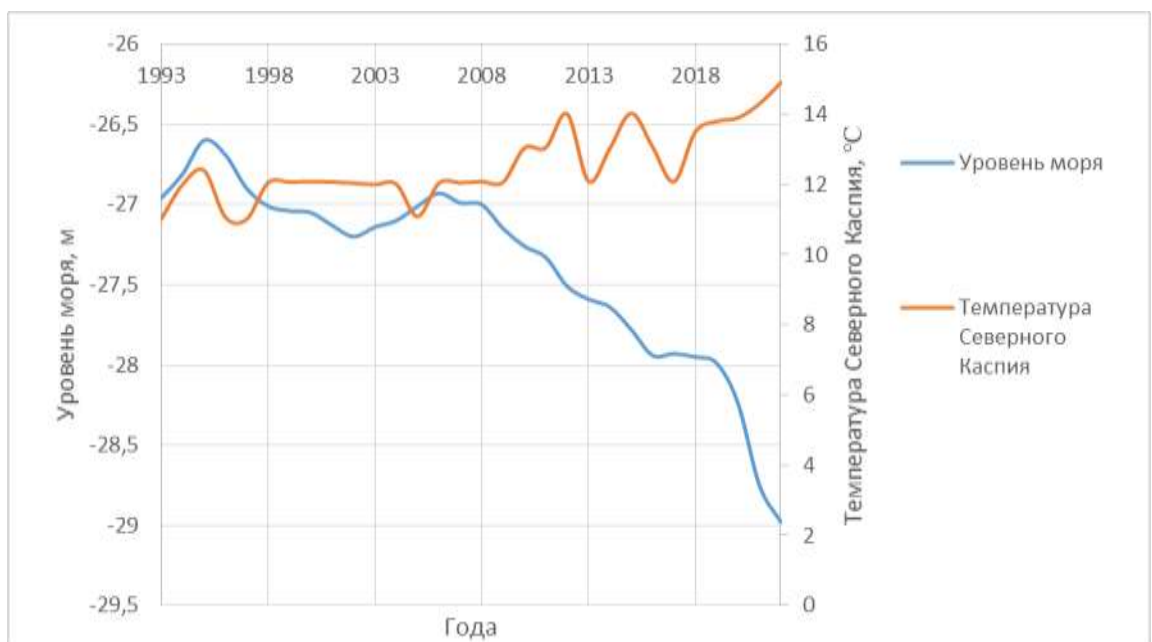


Рисунок 3.10 График временной изменчивости УКМ и Тс за период с 1993 по 2022 гг

Из рисунков 3.9 и 3.10 видно, что связь является стохастической, т.е. одному значению УКМ соответствует некоторое значение Тс с определенной вероятностью, $r = -0,830$, кк со знаком «-», а значение близко к 1, т.к. облако точек распространяется от правого нижнего угла к левому верхнему.

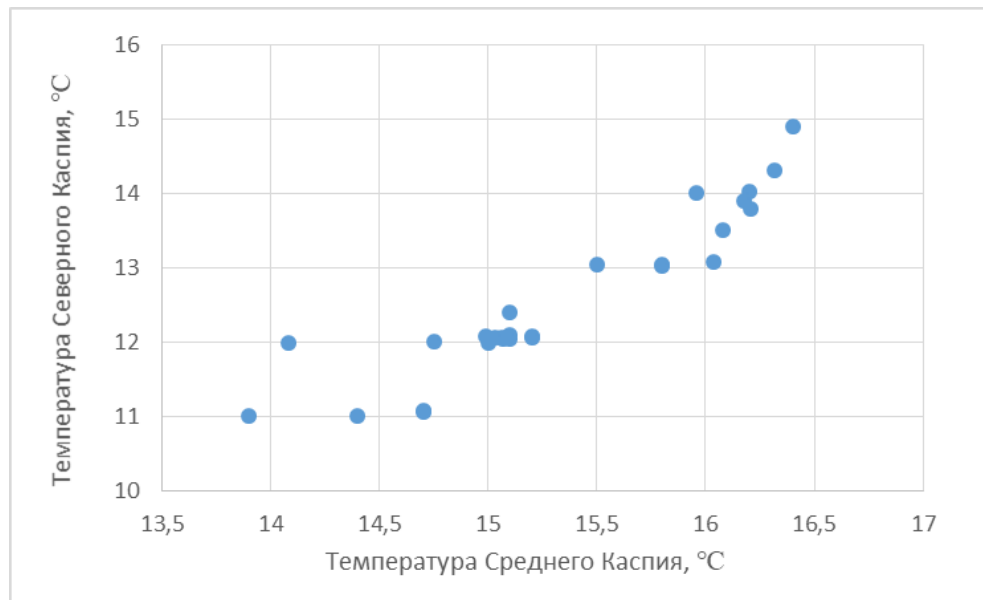


Рисунок 3.11 График связи T_c и T_z (с максимальным коэффициентом корреляции) за период с 1993 по 2022 гг

