



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

Кафедра МКОА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности климатических изменений температуры
и осадков над акваторией Северного моря»

Исполнитель Добряк Мария Вячеславовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук доцент
(ученая степень, ученое звание)

Лебедев Андрей Борисович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
И.о. заведующей кафедрой

Дробжева
(подпись)

доктор физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

« 24 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1.1. Географическое положение Северного моря	5
1.2. Рельеф и геологическое строение Северного моря	6
1.3. Гидрологические особенности Северного моря.....	7
1.4. Климатические и синоптические особенности Северного моря	9
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ.....	13
2.1. Выбор пунктов наблюдений.....	13
2.2. Методика оценивания однородности и стационарности	19
2.3. Оценка однородности и стационарности температур воздуха Северного моря	26
2.4. Оценка однородности и стационарности осадков Северного моря	35
3 ГЛАВА. ОЦЕНИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ СЕВЕРНОГО МОРЯ.....	43
3.1. Статистические методы оценивания современных климатических изменений.....	43
3.2. Моделирование климатических изменений температуры для января ...	46
3.3. Моделирование климатических изменений температуры для июля	51
3.4. Моделирование климатических изменений количества осадков	55
Заключение.....	60
Список использованной литературы:	61

Введение

За последние десятилетия наблюдалось заметное повышение температуры воды в Северном море. Исследования показывают, что это связано с глобальным изменением климата и увеличением концентрации парниковых газов. Это подтверждается работами комиссии по оценке климатических изменений Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1].

Увеличение глобальной температуры приводит к таянию ледников и повышению уровня море. Это изменение особенно чувствительно для Северного моря, так как регион характеризуется пологим континентальным шельфом. При это также не стоит недооценивать влияние углекислого газа на кислотность воды. Изменения температуры и кислотности влияют на морскую флору и фауну. Нарушаются пищевые цепи, изменяются ареалы обитания многих видов рыб и беспозвоночных. Большое количество работ на эту тему в журнале "Journal of Marine Science" подчеркивает актуальность данной темы.

Изменения в температуре воды и уровня моря в свою очередь влияют на гидродинамику Северного моря. Это может изменять циркуляционные потоки, которые важны для распределения тепла и питательных веществ. А с увеличением температуры может возрастет частота и интенсивность штормов в регионе. Это важно для управления побережьем и защиты от наводнений - затопление низменных территорий, изменение рыболовецких ресурсов и воздействия на туристическую индустрию являются важными аспектами, требующими изучения. Об этом также говорится в отчётах Европейского агентства по окружающей среде.

Таким образом, тема моей работы актуальна, поскольку климатические изменения Северного моря затрагивают широкий спектр экологических, гидродинамических и социально-экономических аспектов. Дальнейшее

исследование необходимо для разработки адаптационных стратегий и уменьшения негативных последствий этих изменений.

Целью моей работы является оценивание современных климатических изменений над акваторией Северного моря.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Проанализировать литературные источники для выявления физико-географических и климатических особенностей Северного моря;
2. Выбрать метеостанции с продолжительными рядами для характеристики климатических изменений с равномерным распределением на территории Северного моря;
3. Изучить методики и оценить однородности и стационарности температур воздуха и осадков Северного моря по выбранным метеостанциям.
4. Оценить современные климатические изменений температуры воздуха и осадков Северного моря с помощью статистических методов.

Работа состоит из 3 глав. В первой главе приведено описание объекта исследования – его географическое положение, рельеф местности, гидрологические и климатические особенности. Во второй главе описывается выбор метеостанций и их характеристика, а также приведена статистическая оценка величин на стационарность (критерии Стьюдента и Фишера) и однородность с помощью критериев Смирнова-Граббса и Диксона. В третьей главе построены линейные тренды, ступенчатые изменения и модели гармонических колебаний для всех рассматриваемых рядов – среднегодовых и среднемесячных температур воздуха для января и июля, годовых сумм осадков. Также произведена оценка полученных результатов и выявлены лучшие модели, описывающие климатические изменения Северного моря.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕВЕРНОГО МОРЯ

1.1. Географическое положение Северного моря

Северное море — это крупнейшее морское пространство на Земле, расположенное между Европой и Великобританией. Оно граничит с водами Норвежского моря на севере и представляет собой наиболее отдалённый край Атлантического океана. Однако его положение не ограничивает взаимодействие с окружающими акваториями. Северное море тянется на 960 километров с севера на юг и простирается на 580 километров с запада на восток. Самая глубокая точка достигает 725 метров.



Рисунок 1.1 - Географическое расположение объекта исследования

Исследование карты показывает, что Северное море находится в северо-восточной части Атлантического океана, не касаясь российских берегов. Его водные просторы примыкают к Британским островам, Скандинавскому полуострову и континентальной части Европы.

Считается, что море сформировалось во времена последнего ледникового периода. Сегодня его воды купают берега нескольких государств в Северной Европе - Бельгию, Нидерланды, Германию, Данию, Норвегию, Францию, Великобританию.

Северное море известно своими богатыми рыбными ресурсами, такими как лосось, треска, сельдь и креветка. Также здесь обитают морские млекопитающие, такие как дельфины и киты. В районе Северного моря находится множество островов, включая Шпицберген, Исландию и Фарерские острова. Климат Северного моря характеризуется холодной и влажной погодой, особенно в северных районах.

1.2. Рельеф и геологическое строение Северного моря

На северо-востоке, в Норвегии, берега фьордовые, с большим количеством мелких островов, на востоке, в Англии и Шотландии, – обрывистые, местами галечные пляжи, пересекаются речными долинами, на юге – большая часть песчаные пляжи, дюны, множество эстуариев (реки Рейн, Эльба и т. д.), в Дании – лагунные; восточное побережье Нидерландов почти всюду окаймлено дамбами от наводнений. На юго-востоке, вдоль берега, тянется цепочка Фризских островов, к северу от них – о. Гельголанд.

Поверхность дна представляет собой слабо наклоненную к северу равнину с глубинами от 20 до 170 м и множеством небольших банок (наиболее значительная – Доггер-банка). В юго-западной части распространены вытянутые в северо-восточном направлении небольшие песчано-гравийные гряды, созданные приливными течениями. Встречаются также узкие ложбины

с глубинами свыше 200 м (остатки древних речных долин). Вдоль берегов Норвегии протягивается карьерообразный желоб глубиной 300–400 м.

Впадина Северного моря приурочена главным образом к северной части Североморско-Среднеевропейской мегасинеклизы Западно-Европейской платформы, складчатый фундамент которой в этой части в основном каледонский. Осадочный чехол сложен мощной (до 12 км) толщиной морских и континентальных (в т. ч. ледниковых) отложений от девона до четвертичной системы, образующих систему пологих поднятий и впадин. Наиболее крупные поднятия – Ютландское, Доггер-банка, впадины – Северная, Северо-Датская, Английская. Пермские слои включают мощную толщу солей (цехштейн), которые образуют многочисленные купола, внедряющиеся в вышележащие отложения. С осадочным выполнением мегасинеклизы связаны крупные месторождения нефти и природного горючего газа.

1.3 Гидрологические особенности Северного моря

Гидрологические условия Северного моря определяются его географическим положением, климатическими условиями, водообменом с Атлантическим океаном и Балтийским морем, и материковым стоком. Основную роль играют теплые и соленые атлантические воды, поступающие в Северное море двумя потоками: один между Шотландскими островами и северной оконечностью о. Великобритания, другой – через пролив Па-де-Кале. Более пресные воды Балтийского моря поступают в северо-восточную часть Северного моря через пролив Скагеррак. Материковый сток имеет преобладающее значение в юго-восточной части моря, куда впадают реки Эльба, Везер, Эмс, Рейн, Маас, Шельда, Темза, и в районе берегов Норвегии и Швеции, где локальное влияние оказывают талые воды. Общий годовой приток пресных вод с материковым стоком составляет 300 км³.

Воды исследуемого объекта вовлекаются в общую циклональную циркуляцию, на которую накладываются местные круговороты того же направления. Основная масса поверхностных вод уходит из Северного моря в Норвежское между Скандинавским полуостровом и Шетландскими островами. Поверхностные течения имеют скорости до 0,3 м/с, под влиянием ветров их направления и скорости значительно меняются.

Температура поверхностных вод имеет ярко выраженный годовой ход, средние температуры изменяются в феврале от 2 °С у побережья Дании до 8 °С на северо-западе, в августе от 18 до 13 °С соответственно. В прибрежных зонах, исключая области эстуариев и фьордов, средние значения солености составляют 32–34,5‰, исключая проливы Каттегат и Скагеррак, где из-за воздействия Балтийского м. соленость на входе и выходе изменяется в пределах от 10 до 25‰ и от 25 до 34‰ соответственно. В открытых зонах моря и в его западной части соленость поверхностных вод составляет около 35‰. Глубинные температуры и солености на большей части моря мало отличаются от поверхностных. За последние 100 лет температура поверхностных вод увеличилась в среднем на 1 °С.

В Северном море формируются различные водные массы, которые разделяют 3 типа фронтов: приливной, зоны апвеллинга и соленостный, в них увеличивается биологическая активность.

Приливы преимущественно полусуточные, их величины изменяются от 0,6 до 7,6 м. Скорость приливных течений достигает у Шотландских островов 18 км/ч. В Северное море входят 2 приливные волны: мощная волна с севера и более слабая через пролив Ла-Манш. Большое влияние на приливную волну оказывают глубина и конфигурация берегов, на уровень моря – ветровые сгонно-нагонные явления, в южной части моря они могут повышать уровень до 3 м и понижать до 2,1 м. Под совокупным влиянием приливов и сильных нагонных ветров повышения уровня могут приводить к катастрофическим наводнениям, затопляя значительные площади низменных побережий Нидерландов, Бельгии, Великобритании, Дании. Ветровые волны в период

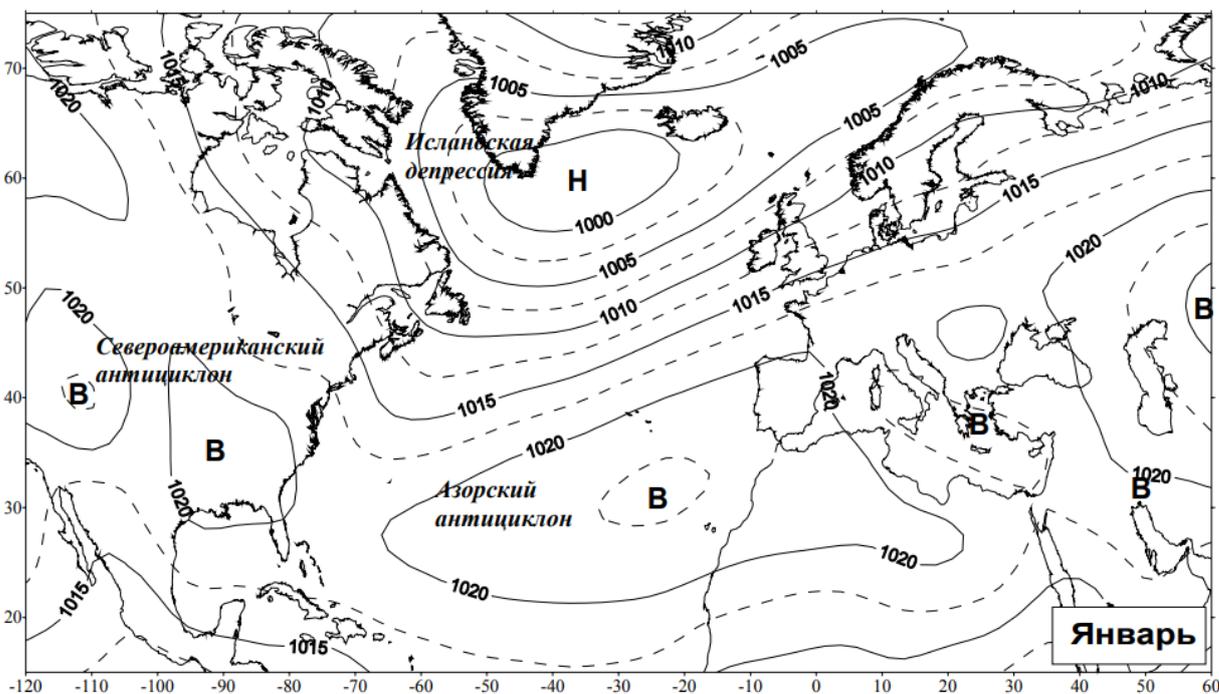
штормов достигают высоты 8–10 м на севере и 6–7 м на юге. Льды встречаются у берегов Северного моря с декабря по март. В суровые зимы ледяной покров может сохраняться в течение месяца и более.

1.4 Климатические и синоптические особенности Северного моря

В синоптическом отношении Северное море находится под влиянием постоянного центра действия атмосферы – Исландской депрессии.

Циклоны, возникая у восточного побережья Северной Америки, где зимой для этого формируются наиболее благоприятные условия, перемещаются в дальнейшем в северо-восточном направлении от канадского острова Ньюфаундленд в направлении острова Исландия и Баренцева моря. Как правило, над Исландией они достигают наибольшего развития. В дальнейшем по различным траекториям перемещении на северо-восток, где они и заполняются (рисунок 1.2, а).

а)



б)

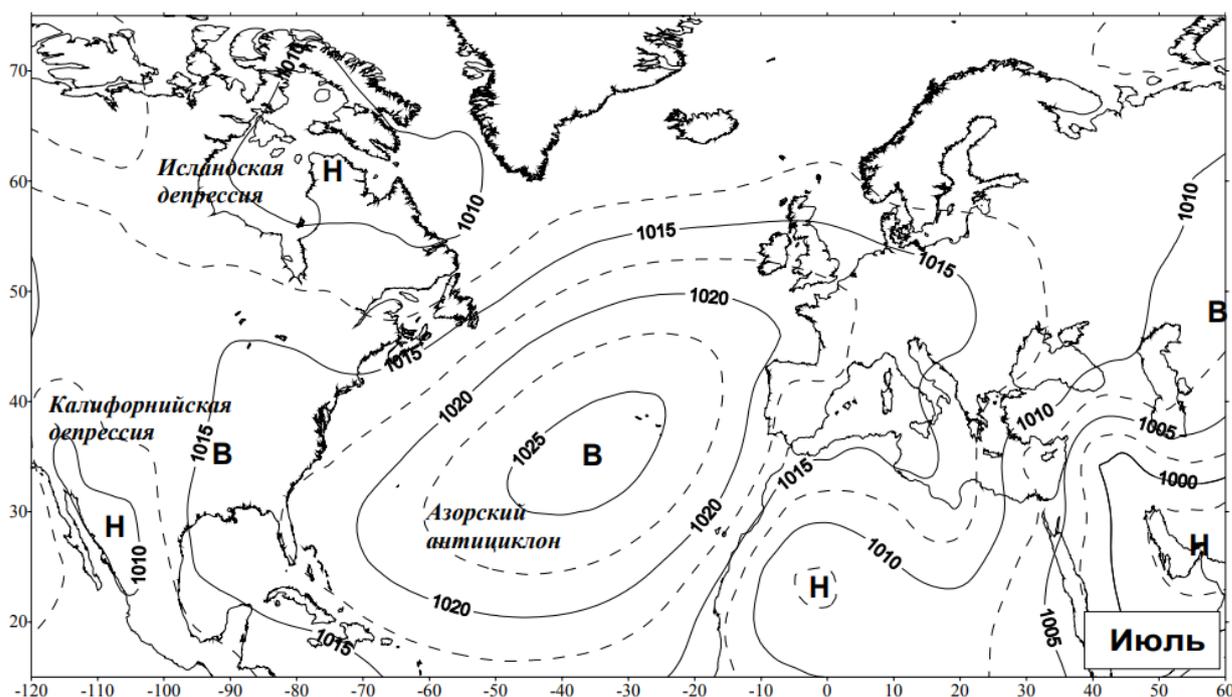


Рисунок 1.2 – Климатические карты центров действия атмосферы для Северо-Атлантического региона по временам года: а) зима; б) лето

Благодаря тому, что в районе острова Исландия повторяемость циклонов наибольшая, и что оказываются в данном районе наиболее развитыми (глубокими), при статистической обработке и построении климатического поля давления образуется обширная и глубокая депрессия, которая получила название Исландской депрессии (или Исландского минимума).

Северное море расположено на юго-восточной периферии Исландской депрессии. Как следует из ориентации изобар на климатической карте Северо-Атлантического региона в зимний период (рисунок 1.2, а) в акватории Северного моря вблизи подстилающей поверхности ветер должен иметь преимущественно западное и юго-западное направления. В холодный период года ветры данных направлений достигают наибольшей силы. К влиянию циклонической деятельности Исландской депрессии добавляется влияние теплого Северо-Атлантического течения и Исландского центра пониженного давления. Данные обстоятельства приводят к тому, что зима здесь короткая и относительно мягкая с краткосрочными заморозками и преимущественно пасмурной погодой. На побережье Норвегии зимой температура может

понизиться до $-15^{\circ}\div 16^{\circ}$, но заморозки обычно неустойчивы. За год наблюдаются от 58 до 81 дней с заморозками.

Летом из-за малой повторяемости циклонов и незначительной их интенсивности исландская депрессия на картах среднего давления на уровне моря выражена слабо, разделена на два центра и смещена к западу от острова Гренландия. В теплое время года большой интенсивностью обладают азорский антициклон (рисунок 1.2, б), который захватывают практически все пространство северной половины Атлантического океана. Азорский антициклон постоянно регенерируют при вхождении в него промежуточных гребней в тылу циклонов, перемещающихся на юго-восток. От азорского антициклона в направлении Европы и Британских островов распространяются отроги повышенного давления, которые соответствуют повышенной повторяемости антициклонов в этих районах. Как следует из ориентации изобар на климатической карте Северо-Атлантического региона в летний период (рисунок 1.2, б) в акватории Северного моря вблизи подстилающей поверхности ветер должен иметь преимущественно западное и северо-западное направления. Вследствие этого, лето в Северном море не жаркое. Температура редко достигает значений $+22^{\circ}\div +24^{\circ}$. Редкие ясные дни сменяются частыми осадками и редкими штормами.

Облачность в этом районе в целом значительная. Самые облачные периоды проходятся на период с октября по март. Количество пасмурных дней в году – от 116 до 218. Осадки выпадают в большом количестве с августа по конец года, а весной выпадают меньше всего.

Наибольшая повторяемость туманов приходится на зимние месяцы: с декабря по март, доходя до 20 процентов, летом видимость значительно лучше, повторяемость туманов менее 5 процентов.

Грозы наблюдаются в любое время года, но их пик приходится на лето. Среднее количество дней с грозами – 1-2 грозы в месяц. В данном районе в конце лета – начале осени наблюдаются смерчи, что обусловлено существенным прогревом поверхностного слоя морской воды.

Средняя годовая скорость ветра составляет 4÷8 м/с, штилевые условия встречаются редко. Штормовая активность достигает своего пика в период с октября по март.

Годовая амплитуда температуры воздуха в акватории Северного моря невелика и находится в пределах $+7^{\circ}\div+10^{\circ}$, при этом увеличивается от побережья к центру моря, что обусловлено прохождением вблизи берегов ветвей теплых морских течений.

Таким образом, активная циклоническая деятельность в акватории Северного моря и влияние теплого Северо-Атлантического течения определяет неустойчивую погоду во все сезоны со значительным количеством атмосферных осадков, повышенной влажностью и устойчивыми, не слишком высокими температурами.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для анализа климатических изменений температуры воздуха и осадков над территорией Северного моря были выбраны 4 метеостанции. Каждая из них расположена в различных частях исследуемой территории, чтобы равномерно отражать климатические особенности Северного моря. Расположение выбранных станций представлено на рисунке 2.1.

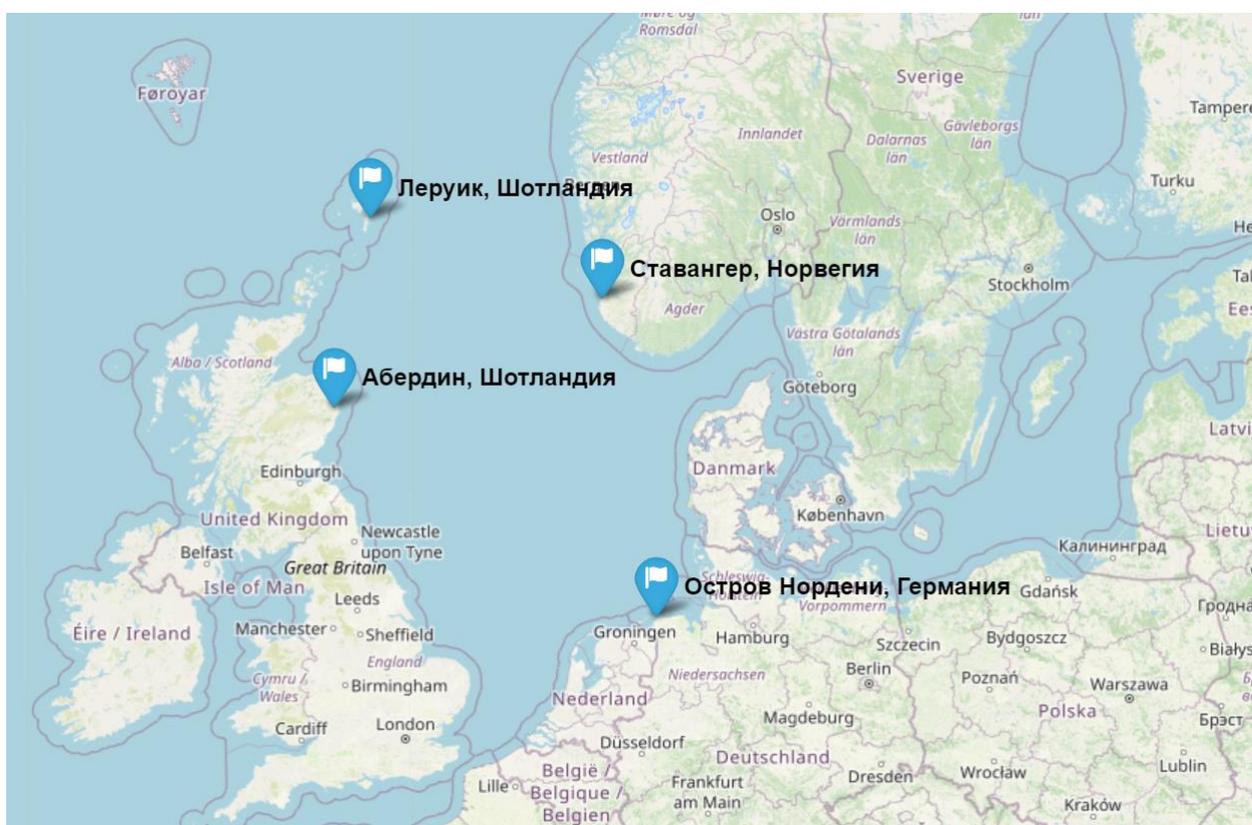


Рисунок 2.1 Расположение пунктов наблюдения в Северном море

Таблица 2.1

Названия и координаты станций в Северном море

Станция	Наименование	Продолжительность наблюдений	Кол-во лет	Широта, град	долгота, град
10113	Остров Нордени, Германия	1898-2024	126	53,72	7,15
01415	Ставангер, Норвегия	1928-2024	95	58,9	5,6
03005	Леруик, Шотландия	1827-2024	197	60,1	-1,2
03901	Абердин, Шотландия	1829-2024	157	57,20	-2,22

Наблюдательные станции были выбраны таким образом, чтобы они равномерно были распределены по границам Северного моря и наилучшим образом отражали климатические условия в различных его районах.