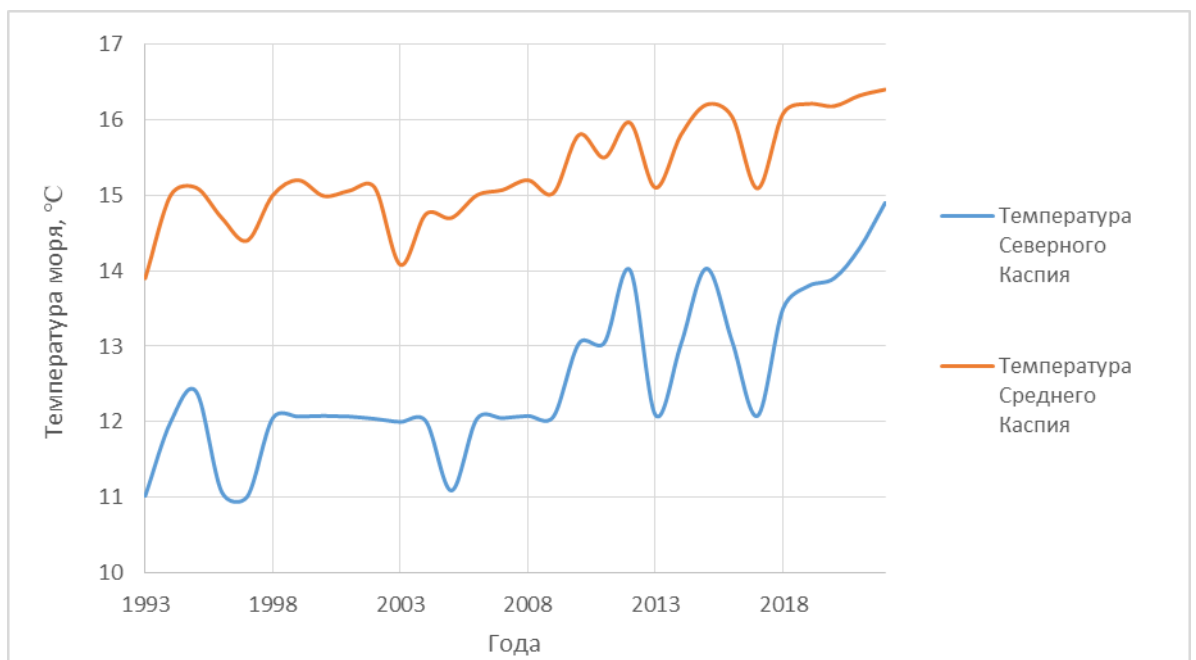


Рисунок 3.12 График временной изменчивости T_c и T_z за период с 1993 по 2022 гг

Из рисунков 3.11 и 3.12 видно, что связь является стохастической, т.е. одному значению T_c соответствует некоторое значение T_z с определенной вероятностью, $r = 0,925$, кк со знаком «+», а значение близко к 1, т.к. облако точек распространяется от левого нижнего угла к правому верхнему.

Также между испарением разными частями моря наблюдается связь, особенно для соседних районов: между северным и средним, между средним и южным. Далее был построен график связи: И_с (северной части) и И_ц (центральной части) – с максимальным коэффициентом корреляции (по модулю).

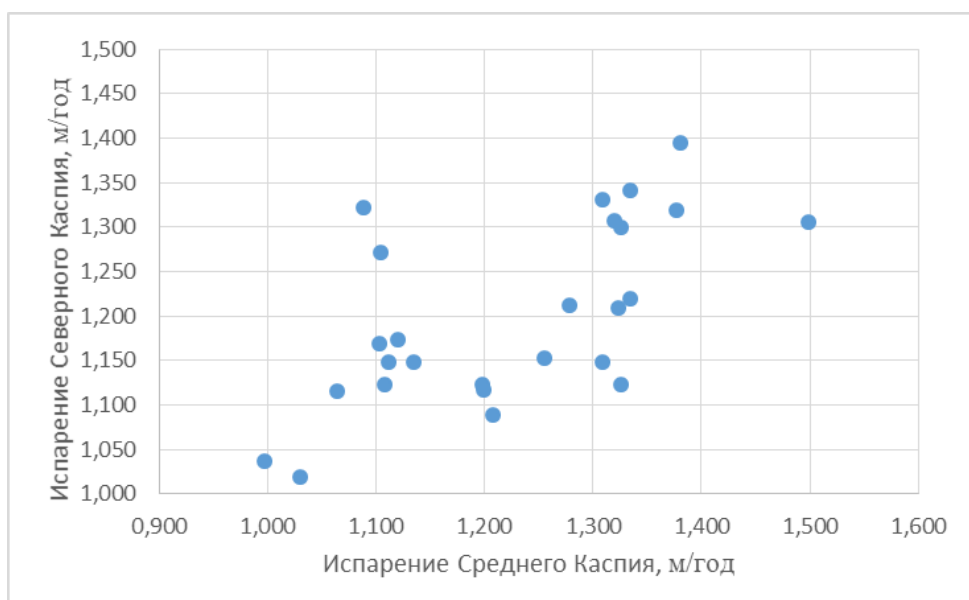


Рисунок 3.13 График связи Ис и Иц (с максимальным коэффициентом корреляции) за период с 1993 по 2022 гг

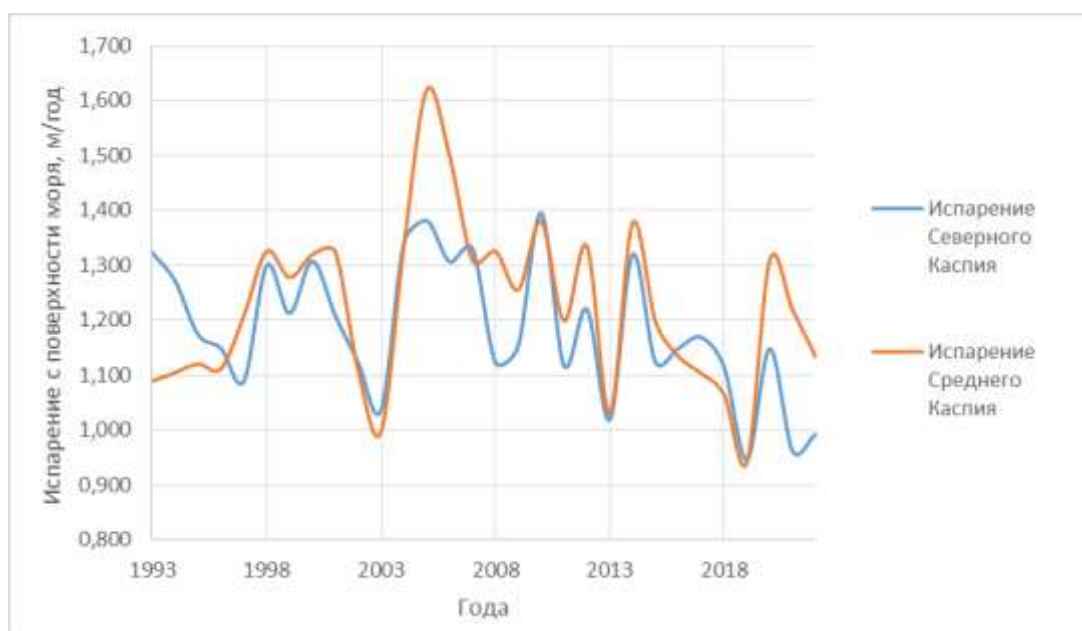


Рисунок 3.14 График временной изменчивости Ис и Иц за период с 1993 по 2022 гг

Из рисунков 3.13 и 3.14 видно, что связь является стохастической, т.е. одному значению I_c соответствует некоторое значение I_{cc} с определенной вероятностью, $r = 0,685$, кк со знаком «+», а значение близко к 1, т.к. облако точек распространяется от левого нижнего угла к правому верхнему.

Анализ, проведенный выше, показывает, что между гидрометеорологическими характеристиками существует стохастическая связь. Между температурой и уровнем Каспийского моря существует прямая связь, а это значит, что при повышении температуры повышается и испарение, и это приводит к уменьшению уровня моря.