Южную часть Северного моря характеризует метеостанция на острове Нордерни в Германии. Нордерни (Нижненемецкий: Norderneer) - один из семи населенных Восточно-Фризских островов у побережья Германии в Северном море. Остров имеет размеры 14 на 2,5 километра (8,7 на 1,6 мили), общую площадь около 26,3 квадратных километров (10,2 квадратных миль) и, следовательно, является девятым по величине островом Германии. Население Нордерни составляет около 5850 человек.

На температуру влияет море, которое охлаждает летом и согревает зимой. Средняя температура летом составляет около 20° С, иногда поднимается выше 30° С. Зимой средняя температура составляет около 4° С, иногда бывают заморозки и снегопады. Самые жаркие месяцы на Нордерни

— это август и июль, на протяжении которых средняя дневная температура достигает значения плюс 19.4°C, а ночная — плюс 14.5°C. Самыми холодными месяцами являются январь и февраль, когда средняя дневная температура падает до плюс 3.2°C, а ночная — до минус 0.2°C.

На острове выпадает умеренное количество осадков в течение всего года, при этом наибольшее количество выпадает в осенние и зимние месяцы. На острове выпадает в среднем 700 мм осадков в год, но это количество может варьироваться в зависимости от года. Круглый год умеренно солнечно, причем больше всего солнечных часов приходится на летние месяцы. Летом на острове светит до 8 часов в день, но зимой - всего 1-2 часа в день. Ветры Северного моря являются основной особенностью климата Нордерни. Остров известен своими сильными ветрами, которые в штормовую погоду могут достигать 120 км/ч. Эти ветры могут принести прохладу и высокую влажность.

Западная часть Северного моря представлена метеостанцией Ставангер, расположенной на юго-западе Норвегии. Город Ставангер официально считает годом своего основания 1125 год, когда было завершено строительство собора Ставангера. Ядро города в значительной степени составляют деревянные дома 18-го и 19-го веков, которые охраняются и считаются частью культурного наследия города. Это привело к тому, что центр и центральная часть города сохранили характер маленького городка с необычно высоким соотношением отдельно стоящих домов, и внесло значительный вклад в распространение роста населения города на отдаленные районы Большого Ставангера.

Климат Ставангера оказывается под влиянием моря, что обеспечивает теплую зиму. Здесь преобладает умеренно теплый климат без засушливых периодов и с теплым летом. В любом месяце средняя температура не поднимается выше 22° С. Не менее четырех месяцев в году средняя температура остается выше 10° С. Летом в Ставангере наиболее теплым является июль, в котором максимальные температуры достигают приблизительно 19° С. К концу четвертой недели июля обычно становится

особенно жарко. Однако стоит помнить о дождях, туманах и возможных грозах. Что касается зимы, то январь является самым холодным месяцем, когда ночью температура может опускаться до минус 1° С.

Климат здесь всё же преимущественно прохладный в течение всего года. Дневные температуры варьируются от резких 4° С в прохладном феврале месяце, повышаясь до умеренно теплых 18° С, которые наблюдаются в самом сердце лета, июле. Поскольку ночная температура в августе растёт, достигая зенита в 13° С, февральские ночи будут самыми холодными, когда температура воздуха опустится до 0° С. В то время как июнь предвещает самый засушливый сезон с осадками всего в 11 дней, октябрь, напротив, дарит региону самое влажное небо, заливая город дождем в течение 18 дней.

Распределение осадков происходит с достаточной равномерностью в течение всего года. Статистические данные свидетельствуют о незначительных колебаниях месячных объемов осадков, что содействует стабильности гидрологического режима и предотвращает периоды явной засухи.

Солнечная радиация в пределах Ставангера проявляется в изменчивых интервалах из-за преобладающей покровной облачности, что снижает общее число ясных дней. Феноменологический анализ указывает на вариабельность проникновения солнечных лучей через прослойку облачности, что влияет на продолжительность светового дня и интенсивность солнечного излучения, достигающего поверхности в данной географической локации.

Северная часть исследуемой территории представлена метеостанцией Леруик. Метеостанция расположена в Шотландии на Шетландских островах, в городе Леруик, который служит административным центром архипелага. Метеостанция выполняет важные функции, собирая и анализируя метеорологические данные, что имеет особую важность, учитывая уникальное географическое положение островов.

Шетландские острова находятся на крайнем севере Великобритании и подвержены влиянию Атлантического океана, из-за чего погода здесь может

быть довольно переменной и непредсказуемой. Метеостанция Леруик обеспечивает сбор данных о температуре, влажности, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра, а также о количестве и типе осадков.

Климат города Леруик можно отнести к умеренно морскому с преобладающими теплыми и влажными воздушными массами, поступающими с Атлантического океана под влиянием Северо-Атлантического течения (Гольфстрим). Это течение обеспечивает смягчение температурных колебаний, что позволяет поддерживать относительно стабильный температурный режим на протяжении года, минимизируя эффекты отрицательных температур даже в зимний период. Термический режим в указанном регионе проявляет себя в узком диапазоне годовых колебаний, где среднемесячные температуры зимой редко опускаются ниже отметки в 0°C , а летние показатели воздуха обычно не превышают $15\text{-}20^{\circ}\text{C}$. Средняя температура колеблется в пределах около 6°C до 8°C . Режим осадков характеризуется достаточно высоким уровнем, они равномерно распределены в течение всего года, с тенденцией к увеличению в осенне-зимние месяцы. Абсолютные значения годовой суммы осадков могут варьироваться, в среднем составляя более 1000 мм. Солнечная радиация в Леруике подвергается значительным ограничениям вследствие доминирующего затенения облачного покрова. Солнечно-радиационные показатели невелики круглый год, особенно в период с октября по март. Тем не менее, в летние месяцы наблюдается феномен «белых ночей», когда из-за высокой широты сумерки продолжаются на протяжении всего ночного времени. Несмотря на увеличенную продолжительность светового дня в летний сезон, высокий уровень облачности существенно уменьшает возможность прямого солнечного освещения.

Метеостанция Абердин характеризует восточную часть Северного моря. Абердин, который является третьим по величине городом Шотландии, расположенный в графстве Абердиншир, пользуется услугами

метеорологической станции, оборудованной современными приборами для мониторинга метеорологических условий.

Абердинский климат, по своему типу, относится к умеренного морскому с сильно выраженными циклоническими процессами, вызываемыми близостью Северного моря. Температурный режим характеризуется сравнительной мягкостью зимних месяцев, при этом температуры опускаются до относительно морозных значений не так уж часто. Летом, в свою очередь, температурные пики остаются умеренными, редко достигая экстремально высоких отметок. Особенностью Абердина является небольшой годовой амплитуда колебаний температур, что делает погодные условия здесь относительно предсказуемыми и однообразными в течение года.

Осадки в Абердине имеют тенденцию к равномерному распределению в течение всего года, включая дождливые периоды осени и зимы, когда динамическая циклоническая активность у берегов Северного моря усиливается. Частые атлантические фронты приносят значительные объемы влаги, создавая условия для регулярных осадков, включая снег в зимний период. Весной и летом уровень осадков слегка снижается, но погода остается достаточно влажной для поддержания локальной экосистемы.

Ветровой режим в Абердине также заслуживает внимания, поскольку местоположение города делает его подверженным активным ветрам, часто достигающим высоких скоростей. Преобладающие направления ветра — юго-западное и западное, которые можно объяснить общей циркуляцией атмосферы в средних широтах. Эти ветры приносят с собой не только влагу с океана, но и обуславливают частую смену погодных условий, поскольку средиземноморские воздушные массы соприкасаются с арктическими.

Что касается солнечной радиации, Абердин с его широтным положением в 57 градусов северной широты испытывает значительные сезонные изменения в продолжительности дня и ночи. Летом периоды светового дня удлинены, что способствует пролонгированному световому времени, в то время как зимой город становится свидетелем сокращения

светового дня до нескольких часов. Это сильно влияет на солнечное излучение, доступное для растительности и в целом для городской среды. Облачность снижает уровень прямой инсоляции, при этом солнечные дни в году занимают небольшой процент. Тем не менее, в периоды, когда облака рассеиваются, Абердин может баловаться умеренным количеством солнечных часов, внося вклад в общий комфорт климата и настроение его жителей.

Многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков скачаны с сайта «Погода и климат» [2] и сайта Королевского метеорологического института Нидерландов [3].

2.2 Методика оценивания однородности и стационарности

После того, как сформированы архивы многолетних рядов наблюдений следует оценить качество исходной информации для расчета климатических характеристик. Оценка однородности метеорологических записей является существенным элементом климатологического и метеорологического исследования и анализа. Поддержание целостности наблюдательных данных позволяет достоверно интерпретировать климатические тенденции и отсеивать аномалии, обусловленные инструментальными ошибками, изменениями в методологии сбора данных или другими внешними факторами.

Надежность и точность метеорологических данных становится приоритетом для гарантирования их значимости в исследованиях. Идентификация неоднородностей дает возможность для корректировки и калибровки данных, улучшения согласованности наблюдательных рядов через временные интервалы.

Кроме того, обеспечение сопоставимости записей из различных источников критически важно для проведения комплексных исследований, сочетающих данные, собранные различными агентствами и на разном оборудовании. Однородность данных способствует их интеграции на

международном уровне, что необходимо для глобальных климатических моделей и оценок.

Хранение постоянных, однородных метеорологических рядов облегчает будущие аналитические и прогностические работы. Надежные и согласованные записи усиливают точность погодных прогнозов и моделей, способствуя эффективному принятию решений в области общественной безопасности и своевременному реагированию на чрезвычайные ситуации.

В сумме, процедура оценки однородности метеорологических данных обеспечивает их качество и адекватность для целей научного изучения, метеорологического прогнозирования и изучения климатических изменений.

Факторы, влияющие на неоднородность метеорологических данных, могут быть природными, обусловленными внутренней климатической изменчивостью и долгосрочными колебаниями климата, и методологическими, связанными с метеорологическими процессами наблюдений. Вариабельность климата по своей природе предположительно стохастическая, однако определенные периодические циклы, связанные с изменением механизмов атмосферной циркуляции, могут быть выявлены.

Методологические факторы, напрямую воздействующие на целостность данных, включают, среди прочего, следующие изменения:

- планирование и частота проведения метеорологических замеров;
- модификации в методах вычисления климатологических индексов;
- замена измерительного оборудования;
- перемещение метеорологических станций;
- трансформации наблюдательных условий в результате естественных или антропогенных морфологических, ландшафтных или гидрографических изменений;
- ограниченность продолжительности временных участков наблюдений;
- индивидуальные ошибки персонала, осуществляющего наблюдения.

Предварительный анализ климатологических временных рядов, представленный в графической форме изменения среднемесячной температуры в январе и июле, а также годового количества осадков, осуществляется методом визуального осмотра. Такой подход дает возможность обнаружить изменения в данных без привлечения статистических методов, особенно когда климатическая метрика испытывает резкий переход в своем характере. Визуальный метод также релевантен для выявления пропусков в записях наблюдений.

В гидрометеорологии различают два аспекта однородности:

- однородность эмпирического распределения, выявляемая по наличию явно отклоняющихся от общего множества значений экстремумов;
- стационарность, то есть постоянство средних показателей и дисперсии последовательных сегментов временного ряда.

Методология оценки однородности климатологических рядов разделяется на три шага:

- анализ эмпирического распределения на предмет экстремальных значений;
- оценка стационарности дисперсий;
- оценка стационарности средних значений с учетом непостоянства экстремумов и отклонений.

Использование данной методики должно привести к созданию обширной базы данных, составленной из однородных, непрерывных и длительных временных рядов климатических параметров для последующего статистического моделирования.

Процесс оценки качества исходных данных начинается с оценки однородности экстремальных значений, которые влияют на параметры ряда и в особенности на его разброс. Наиболее существенной причиной изменчивости экстремумов выступает недостаточная длительность временных интервалов наблюдений, не отражающая истинную частоту возникновения редких климатических событий.