Температура и испарение увеличиваются с севера на юг. Однако Северная часть моря является мелководной, а значит она более подвержена колебаниями уровня моря в сравнение, например, с Южным Каспием.

3.5. Множественная линейная регрессия

Модель многофакторной линейной регрессии была создана для анализа взаимосвязи между уровнем Каспийского моря, испарением и температурой воды. Используя пошаговую регрессию с этапом исключения переменных, были определены параметры всех линейных регрессионных моделей. В таблице 9 представлены данные о качестве этих моделей и их критические показатели. В таблице отмечены значения, которые свидетельствуют о высоком качестве модели.

Табл.10 Характеристики качества всех моделей и их критические значения

шаг	КОЛ-ВО переменных	t^*_{\min}	$t_{кр}$	F^*	$F_{кр}$	R^*	δ_{ε}	δ_{η}	переменные	вклад, %
1	6	0,33	2,03	14,05	2,39	0,786	0,304	0,584	<u>Тс.Тц.Тю.</u> <u>Ис.Иц.Ию</u>	0,11
2	5	-0,92	2,03	17,48	2,49	0,785	0,298	0,584	<u>Тс.Тц.Тю.</u> <u>Ис.Ию</u>	0,76
3	4	0,78	2,03	21,77	2,64	0,777	0,297	0,584	<u>Тс.Тц.Тю.</u> <u>Ис</u>	0,00
4	3	1,93	2,03	29,26	2,87	0,777	0,295	0,584	<u>Тс.Тю.Ис</u>	3,84
5	2	-2,26	2,03	38,13	3,25	0,739	0,309	0,584	<u>Тс.Тю</u>	4,93
6	1	-7,88	2,03	62,11	4,1	0,709	0,331	0,584	<u>Тс</u>	68,93

Из таблицы 10 видно, что коэффициенты регрессии были проверены на значимость при уровне значимости 0.05 и $t_{кр} = 2,03$, t^*_{\min} оказались разными. Мало значений оказались значимыми. Таким образом, на 5 шаге $t^* > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, соответствующий коэффициент регрессии значим только при двух значениях t^* ($t^*_1 = -2,26$; $t^*_2 = -7,88$). Так как на всех шагах коэффициенты детерминации оказались больше 0,70, то оптимальная модель выбиралась по наименьшей стандартной ошибке модели и значимости коэффициентов.

Был рассчитан вклад в дисперсию (последний столбик) для того, чтобы узнать сколько каждый коэффициент вкладывает в значение ряда УКМ. Из таблицы 10 видно, что самый большой вклад имеет температура Северного Каспия (68,93%), а самый маленький – температура Среднего Каспия (0 %).

Для оптимальной модели были рассчитаны модельные значения уровня Каспийского моря и был построен график временной изменчивости фактических и модельных значений уровня.

Для полной модели получилось следующее уравнение:

$$\text{УКМ} = -0,306 \cdot \text{Тс} + 0,303 \cdot \text{Тц} - 0,594 \cdot \text{Тю} + 0,836 \cdot \text{Ис} + 0,208 \cdot \text{Иц} - 0,413 \cdot \text{Ию} - 18,022 \pm \varepsilon$$

Для наиболее оптимальной модели получилось следующее уравнение:

$$\text{УКМ} = -0,255 \cdot T_c - 0,466 \cdot T_{\text{Ю}} - 15,66 \pm \varepsilon$$

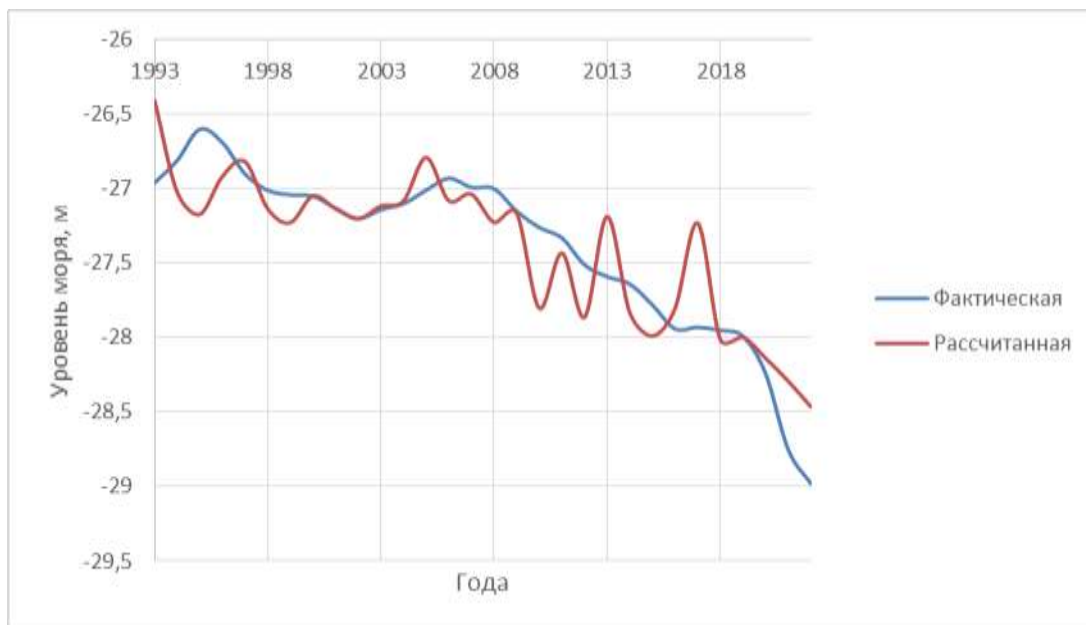


Рисунок 3.15 Фактические и рассчитанные по уравнению регрессии значения уровня моря

Анализируя график, можно сказать, что модель отражает ход уровня моря и имеет отрицательный тренд, как и тренд фактического ряда соответственно. Самые большие ошибки можно увидеть в 1995 и 2017 годах, 0,57 м и -0,70 м соответственно. Стандартное отклонение ряда УКМ: $\sigma_{\text{УКМ}} = 0,584^\circ\text{C}$. Одна из ошибок, которая отмечается в 2017 году значительно превышает стандартное отклонение ряда и ошибку модели (0,309 м). Однако модель, которая основывается лишь на двух параметрах (температура Северного Каспия, и температура Южного Каспия) с довольно большой точностью может описать межгодовую изменчивость уровня Каспийского моря.

Заключение

В ходе этого исследования было проведено тщательное рассмотрение изменений уровня морской поверхности в течение года, используя данные, полученные с помощью альтиметрии. Также был оценен вклад гидрометеорологических условий в колебания уровня Каспийского моря.

В процессе исследования был проанализирован связь между годовыми колебаниями уровня Каспийского моря и разнообразными климатическими показателями в Северной Атлантике. Применяя ряд статистических методов, было изучено влияние уровня моря, температуры поверхностных вод и испарения на различные сектора моря. В результате анализа было установлено, каким образом каждая из рассмотренных характеристик влияет на уровень Каспийского моря. Результаты анализа:

1. Путем анализа данных была построена оптимальная модель, которая включает в себя три ключевых компонента: температуру Гренландской котловины, Атлантическую мультидекадную осцилляцию и суммарную теплоотдачу Лабрадорской энергоактивной зоны Атлантического океана. Разработанная модель отражает динамику уровня моря и демонстрирует отрицательную тенденцию, согласно наблюдаемой тенденции в реальных данных. Наибольшие расхождения наблюдаются в 2006 и 2002 годах, со значениями 0,755 м и -1,050 м соответственно. Стандартное отклонение временного ряда составляет $0,509^{\circ}\text{C}$. Обе погрешности превышают стандартное отклонение ряда, однако данная модель способна с высокой точностью описывать исходные данные уровня моря.

2. Анализ тренда показал, что тренды вносят значительный вклад в межгодовой ход уровня моря и показывает, что данный анализ дает наилучшую оценку. При анализе трендов межгодовой изменчивости температуры поверхности моря оказалось, что линейные тренды во всех частях моря дают примерно одинаковый вклад в дисперсию исходных рядов

(64,6 % в Северном Каспии, 66,5 % в Среднем Каспии и 69,5 % в Южном Каспии). В межгодовой изменчивости испарения в разных частях Каспийского моря результаты оказались ниже всего. Линейные тренды дают меньше всего вклад в дисперсию исходных рядов (21,2 % в Северном Каспии, 0,7 % в Среднем Каспии и 29 % в Южном Каспии)

3. Однако при анализе тренда было выяснено, что трендовая составляющая не до конца описывает исходный ряд, поэтому был проведен гармонический анализ. Размер вклада гармоник, связанных с уровнем моря, оказался незначительным, их общий вклад в дисперсию исходного ряда составляет всего 18,7%. В случае с гармониками, связанными с температурой, результаты были более впечатляющими (28,8% в Северном Каспии, 29,8% в Среднем Каспии, 42% в Южном Каспии): в сочетании с трендом они почти полностью описывают колебания исходных данных. Когда дело касается гармоник, связанных с испарением, картина отличается (54% в Северном Каспии, 65,2% в Среднем Каспии, 52,2% в Южном Каспии): вклад тенденции становится несущественным, и в основном изменения ряда определяются гармониками, которые практически полностью описывают его динамику.