Оценивание однородности рядов наблюдений осуществляется на основе статистического и генетического анализа. При статистическом анализе для проверки однородности экстремумов применяются критерии Диксона и Смирнова-Граббса. Генетический анализ заключается в выявлении физических причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений.

Статистики критериев Диксона позволяют последовательно оценить до трех экстремумов, отклоняющихся от эмпирического распределения, и рассчитываются по формулам:

1) для максимального члена Y_n ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ []:

$$D1_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_1) \quad (2.1)$$

$$D2_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2) \quad (2.2)$$

$$D3_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2) \quad (2.3)$$

$$D4_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3) \quad (2.4)$$

$$D5_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1) \quad (2.5)$$

где $D1_n, \dots, D5_n$ – собственно статистики критериев Диксона для максимального члена выборки; $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ – элементы ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$; n – объем выборки;

2) для минимального члена Y_1 ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ []:

$$D1_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_n) \quad (2.6)$$

$$D2_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_{n-1}) \quad (2.7)$$

$$D3_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-1}) \quad (2.8)$$

$$D4_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-2}) \quad (2.9)$$

$$D5_1 = (Y_1 - Y_3)/(Y_1 - Y_n) \quad (2.10)$$

где $D1_1, \dots, D5_1$ – статистики критериев Диксона для минимального члена выборки.

Критерии однородности Смирнова-Граббса позволяют оценить однородность только одного экстремума и является параметрическим, так как для ее расчета используются такие параметры распределения как среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена Y_n ранжированной последовательности $\{Y_n\}$ рассчитывается по формуле []:

$$G_n = (Y_n - Y_{cp})/\sigma_Y, \quad (2.11)$$

где: Y_{cp}, σ_Y – среднее значение и среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для минимального члена Y_1 рассчитывается по формуле []:

$$G_{n1} = (Y_{cp} - Y_1)/\sigma_Y. \quad (2.12)$$

Расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями [], полученными методом статистических испытаний, при уровне значимости $\alpha = 5 \%$, что соответствует принятию нулевой гипотезы об однородности с вероятностью 95 %. Гипотеза об однородности достоверно принимается в случае, если расчетное значение статистики меньше соответствующего критического при уровне значимости $\alpha \geq 5 \%$.

В случаях, если расчетные значения статистик больше критических, но ненамного, дополнительно определяется уровень значимости, соответствующий расчетному значению. В случае, если уровень значимости α находится в промежутке от 3 до 5 % гипотеза однородности может быть принята условно, а в промежутке – от 1 до 3 %, гипотеза также условно

отклоняется. В случае если уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики $\alpha < 1\%$ гипотеза однородности достоверно отклоняется.

Статистические критерии Диксона и Смирнова-Граббса разработаны для выборок, подчиняющихся нормальному (симметричному) закону распределения. Особенность же выборок гидрометеорологических данных заключается в том, что их эмпирические распределения часто не являются симметричными. Кроме того, их временной ряд не является полностью случайной выборкой, так как содержит циклические колебания разных временных масштабов. Поэтому, используются критические табличные значения с учетом влияния асимметрии и автокорреляции. Для критериев оценивания однородности асимметрия увеличивает критические значения, а автокорреляция их немного уменьшает.

Вторым и третьим этапом проверки качества климатологических рядов является оценивание стационарности дисперсий и средних значений. При этом используются критерии Фишера и Стьюдента. Временной ряд разбивается на две подвыборки, причем границы разбиения выбираются исходя из дат предполагаемого нарушения стационарности. В случае отсутствия априорной информации о сроках нарушения стационарности выборку делят на две равные по продолжительности подвыборки.

По каждой подвыборке вычисляются значения средних ($Y_{cpj}, j = 1, 2$) и дисперсий ($\sigma_j, j = 1, 2$), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2, \text{ при } \sigma_j^2 \geq \sigma_{j+1}^2 \quad (2.13)$$

где $\sigma_j^2, \sigma_{j+1}^2$ – соответственно дисперсии двух подвыборок объемом n_1 и n_2 .

Условие, содержащееся в выражении (2.13), означает, что вне зависимости от хронологии периодов n_1 и n_2 , в числителе находится наибольшая из двух дисперсий.

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается при заданном уровне значимости α , если расчетное значение статистики критерия F меньше критического F^* при степенях свободы, соответствующих объемам подвыборок n_1 и n_2 :

$$F < F^* . \quad (2.14)$$

Критические табличные значения статистики Фишера F^* получены методом статистических испытаний в зависимости от уровня значимости α , коэффициентов внутрирядной r и межрядной R корреляции.

При объемах подвыборок больше или равных 25 корректно использовать классическое F-распределение для нормально распределенных независимых случайных величин со степенями свободы n_{1F} и n_{2F} , зависящими от коэффициентов автокорреляции и асимметрии:

$$n_{1F} = \frac{n_1 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_1}}{n_1(1-r^2)} \right]} , \quad (2.15)$$

$$n_{2F} = \frac{n_2 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_2}}{n_2(1-r^2)} \right]} , \quad (2.16)$$

где: g – коэффициент, учитывающий влияние асимметрии исходной совокупности, r – коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Оценивание стационарности средних значений осуществляется по критерию Стьюдента также путем сравнения расчетных и критических значений статистик.

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле:

$$t = \frac{Y_{\text{срI}} - Y_{\text{срII}}}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.17)$$

где $Y_{\text{срI}}, Y_{\text{срII}}, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ – средние значения и дисперсии двух смежных выборок.

Критические значения статистики Стьюдента t'_α определяются по формуле:

$$t'_\alpha = C_t t_\alpha, \quad (2.18)$$

где C_t – эмпирический коэффициент, зависящий от коэффициента автокорреляции; t_α – критическое значение статистики Стьюдента для случайной совокупности при том же числе степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$.

Как следует из анализа формулы (2.18), на критические значения статистик критерия Стьюдента влияет только автокорреляция.

Оценивание стационарности средних значений по критерию Стьюдента осуществляется путем сравнения расчетных и критических значений статистик: если расчетное значение меньше критического при заданном уровне значимости, гипотеза о стационарности принимается.

2.3. Оценка однородности и стационарности температур воздуха Северного моря

Процедура оценки однородности временных рядов среднемесячных температурных показателей была осуществлена на основе аналитических методов Диксона и Смирнова-Граббса, которые применялись к исследуемым диапазонам данных. Из подготовленных данных были удалены годы с пропущенными значениями и проведена первичная визуальная оценка рядов наблюдений на выбросы.

С целью установления стационарности рассматриваемых временных рядов проведен дополнительный анализ наблюдений, охватывающих периоды не менее 40 лет. Применение ограничений по продолжительности наблюдений

обусловлено тем, что в более коротких временных сериях повышается вероятность появления неоднородностей, которые могут быть вызваны как внутренними циклическими колебаниями температур и осадков в натуральных условиях, так и наличием эпизодических экстремальных значений, имеющих место быть в более длительных циклах.

Таблица 2.3.1. – Статистические характеристики рядов температуры для Северного моря

Статистические характеристики	Метеостанция			
	Ставангер	Абердин	Леруик	Нордени
Объём выборки	95	153	197	126
Среднее значение ряда	7.7	8.1	7.0	9.2
Среднее квадратическое отклонение	0.9	0.6	0.6	0.9
Коэффициент асимметрии	0.1	0.2	0.1	0.2
Коэффициент автокорреляции	0.14	0.11	0.23	0.18
Статистическая значимость коэффициента автокорреляции	9.5	12.2	13.6	10.9

Результаты оценки однородности среднегодовых температур сведены в таблицу 2.3.2, в которой представлена проверка однородности максимальных и минимальных температурных экстремумов с использованием критериев Диксона и Смирнова-Граббса для метеорологических станций, расположенных на территории Северного моря. Необходимо установить принятие гипотезы об однородности данных или указать на её отклонение. Если расчетное значение меньше критического, то гипотеза об однородности принимается.

Таблица 2.3.2 – Расчетные значения оценки однородности температуры для выбранных метеостанций Северного моря

Критерий		Метеостанция					
		Ставангер			Абердин		
		Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод	Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод
max	Диксон1	0.1000	0.18	однороден	0.0667	0.21	однороден
max	Диксон2	0.1026	0.21	однороден	0.0714	0.22	однороден
max	Диксон3	0.2051	0.26	однороден	0.1071	0.27	однороден
max	Диксон4	0.2162	0.27	однороден	0.1154	0.28	однороден
max	Диксон5	0.2000	0.25	однороден	0.1000	0.26	однороден
min	Диксон1	0.0250	0.15	однороден	0.0667	0.13	однороден
min	Диксон2	0.0278	0.15	однороден	0.0714	0.15	однороден
min	Диксон3	0.0833	0.2	однороден	0.1429	0.19	однороден
min	Диксон4	0.0938	0.22	однороден	0.1481	0.2	однороден
min	Диксон5	0.0750	0.19	однороден	0.1333	0.17	однороден
max	Смирнов- Граббс	2.6685	3.34	однороден	2.4512	3.46	однороден
min	Смирнов- Граббс	1.9302	3.37	однороден	2.5250	3.52	однороден
Критерий		Метеостанция					
		Леруик			Нордени		
		Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод	Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод
max	Диксон1	0.0286	0.18	однороден	0.0000	0.21	однороден
max	Диксон2	0.0333	0.19	однороден	0.0000	0.22	однороден
max	Диксон3	0.1000	0.24	однороден	0.0270	0.27	однороден
max	Диксон4	0.1000	0.25	однороден	0.0278	0.28	однороден
max	Диксон5	0.0857	0.23	однороден	0.0270	0.26	однороден
min	Диксон1	0.1429	0.16	однороден	0.0000	0.13	однороден
min	Диксон2	0.1471	0.17	однороден	0.0000	0.15	однороден
min	Диксон3	0.1471	0.22	однороден	0.0270	0.19	однороден
min	Диксон4	0.1563	0.23	однороден	0.0278	0.2	однороден
min	Диксон5	0.1429	0.2	однороден	0.0270	0.17	однороден
max	Смирнов- Граббс	2.4795	3.21	однороден	2.2769	3.46	однороден
min	Смирнов- Граббс	2.9808	3.21	однороден	1.9320	3.52	однороден

Применение критерия Диксона не выявило значений, которые можно было бы считать выбросами, статистически значимо отличающимися от остальных наблюдений в каждом из четырех наборов данных.

Применение критерия Смирнова-Граббса также не выявило выбросов, превышающих пороговые значения распределения Граббса для каждого из наборов данных по отдельности.

С учетом двух проверок однородности по упомянутым критериям можно сделать вывод, что данные температур воздуха по 4 станциям Северного моря не содержат аномальных результатов, которые могли бы исказить общую картину или статистический анализ. Данные достаточно однородны, и можно полагаться на их статистическую достоверность при дальнейшем работе.

Отдельно была проанализирована однородность ряда температур для самого холодного месяца года и самого теплого месяца. Результаты для января приведены в таблице 2.3.3.

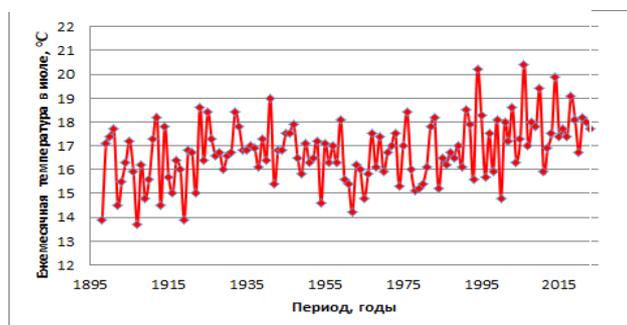
Таблица 2.3.3 - Расчетные значения оценки однородности температур января для выбранных метеостанций Северного моря

Критерий		Метеостанция					
		Ставангер			Абердин		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
max	Диксон1	0.000	0.196	однороден	0.063	0.18	однороден
max	Диксон2	0.000	0.215	однороден	0.068	0.19	однороден
max	Диксон3	0.067	0.263	однороден	0.122	0.24	однороден
max	Диксон4	0.071	0.273	однороден	0.132	0.25	однороден
max	Диксон5	0.061	0.246	однороден	0.113	0.23	однороден
min	Диксон1	0.088	0.183	однороден	0.075	0.16	однороден
min	Диксон2	0.088	0.186	однороден	0.080	0.17	однороден
min	Диксон3	0.132	0.236	однороден	0.160	0.22	однороден
min	Диксон4	0.140	0.253	однороден	0.169	0.23	однороден
min	Диксон5	0.132	0.225	однороден	0.150	0.2	однороден
max	Смирнов-Граббс	1.774	3.096	однороден	2.384	3.21	однороден
min	Смирнов-Граббс	2.794	3.096	однороден	3.304	3.21	не однороден
Критерий		Метеостанция					
		Леруик			Нордени		

		Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод	Расчет- ное	Крити- ческое	Вывод
max	Диксон1	0.030	0.178	однороден	0.031	0.178	однороден
max	Диксон2	0.031	0.188	однороден	0.033	0.188	однороден
max	Диксон3	0.108	0.235	однороден	0.090	0.236	однороден
max	Диксон4	0.108	0.245	однороден	0.100	0.246	однороден
max	Диксон5	0.106	0.228	однороден	0.087	0.228	однороден
min	Диксон1	0.015	0.158	однороден	0.039	0.158	однороден
min	Диксон2	0.016	0.168	однороден	0.041	0.168	однороден
min	Диксон3	0.016	0.215	однороден	0.138	0.216	однороден
min	Диксон4	0.017	0.225	однороден	0.147	0.226	однороден
min	Диксон5	0.015	0.198	однороден	0.134	0.198	однороден
max	Смирнов- Граббс	2.343	3.196	однороден	2.035	3.198	однороден
min	Смирнов- Граббс	2.858	3.196	однороден	3.130	3.198	однороден

В результате проверки однородности температур января был выявлен только один ряд с неоднородностью минимальных значений по критерию Смирнова-Граббса. Неоднородность выявлена для станции Абердин. Распределение температур января для исследуемого ряда представлен на рисунке 2.3.2. Первичный анализ на выбросы не показал наличие явных выбросов. Вероятно, данные изменения связаны с изменением климата.

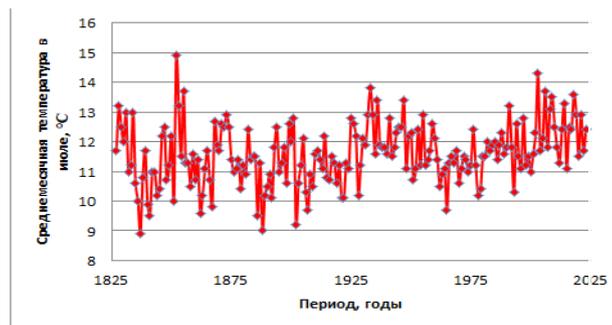
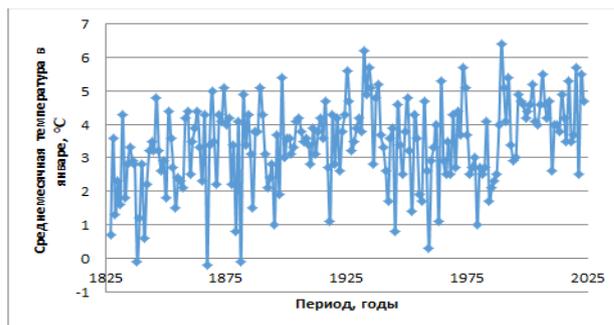
а)



б)



В)



Г)

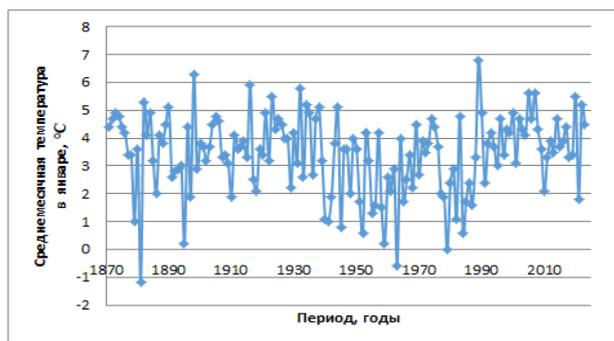


Рисунок 2.3.1 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры января и июля на станциях:

а – о. Нордени, б – Ставангер, в – Леруик, г – Абердин

Результаты расчетов однородности температур июля для исследуемых метеостанций Северного моря представлены в таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.4

Расчетные значения оценки однородности температур июля для выбранных метеостанций Северного моря

Критерий		Метеостанция					
		Ставангер			Абердин		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
max	Диксон1	0.174	0.229	однороден	0.0678	0.199	однороден
max	Диксон2	0.179	0.243	однороден	0.0702	0.209	однороден
max	Диксон3	0.179	0.29	однороден	0.1053	0.258	однороден
max	Диксон4	0.179	0.299	однороден	0.1154	0.268	однороден
max	Диксон5	0.174	0.283	однороден	0.1017	0.249	однороден
min	Диксон1	0.029	0.116	однороден	0.0339	0.141	однороден
min	Диксон2	0.035	0.13	однороден	0.0364	0.154	однороден
min	Диксон3	0.035	0.167	однороден	0.1273	0.198	однороден
min	Диксон4	0.035	0.174	однороден	0.1321	0.207	однороден
min	Диксон5	0.029	0.156	однороден	0.1186	0.181	однороден
max	Смирнов-Граббс	2.983	3.64	однороден	2.8026	3.39	однороден
min	Смирнов-Граббс	2.010	2.599	однороден	2.6592	2.973	однороден
Критерий		Метеостанция					
		Леруик			Нордени		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
max	Диксон1	0.1000	0.19	однороден	0.0299	0.194	однороден
max	Диксон2	0.1017	0.201	однороден	0.0308	0.204	однороден
max	Диксон3	0.1864	0.246	однороден	0.0769	0.254	однороден
max	Диксон4	0.1930	0.256	однороден	0.0769	0.264	однороден
max	Диксон5	0.1833	0.241	однороден	0.0746	0.244	однороден
min	Диксон1	0.0167	0.141	однороден	0.0299	0.148	однороден
min	Диксон2	0.0185	0.153	однороден	0.0308	0.16	однороден
min	Диксон3	0.0556	0.195	однороден	0.0308	0.206	однороден
min	Диксон4	0.0612	0.204	однороден	0.0323	0.216	однороден
min	Диксон5	0.0500	0.181	однороден	0.0299	0.188	однороден
max	Смирнов-Граббс	3.2635	3.324	однороден	2.8290	3.339	однороден
min	Смирнов-Граббс	2.6365	2.998	однороден	2.3969	3.051	однороден

Оценка однородности температур июля показала однородный результат по критериям Диксона и Смирного-Граббса для всех исследуемых метеостанций.

Результаты оценки стационарности рядов температур для четырех станций Северного моря, определенные на основе использования статистических критериев Фишера (F-тест) и t-критерия Стьюдента (t - тест), подробно изложены в таблице 2.3.3. Эта таблица содержит данные, отражающие выявленные инциденты, когда временные ряды на отдельных станциях демонстрировали признаки нестационарности. В анализе были учтены основные статистические характеристики рядов, такие как среднее значение, дисперсия и стандартное отклонение, что позволило точно определить станции и периоды, не соответствующие условиям стационарности. Критерий Фишера применяется для сравнения дисперсий двух выборок, в то время как t-критерий Стьюдента используется для сравнения средних значений. Наличие значений, которые статистически значимо отличаются от ожидаемых при условии стационарности, указывает на возможные проблемы, обусловленные изменениями в распределении данных или другими факторами, влияющими на однородность временного ряда.

Таблица 2.3.3 - Расчетные значения оценки стационарности температуры для выбранных метеостанций Северного моря

Станция	t-тест (значение)	t-тест (p-значение)	Результат	F-тест (значение)	F-тест (p-значение)	Результат
Абердин	-3.833	1.85E-04	+	0.593	0.01227	+
Леруик	-8.899	3.87E-16	+	0.865	0.23847	-
Нордени	-5.162	9.43E-07	+	0.479	2.16E-03	+
Ставангер	-4.354	3.43E-05	+	0.499	9.95E-03	+

Значение t-статистики для температуры на станции Абердин равно - 3.833. Это отрицательное значение указывает на то, что среднее значение температуры в первом периоде времени было выше, чем во втором. Однако p-значение для температуры равно 0.000185 (0.0185%). Это значение ниже

общепринятого уровня значимости 0.05, что говорит о том, что различие между средними значениями температуры в двух периодах статистически значимо.

На Леруике t-статистика показала значение -8.899, свидетельствуя о значительной разнице в температурах между двумя временными промежутками. С р-значением, приближающимся к нулю ($3.87e-16$), результат выходит за рамки обычной значимости. Однако F-тест со статистикой 0.865 и р-значением 0.23847 не выявил различий в распределении температур, при уровне значимости 0.05.

Для островной станции Нордени t-статистика в -5.162 говорит о заметном понижении средней температуры. Р-значение в $9.42e-07$ также дает уверенность в статистической значимости изменения. F-тест указывает на отличия в дисперсии с числом 0.479 и р-значением 0.00216, оба ниже критического порога.

Статистика температуры Ставангера (-4.354) отражает понижение средней температуры в последующий период. С р-значением $3.43e-05$, заключаем, что изменения статистически значимы. Подобным образом, F-статистика в 0.499 и р-значение 0.00995 свидетельствуют о значимости различий в дисперсии.

Выводы указывают на статистические изменения температур на Абердине и Ставангере. На Леруике наблюдаем существенную разницу в средних температурах, но не в дисперсии. На острове Нордени выявлены значимые изменения как в средних показателях, так и в вариативности.

Отдельно была проанализирована однородность ряда температур для самого холодного месяца года и самого теплого месяца. Результаты для января приведены в таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.4 - Расчетные значения оценки стационарности температуры для
выбранных метеостанций Северного моря

Станция	t-тест (значение)	t-тест (p-значение)	Результат	F-тест (значение)	F-тест (p-значение)	Результат
Январь						
Абердин	1.46	0.1451	-	0.91	0.3363	-
Леруик	-2.47	0.0155	+	1.17	0.6933	-
Нордени	-1.98	0.0495	+	0.85	0.2579	-
Ставангер	-1.83	0.0705	-	0.84	0.2835	-
Июль						
Абердин	-3.81	0.0002	+	0.71	0.0667	-
Леруик	-2.54	0.0129	+	0.84	0.2869	-
Нордени	-2.18	0.03066	+	0.75	0.1289	-
Ставангер	-2.81	0.0061	+	0.62	0.0477	+

При анализе ряды температуры не приводились к одному временному отрезку и исследовались при полной доступности данных, исключая обнаруженные нарушения однородности.

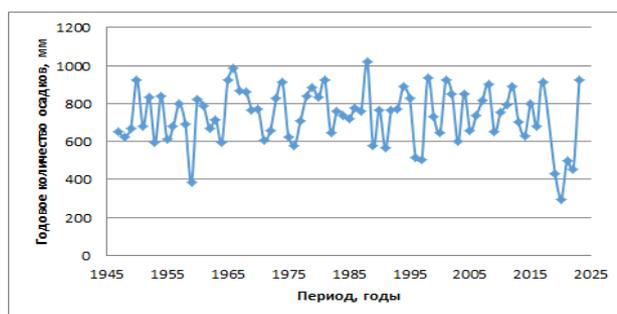
2.4. Оценка однородности и стационарности осадков Северного моря

Оценка стационарности и однородности температуры и осадков — это два ключевых аспекта в области климатологии, имеющие свои специфические особенности. Есть несколько различий в стационарности и однородности временных рядов этих величин.