4. После проведения корреляционного анализа было установлено, что существует тесная зависимость между температурой Северного Каспия и уровнем воды (-0,830), что означает, что изменение температуры напрямую влияет на уровень моря. Взаимосвязь между испарением Северного Каспия и уровнем моря является незначительной (0,560), поэтому нельзя утверждать, что испарение полностью определяет уровень воды. Следовательно, увеличение температуры приводит к снижению образования льда в Северном Каспии и уменьшению влагообмена с реками. Все эти процессы в совокупности влияют на колебания уровня моря, приводя к его уменьшению.

5. Также была построена множественная линейная регрессия, которая показала, как гидрометеорологические факторы влияют на уровень Каспийского моря. В оптимальную модель были включены температуры Северного и Южного Каспия. Согласно модели, изменения уровня моря

имеют отрицательную тенденцию, аналогичную тенденции фактических данных. Наибольшие отклонения от нормы были зафиксированы в 1995 и 2017 годах: +0,57 м и -0,70 м соответственно. Стандартное отклонение уровня Каспийского моря составляет 0,584 м. Основанная на двух параметрах (температуре Северного и Южного Каспия), с высокой точностью может описать изменения уровня моря на протяжении нескольких лет.

В обзорной монографии [3], охватывающей практически все аспекты изучения водного баланса, колебаний уровня моря и методов их прогнозирования, отмечается недостаток ясного понимания механизмов, управляющих изменчивостью уровня. Однако еще в 1990-х годах одним из авторов [21,22] были рассмотрены такие механизмы в рамках генетической модели формирования межгодовых колебаний уровня моря, и был сделан вывод о том, что «уровень Каспия следует рассматривать как интегральный показатель крупномасштабного влагообмена в системе "океан - атмосфера - суша". Можно утверждать с уверенностью, что генезис межгодовых колебаний уровня моря обусловлен особенностями крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в Северной Атлантике. В данной работе представлена детализация генетической концепции, связанная с уточнением влияния Северной Атлантики на зональный перенос атмосферной влаги в Европу, который в свою очередь влияет на изменчивость уровня Каспийского моря» [21].

Список литературы:

1. Каспийское море // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
2. Каспийское море, Том 2 НАЦИОНАЛЬНЫЙ АТЛАС РОССИИ. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/258-262.html> (дата обращения: 15.05.2024).
3. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. [Электронный ресурс] URL: <https://method.meteorf.ru/publ/books/kaspiy.pdf> (дата обращения: 15.05.2024).
4. Каспийское море / М. Г. Деев, В. Е. Хаин // Канцелярия конфискации — Киргизы [Электронный ресурс]. — 2009275. — С. 275. — (Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов; 2004—2017, т. 13). — ISBN 978-5-85270-344-6.
5. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е — 2017 гг.) [Текст] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 7. С. 195—207.
6. Информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря № 16, 27 сентября 2018 г. URL: http://www.caspc.com/files/CASPCOM_bulletin16_1.pdf (Дата обращения: 19.05.2024).
7. Прогноз уровня казахстанской части Каспийского моря на 7 – 12 декабря 2023 г. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/post/2449> (Дата обращения: 12.05.2024).
8. Электронный атлас Каспийского моря. [Электронный ресурс] URL: <http://www.geogr.msu.ru/casp/> (дата обращения 15.05.2024).
9. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия/ А. Д. Добровольский. — М.: Наука, 1986. — С. 38—48. — 261 с. URL:

<http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/sea/Каспийское%20море.pdf>

(дата обращения 17.05.2024)