Температура в значительной мере зависит от воздействия таких глобальных факторов, как изменения солнечной активности, вулканическая активность и антропогенные выбросы парниковых газов, что обуславливает общие тенденции нагревания или охлаждения. Осадки же управляются также региональными факторами, такими как местный рельеф, близость к водным объектам и воздушные массы, что делает их распределение более изменчивым

и локализованным. Изменения в температурных рядах часто анализируются с точки зрения общей тенденции или тренда, в то время как для осадков большое значение имеют экстремальные события, такие как засухи или наводнения. Эти события требуют отдельного изучения явлений, возникающих с малой вероятностью, но оказывающих весомый эффект.

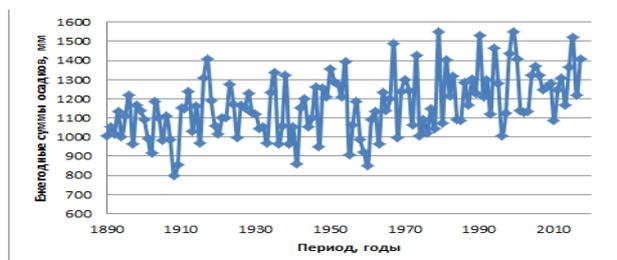
а)



б)



в)



г)

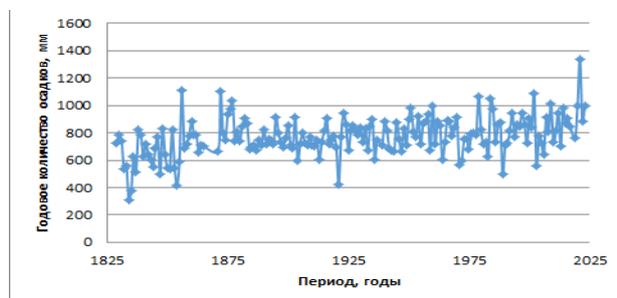


Рисунок 2.4.1 – Временные графики изменения годового количества осадков на станциях: а – о. Нордени, б – Ставангер, в – Леруик, г – Абердин

Если говорить об однородности, то измерения температуры обычно более однородны во времени, так как методы измерения не сильно изменились на протяжении многих десятилетий. Однако данные об осадках могут быть более подвержены неоднородностям из-за изменений в методах сбора данных, перемещения измерительных станций или воздействия местной застройки и изменений в ландшафте. Помимо этого, осадки имеют высокую пространственную изменчивость даже на коротких дистанциях из-за мезомасштабных явлений погоды (например, локальные ливни или грозы), что может влиять на однородность рядов в случае перемещения или изменения покрытия сети наблюдений. Для температуры такая пространственная изменчивость, хотя и присутствует, выражена в меньшей степени.

В целом, оценка стационарности и однородности рядов температуры имеет меньше ограничений по сравнению с осадками и обычно может быть более точной и предсказуемой. Осадки же, будучи более чувствительными к локализованным эффектам, требуют более детализированного подхода с учетом региональных особенностей и предполагают большую степень неопределенности в оценках.

Промежуточные расчетные значения статистических характеристик для временных рядов годовых сумм осадков для метеостанций Северного моря представлены в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 - Статистические характеристики рядов осадков для Северного моря

Статистические характеристики	Метеостанция			
	Ставангер	Абердин	Леруик	Нордени
Объём выборки	71	188	134	76
Среднее значение ряда	1162.01	772.0	1139.52	733.82
Среднее квадратическое отклонение	213.62	141.1	170.62	145.74
Коэффициент асимметрии	-0.15	0.10	0.15	-0.54
Коэффициент автокорреляции	-0.04	0.35	0.29	0.18

Статистические характеристики	Метеостанция			
	Ставангер	Абердин	Леруик	Нордени
Статистическая значимость коэффициента автокорреляции	8.24	12.72	10.95	8.54

Результаты проверки на однородность максимальных и минимальных значений экстремумов осадков представлены в Таблице 2.4.2. Для анализа данных с метеостанций, расположенных на побережье Северного моря, были также применены критерии Диксона и Смирнова-Граббса. Оценка состояла в том, чтобы определить, следует ли принять предположение о том, что ряды данных однородны, или же данные свидетельствуют об обратном. Если полученное значение оказывается ниже критического, то гипотеза о однородности данных подтверждается.

Таблица 2.4.2 - Расчетные значения оценки однородности осадков для выбранных метеостанций Северного моря

Критерий		Метеостанция					
		Ставангер			Абердин		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
max	Диксон1	0.1033	0.21	однороден	0.0667	0.2	однороден
max	Диксон2	0.1096	0.24	однороден	0.0714	0.21	однороден
max	Диксон3	0.1843	0.29	однороден	0.1071	0.25	однороден
max	Диксон4	0.2162	0.3	однороден	0.1154	0.26	однороден
max	Диксон5	0.1736	0.27	однороден	0.1000	0.25	однороден
min	Диксон1	0.0579	0.17	однороден	0.0667	0.13	однороден
min	Диксон2	0.0645	0.18	однороден	0.0714	0.14	однороден
min	Диксон3	0.2195	0.22	однороден	0.1429	0.18	однороден
min	Диксон4	0.2381	0.24	однороден	0.1481	0.23	однороден
min	Диксон5	0.1968	0.21	однороден	0.1333	0.17	однороден
max	Смирнов-Граббс	2.6355	3.22	однороден	2.4512	3.39	однороден

Критерий		Метеостанция					
		Ставангер			Абердин		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
min	Смирнов-Граббс	2.6216	2.96	однороден	2.5250	3.45	однороден
Критерий		Метеостанция					
		Леруик			Нордени		
		Расчетное	Критическое	Вывод	Расчетное	Критическое	Вывод
max	Диксон1	0.0162	0.2	однороден	0.0483	0.26	однороден
max	Диксон2	0.0166	0.21	однороден	0.0551	0.29	однороден
max	Диксон3	0.0306	0.25	однороден	0.1291	0.34	однороден
max	Диксон4	0.0307	0.26	однороден	0.1397	0.35	однороден
max	Диксон5	0.0299	0.25	однороден	0.1133	0.33	однороден
min	Диксон1	0.0224	0.13	однороден	0.1229	0.12	не однород.
min	Диксон2	0.0228	0.14	однороден	0.1292	0.14	однороден
min	Диксон3	0.0266	0.18	однороден	0.1988	0.17	не однород.
min	Диксон4	0.0270	0.23	однороден	0.2134	0.18	не однород.
min	Диксон5	0.0262	0.17	однороден	0.1892	0.16	не однород.
max	Смирнов-Граббс	2.4820	3.39	однороден	1.9568	3.68	однороден
min	Смирнов-Граббс	2.2184	3.45	однороден	3.0110	2.39	не однород.

По результатам оценки однородными оказались все ряды наблюдений, кроме метеостанции с острова Нордени. Значения критериев Диксона для минимальных значений превышают критические значения, полученные из таблиц. Кроме этого, ряд также не однороден и имеет минимальные экстремумы, которые превышают допустимую норму по критерию Смирнова-Граббса.

Если временной ряд минимальных температурных значений на метеостанции Нордени проявляет неоднородность согласно критериям

Диксона и Смирнова-Граббса, возможно, это связано с одним или несколькими факторам:

- Естественные колебания погоды и климатические явления, такие как Эль-Ниньо, Ла-Нинья, вулканическая активность или другие глобальные климатические модели, могут приводить к существенным изменениям в количестве осадков.

- Также следует обратить внимание на изменения в землепользовании, урбанизация, обезлесение и иные изменения на поверхности могут влиять на местные погодные условия и, соответственно, на осадки.

- Не следует исключать и инструментальные ошибки. Повреждение или неправильное обслуживание метеорологического оборудования, изменения в методологии сбора данных или перемещение станции могут приводить к неправильной регистрации данных о погоде.

- Различные человеческие факторы, включая промышленные выбросы и загрязнения, могут изменить климатические показатели, включая уровень осадков.

- Временной ряд может случайно содержать статистические аномалии или выбросы, которые не обязательно отражают реальные изменения в погоде, но могут существенно влиять на анализ данных.

- Глобальное потепление и связанные с ним изменения в климате могут привести к изменениям в распределении и интенсивности осадков.

Для определения точной причины неоднородности в данных о минимальных значениях осадков требуется дополнительный анализ, который мог бы включать более глубокое исследование потенциальных источников ошибок, использование дополнительных статистических инструментов для анализа временных рядов и учет контекста исторических и современных климатических событий.

Проверка осадков на стационарность проводилась также с помощью использования статистических критериев Фишера (F-тест) и t-критерия Стьюдента (t - тест). Результаты расчетов и вывод о статистической значимости (+) и не значимости (-) приведены в таблице 2.4.3.

Таблица 2.4.3 - Расчетные значения оценки стационарности осадков для выбранных метеостанций Северного моря

Станция	t-тест (значение)	t-тест (p-значение)	Результат	F-тест (значение)	F-тест (p-значение)	Результат
Абердин	-3.841	1.68E-04	+	1.196	0.80545	-
Леруик	-5.291	4.92E-07	+	1.042	0.54102	-
Нордени	1.655	0.10223	-	0.418	0.01299	+
Ставангер	-0.889	0.37736	-	0.633	0.09262	-

Анализ t-теста для станции Абердин показал значительное уменьшение среднего количества осадков, что выразилось в отрицательной t-статистике и крайне низком p-значении, указывающих на статистическую значимость результатов. Тем не менее, по результатам F-теста статистически значимых изменений в вариации уровней осадков обнаружено не было, так как полученное p-значение превысило принятый порог значимости.

Для станции Леруик t-тест также выявил существенное снижение средних значений осадков, о чём свидетельствует отрицательное значение t-статистики и заметно маленькое p-значение. В то же время, результаты F-теста не указали на наличие статистически значимых различий в дисперсии осадков между сравниваемыми периодами.

В данных для острова Нордени наблюдалось повышение средних значений осадков, согласно положительному значению t-статистики. Однако p-значение свидетельствовало о том, что данное различие не является

статистически значимым. При этом, согласно F-тесту, вариативность осадков статистически значимо сократилась, что подтверждается низким p-значением.

На станции Ставангер результаты осадков отсутствуют статистически значимых изменений как в средних значениях, так и в дисперсии. Это подтверждается t-тестом с отрицательной t-статистикой и высоким p-значением, а также F-тестом, не показавшим значимых различий в вариативности осадков.

Таким образом, исследование обнаружило статистически значимое уменьшение средних значений осадков на станциях Абердин и Леруик, в то время как для острова Нордени и Ставангера таких изменений выявлено не было. При этом снижение дисперсии осадков было статистически значимым только для острова Нордени. Полученные результаты подчёркивают сложность и неоднородность паттернов осадков в разных регионах и подтверждают важность дальнейшей последовательной работы в области климатических исследований.

3 ГЛАВА. ОЦЕНИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ СЕВЕРНОГО МОРЯ

3.1 Статистические методы оценивания современных климатических изменений

Климатическая система Земли, которая включает в себя атмосферу, гидросферу, криосферу, биосферу и литосферу, является сложной и динамично изменяющейся системой. Эти изменения оцениваются на основе широкого набора параметров, включая атмосферные характеристики (такие как температура воздуха, осадки и давление), характеристики других природных сфер (уровень мирового океана, речной сток, площадь морского льда, количество выделяемого органического углерода) и внешние факторы (например, колебания солнечной активности и орбитальных параметров Земли).

Изменчивость климатической системы оценивается на разных временных масштабах, от нескольких секунд до сотен тысяч лет. На любом рассматриваемом временном интервале структура временного ряда данных может быть представлена либо стационарной, либо нестационарной моделью.

В стационарной модели предполагается, что основные параметры временного ряда, такие как среднее значение и дисперсия, остаются неизменными во времени. Средние значения за многолетний период наблюдений определяются как климатическая норма. Такие модели применяются на небольших отрезках времени (например, 30 лет), где колебания климатических характеристик считаются квазистационарными.

Стационарная модель характеризуется неизменными во времени средними значениями и средним квадратическим отклонением:

$$S_r(t) = \text{const}, \sigma(t) = \text{const}, \quad (1)$$

где Sr и σ – среднее значение ряда и среднее квадратическое отклонение, t – время.

Практическая проверка этих условий осуществляется с использованием статистических тестов, таких как критерии Стьюдента и Фишера, которые были проведены во второй главе.

Анализ временных изменений таких рядов проводится к выявлению следующих тенденций:

- Монотонные изменения (линейный тренд), которые представляют собой линейное увеличение или снижение анализируемой характеристики во времени. Модель линейного тренда описывается уравнением:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, (2)$$

где b_1 , b_0 – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов (МНК). Тренд анализируется на значение коэффициента корреляции (R), который показывает степень линейной зависимости между временем и климатической характеристикой.

- Ступенчатые переходы, представляющие собой резкие изменения состояния системы от одного стационарного уровня к другому.

Ступенчатую модель можно представить как совокупность двух или более стационарных интервалов с постоянными средними значениями и дисперсиями для каждого интервала. Момент перехода определяется либо визуально, либо с использованием дополнительных данных. В нашем случае точка бифуркации определялась визуально.

- Циклические колебания, которые характеризуют периодические изменения, включающие сезонные и более длительные циклы.

Гармоническая модель представляет временной ряд в виде суммы гармонических функций:

$$Y_i = B_1 \sin\left(\frac{t_i}{T_1}\right) + B_2 \sin\left(\frac{t_i}{T_2}\right) + \dots + B_0, \quad (3)$$

где Y_i – рассматриваемая климатическая характеристика; t_i – годы, T_1, T_2, \dots – периоды циклов; B_1, B_2, \dots, B_0 – коэффициенты, определяемые по МНК и связанные с амплитудой гармоник и их фазой. Статистическая значимость этих коэффициентов проверяется на основе доверительных интервалов.

Для выбора наиболее эффективной модели временного ряда проводится сравнение остаточных дисперсий или стандартных отклонений разных моделей относительно базовой (стационарной) модели. Используется критерий Фишера для оценки значимости различий в дисперсиях.

Современные методы статистической оценки климата включают в себя разнообразный набор моделей и статистических тестов для анализа временных рядов данных. Эти методы позволяют выделить тренды, циклические колебания и ступенчатые изменения, а также оценить их значимость и влияние на климатическую систему.

Методы линейного тренда, ступенчатых изменений и гармоническая модель являются классическими подходами для анализа и моделирования временных рядов, и каждый из них применяется для решения различных задач в зависимости от характера и свойств данных.

Метод линейного тренда используется для идентификации и количественной оценки долгосрочного угла наклона и направления изменения данных во времени. Основная цель метода заключается в выявлении общей тенденции, позволяющей определить, увеличиваются или уменьшаются значения ряда с течением времени. Этот метод также полезен для сравнения трендов между различными временными сериями или рядами и для экстраполяции будущих значений на основе существующей линейной тенденции. Математически линейная модель представляется как средняя прямая линия изменений и коэффициентом наклона, где ошибка модели учитывает отклонения данных от линии тренда.

Модель ступенчатых изменений применяется для выявления и описания дискретных переходов или "скачков" в данных. Цель использования этой модели — идентификация структурных переломов, где происходят значительные изменения в данных. Этот подход позволяет анализировать временные ряды, разделенные на разные периоды с различными характеристиками, и проводить сравнение средних уровней, дисперсий и других характеристик данных до и после изменения. Математически модель ступенчатых изменений может включать два или больше линейных сегмента, каждый из которых описывается своими параметрами.

Гармоническая модель используется для описания данных, демонстрирующих периодические или циклические паттерны, такие как сезонные колебания. Основная цель гармонической модели — моделирование периодических изменений, анализ и прогнозирование значений ряда с учетом циклических эффектов. Эта модель помогает фильтровать сезонные колебания и выявлять долгосрочные тренды.

Каждый из этих методов выполняет свои специфические задачи в анализе временных рядов, предоставляя информацию для понимания и прогнозирования климатических изменений. Линейный тренд используется для анализа долгосрочных тенденций, модель ступенчатых изменений помогает идентифицировать точки бифуркации и структурные изменения, а гармоническая модель фокусируется на описании и прогнозировании периодических и сезонных изменений. Выбор метода зависит от характера данных и целей анализа, что позволяет наиболее эффективно использовать каждый подход в климатологических исследованиях.

3.2 Моделирование климатических изменений температуры для января

В таблице 3.2.1 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры января для рассматриваемых станций Северного моря.

Таблица 3.2.1 – Основные параметры стационарных моделей станций Северного моря

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Абердин	3,48	1,36
Леруик	3,43	1,27
Нордени	2,12	2,29
Ставангер	1,47	2, 50

На рисунке 3.2.1 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с временными графиками среднемесячных температур января.

В таблице 3.2.2 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры января станций Северного моря. Первоначально, для проверки статистической значимости модели линейного тренда оценивалась статистическая значимость коэффициента корреляции R , для этого выполнялась проверка условия (3.7). Для всех станций, за исключением станции Абердин, линейная модель является статистически значимой.

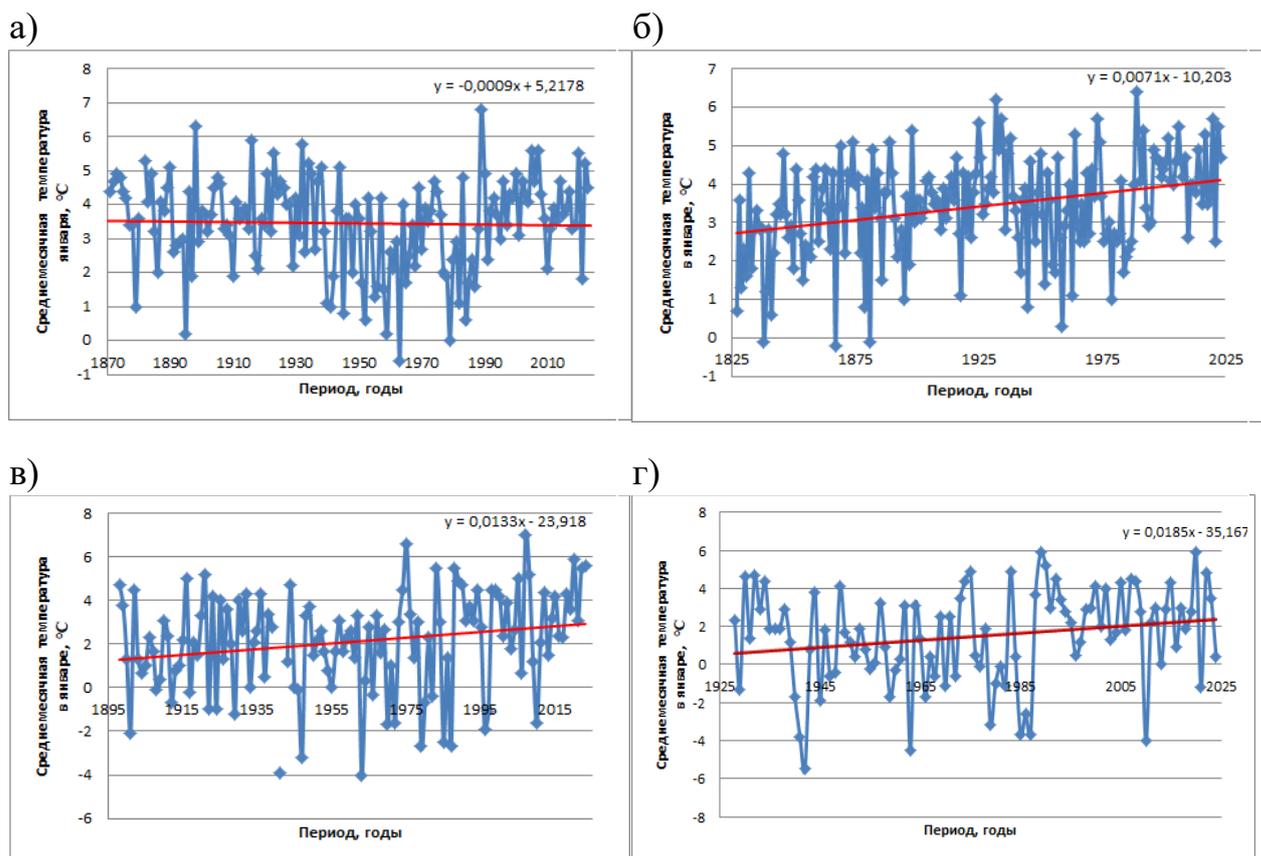


Рисунок 3.2.1 – Линейная модель среднемесячных температур в январе для станций Северного моря:
а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

Таблица 3.2 - Основные параметры линейной модели станций Северного моря

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Абердин	5,22	-0,0009	0,11	0,15	Незначима	1,35
Леруик	-10,20	0,0071	0,32	0,11	Значима	1,20
Нордени	23,92	0,0133	0,21	0,17	Значима	2,23
Ставангер	35,17	0,0185	0,21	0,20	Значима	2,44

На рисунке 3.2.2 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур января.

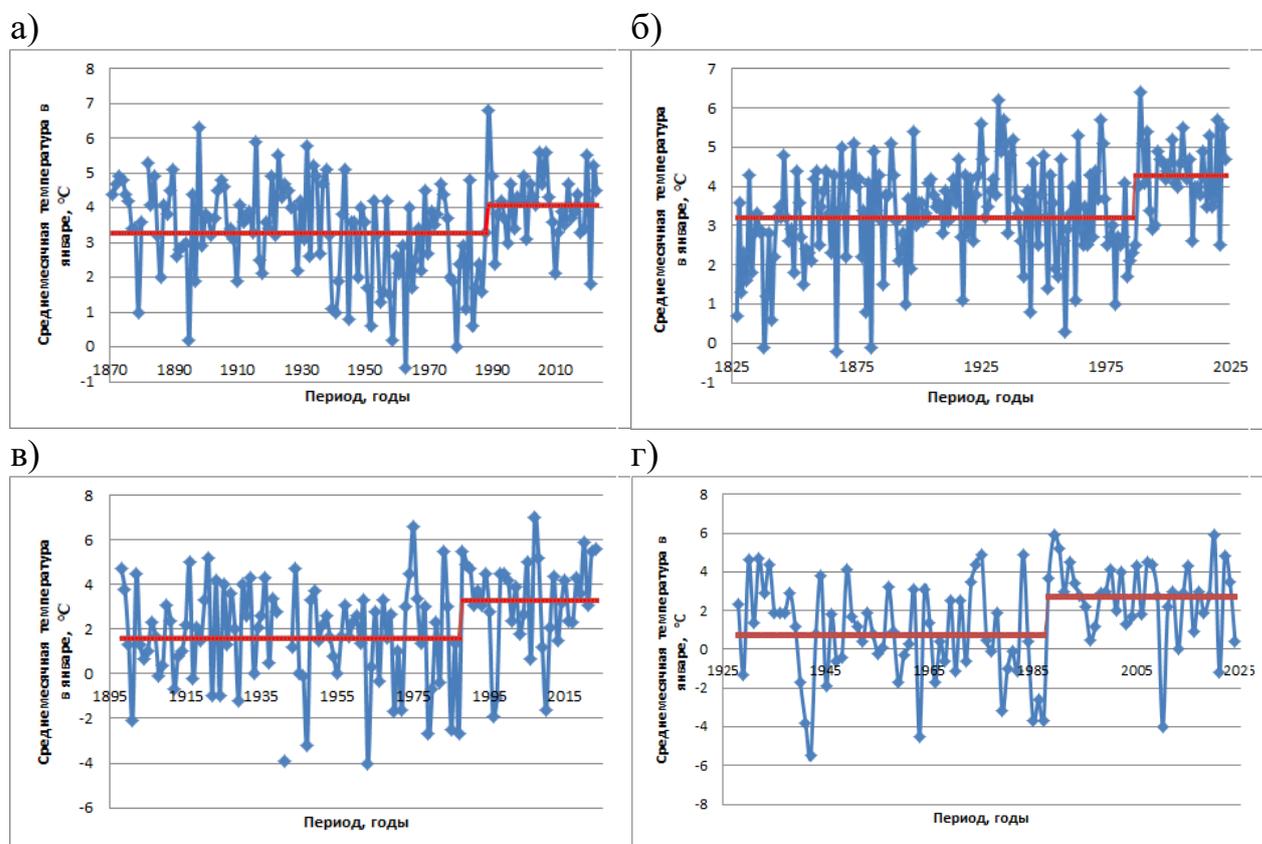


Рисунок 3.2.1 – Модель ступенчатых изменений среднемесячных температур в январе для станций Северного моря:

а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.2.3. В таблице 3.2.4 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных табл. 3.2.4 показывает, что нестационарные модели не являются эффективными и статистически значимыми, т.к. не выполняется условие (3.15) и критические значения статистик Фишера F^* больше расчетных значений.