10. Прогноз параметров ветрового волнения. [Электронный ресурс] URL: <http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/opermodule> (дата обращения 17.05.2024).
11. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 6. Каспийское море. Вып.1. Гидрометеорологические условия / Под. ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. – СПб: Гидрометеоиздат, 1992. – 360 с.
12. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980—2020) [Текст] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 277—291.
13. Пармузина Т.А. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Каспийского моря // Труды НИИАК. – 1971. – Вып. 76. – С. 74–89.
14. Моря России – Каспийское море. [Электронный ресурс] URL: <https://geographyofrussia.com/> (дата обращения 13.05.2024)
15. Эконометрика. Под редакцией И. И. Елисеевой - М.: Финансы и статистика. 2007. - 575 с.
16. Воскобойников Ю.Е., Тимошенко Е.И. Математическая статистика с примерами в Excel: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд.НГАСУ, 2006. - 154 с.
17. Гордеева С.М. Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. Практикум. - СПб, изд. РГГМУ, 2017. 68с.
18. Колумбийский университет. Национальный центр климатических данных [Электронный ресурс] URL: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version5/.sst/> (дата обращения 03.02.2024).

19. Колумбийский университет. Проект реализации данных [Электронный ресурс] URL: http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.latent/.heat_flux/ (дата обращения 03.02.2024).
20. Климатические показатели на веб-ресурсе физической научной лаборатории NOAA: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (дата обращения 24.05.2024)
21. В.Н. Малинин, С.М. Гордеева. Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе «океан – атмосфера – суша» // Труды КарНЦ РАН. № 4. Сер. Лимнология. 2020.
22. Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб: Изд. РГГМИ, 1994а. 160 с.
23. Малинин В. Н. О генезисе межгодовых колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994б. № 4–5. С. 492–499.
24. Сафар Рашад Тельман оглы. Многомерный анализ компонентов водного баланса Каспийского моря. РГГМУ, 2008 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Табл.11 Исходные данные по температуре, испарению и уровню моря за период с 1993 по 2022 года

	Температура, °С			Испарение, м/год			Уровень, м
	Сев. К	Центр.К	Южн.К	Сев.К	Центр.К	Южн.К	
1993	11,02	13,9	17,01	1,323	1,089	1,173	-26,96
1994	12	15	17,8	1,271	1,105	1,052	-26,81
1995	12,4	15,1	17,9	1,174	1,120	1,079	-26,6
1996	11,07	14,7	18,08	1,149	1,112	0,943	-26,69
1997	11,01	14,4	17,9	1,089	1,208	1,145	-26,9
1998	12,05	15	18,01	1,299	1,325	1,184	-27,01
1999	12,07	15,2	18,2	1,212	1,278	1,190	-27,04
2000	12,08	14,99	17,81	1,307	1,319	1,173	-27,05
2001	12,07	15,06	18	1,208	1,324	1,299	-27,13
2002	12,04	15,1	18,16	1,123	1,108	1,170	-27,2
2003	12	14,08	18	1,036	0,997	1,093	-27,14
2004	12,01	14,75	17,92	1,341	1,335	1,410	-27,1
2005	11,09	14,7	17,8	1,381	1,620	1,582	-27,01
2006	12,04	15	17,9	1,306	1,499	1,546	-26,93
2007	12,05	15,07	17,8	1,330	1,309	1,500	-26,99
2008	12,08	15,2	18,19	1,123	1,326	1,521	-27
2009	12,07	15,03	18,06	1,153	1,255	1,268	-27,15
2010	13,04	15,8	18,9	1,395	1,380	1,490	-27,26
2011	13,05	15,5	18,1	1,117	1,199	1,665	-27,33
2012	14,01	15,96	18,5	1,220	1,335	1,512	-27,51
2013	12,09	15,1	18,1	1,019	1,030	1,394	-27,59
2014	13,03	15,8	18,97	1,320	1,377	1,434	-27,64
2015	14,03	16,2	18,76	1,123	1,198	1,386	-27,78
2016	13,07	16,04	18,89	1,149	1,134	1,480	-27,94
2017	12,08	15,09	18,2	1,169	1,103	1,298	-27,93
2018	13,5	16,08	19,1	1,115	1,064	1,364	-27,95
2019	13,8	16,21	18,9	0,946	0,942	1,336	-27,99
2020	13,9	16,18	19,15	1,148	1,309	1,329	-28,24
2021	14,3	16,32	19,26	0,961	1,219	1,291	-28,75
2022	14,9	16,4	19,3	0,993	1,134	1,284	-28,98

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Табл.12 Исходные данные климатических индексов и уровня моря за период с 1993 по 2022 года

Год	ТПО ИМ	GSNW	ВНьюфаундЭА ЗО	ВБерЭАЗ О	ТПО ЛМ	ВНорвЭАЗ О	Расход ФТ	NAO	АО	В.ЛабрЭА ЗО	АМО	ТПО ГК	уровень
1993	5,177	0,750	241,217	306,533	4,362	109,483	31,090	0,124	0,079	77,557	-0,242	2,036	-26,960
1994	5,263	1,230	232,067	331,867	4,511	102,733	33,891	0,508	0,532	75,063	-0,209	1,880	-26,810
1995	5,412	1,750	228,742	340,542	4,454	115,525	32,789	-0,610	-0,275	71,483	0,103	2,001	-26,600
1996	5,874	-0,170	229,900	286,658	4,762	109,933	32,859	-1,009	-0,456	69,605	-0,090	1,535	-26,690
1997	6,214	-0,390	233,425	330,842	5,146	114,125	34,500	-0,178	-0,040	71,231	0,019	1,078	-26,900
1998	6,228	-0,690	204,642	300,042	5,223	123,442	35,467	0,256	-0,271	73,221	0,340	1,886	-27,010
1999	5,849	-0,160	203,858	297,992	4,709	100,700	29,657	0,045	0,113	71,671	0,085	2,265	-27,040
2000	5,775	1,120	230,908	308,792	4,750	118,367	31,488	0,035	-0,047	69,977	-0,005	2,201	-27,050
2001	6,153	1,240	231,650	304,633	5,060	121,342	31,890	-0,453	-0,162	66,819	0,086	2,085	-27,130
2002	6,074	0,900	259,425	334,900	4,783	107,558	32,629	-0,040	0,072	69,987	0,031	2,499	-27,200
2003	6,773	-0,110	244,242	337,892	5,582	122,033	31,443	-0,303	0,152	67,226	0,198	2,017	-27,140
2004	6,715	-0,750	207,908	339,950	5,413	121,650	31,683	0,005	-0,192	67,715	0,172	2,488	-27,100
2005	6,800	-0,160	204,992	341,025	5,608	111,892	31,840	-0,254	-0,375	67,739	0,258	2,514	-27,010
2006	6,772	0,570	225,825	291,775	5,616	108,233	31,293	-0,177	0,138	66,434	0,233	2,641	-26,930
2007	6,554	0,360	222,617	363,050	5,125	117,425	31,792	-0,382	0,269	69,681	0,113	2,419	-26,990
2008	6,307	-0,200	216,858	299,575	5,388	130,450	30,850	-0,681	0,177	77,839	0,104	2,300	-27,000
2009	6,184	0,030	238,533	337,500	4,656	118,117	31,045	-0,378	-0,330	69,283	0,005	2,432	-27,150
2010	7,223	-0,220	196,767	327,392	5,872	145,133	32,027	-2,344	-1,043	62,955	0,315	2,476	-27,260
2011	6,264	-0,830	196,433	280,875	5,169	108,083	31,800	0,463	0,526	77,812	0,067	2,510	-27,330
2012	6,576	0,810	205,708	304,133	5,490	120,592	33,286	-0,631	-0,182	68,992	0,179	2,474	-27,510
2013	5,935	0,120	226,117	336,675	4,809	122,142	32,129	0,588	0,001	72,822	0,132	2,577	-27,590
2014	6,209	0,700	206,908	324,375	5,186	115,175	31,475	0,096	-0,067	77,322	0,067	2,637	-27,640
2015	5,556	1,300	237,600	337,158	4,759	134,917	34,433	1,163	0,630	78,646	0,079	2,866	-27,780
2016	5,985	0,440	236,667	349,175	5,120	105,600	34,014	0,396	-0,114	68,676	0,308	3,200	-27,940
2017	5,853	-0,150	217,500	384,958	4,967	122,025	32,391	0,573	0,256	65,132	0,280	3,043	-27,930
2018	5,314	0,440	273,483	355,675	4,455	95,375	34,586	0,717	0,203	71,109	0,034	3,027	-27,950
2019	6,273	0,420	229,942	371,975	5,321	113,383	31,813	-0,030	-0,142	60,729	0,139	2,844	-27,990
2020	6,073	0,460	202,967	324,042	5,312	106,992	33,199	0,336	0,781	63,030	0,268	2,556	-28,240
2021	6,170	0,410	216,454	318,892	5,375	104,458	32,506	-0,673	-0,064	55,308	0,223	2,657	-28,750
2022	6,054	0,435	209,710	273,608	5,128	109,167	32,852	-0,103	0,118	68,296	0,247	3,026	-28,980