Таблица 3.2.3 – Основные параметры ступенчатой модели станций
рассматриваемых станций Северного моря

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Абердин	1	117	3,28	1,39	1,31
	2	35	4,10	1,03	
Леруик	1	160	3,22	1,26	1,20
	2	38	4,29	0,91	
Нордени	1	88	1,63	2,21	2,17
	2	36	3,30	2,05	
Ставангер	1	60	0,72	2,50	2,32
	2	37	2,69	1,97	

Таблица 3.2.4 – Оценки эффективности и статистической значимости
моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Абердин	1,36	1,35	1,31	0,58	3,30	1,01	1,07
Леруик	1,27	1,20	1,20	5,17	5,23	1,11	1,11
Нордени	2,29	2,23	2,17	2,30	4,97	1,05	1,11
Ставангер	2,50	2,44	2,32	2,21	6,83	1,05	1,15

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения температуры в январе для станций Северного моря.

3.3 Моделирование климатических изменений температуры для июля

В таблице 3.3.1 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры июля для рассматриваемых станций Северного моря.

Таблица 3.3.1 – Основные параметры стационарных моделей рассматриваемых станций Северного моря

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Абердин	13,87	1,08
Леруик	11,56	0,99
Нордени	16,77	1,28
Ставангер	14,58	1,38

На рисунке 3.3.1 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур июля.

В таблице 3.3.2 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры июля рассматриваемых станций Северного моря.

Для проверки статистической значимости модели линейного тренда оценивалась статистическая значимость коэффициента корреляции R .

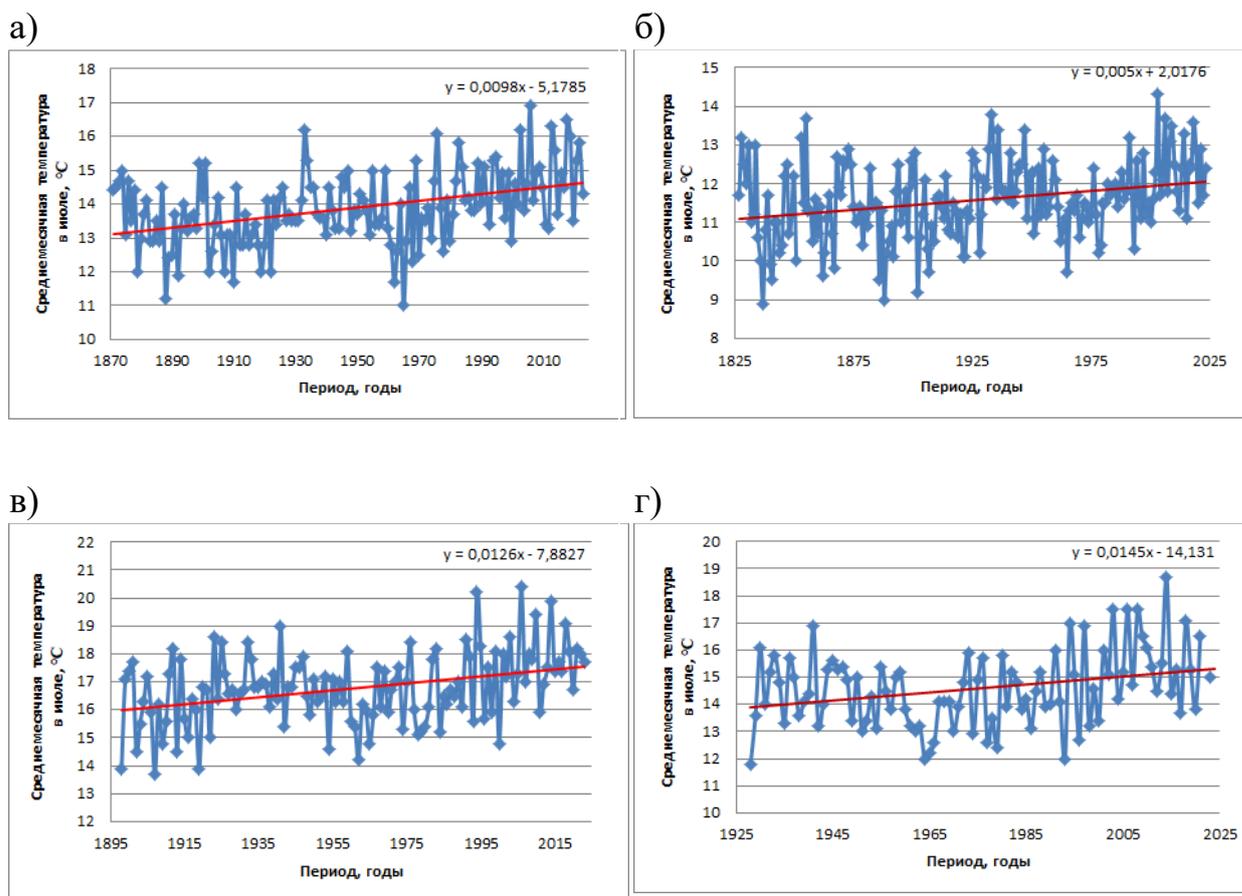


Рисунок 3.3.1 – Линейная модель среднемесячных температур июля для станций Северного моря:

а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

Таблица 3.3.2 - Основные параметры линейной модели станций Северного моря

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Абердин	-5,18	0,0098	0,40	0,15	Значима	0,99
Леруик	2,02	0,0050	0,29	0,11	Значима	0,95
Нордени	-7,88	0,0126	0,36	0,17	Значима	1,20
Ставангер	-14,13	0,0145	0,290145	0,19925	Значима	1,32

На рисунке 3.3.2 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с временными графиками среднемесячных температур июля. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.3.3.

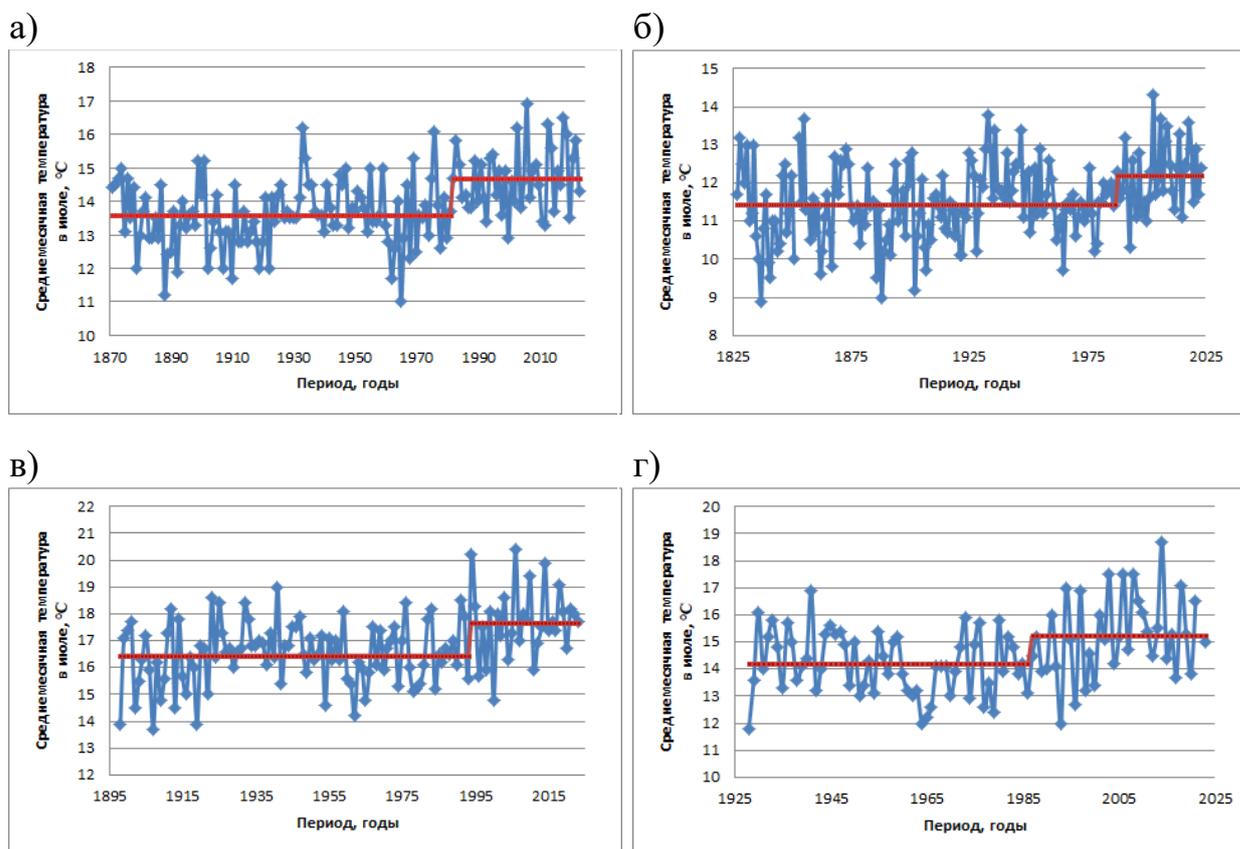


Рисунок 3.3.2 – Модель ступенчатых изменений среднемесячных температур в июле для станций Северного моря:

а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

В таблице 3.3.4 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных таблицы 3.3.4 показывает, что только на станции Абердин ступенчатая модель является эффективной, но не статистической значимой, остальные нестационарные модели не являются эффективными и статистически значимыми.

Таблица 3.3.3 – Основные параметры ступенчатой модели станций
Северного моря

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Абердин	1	111	13,57	0,97	0,97
	2	42	14,67	0,95	
Леруик	1	160	11,42	0,96	0,95
	2	36	12,20	0,89	
Нордени	1	93	16,46	1,12	1,18
	2	33	17,67	1,30	
Ставангер	1	59	14,18	1,15	1,30
	2	36	15,23	1,50	

Таблица 3.3.4 – Оценки эффективности и статистической значимости
моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Абердин	1,08	0,99	0,97	8,41	10,51	1,19	1,25
Леруик	0,99	0,95	0,95	4,14	4,25	1,09	1,09
Нордени	1,28	1,20	1,18	6,64	8,32	1,15	1,19

Ставангер	1,38	1,32	1,30	4,30	5,94	1,09	1,13
-----------	------	------	------	------	------	------	------

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения температуры в июле для станций Северного моря.

3.4 Моделирование климатических изменений количества осадков

В таблице 3.4.1 приведены параметры стационарной модели годового количества осадков для рассматриваемых станций Северного моря.

Таблица 3.4.1 – Основные параметры стационарных моделей станций Северного моря

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Абердин	772,20	141,11
Леруик	1163,13	158,07
Нордени	733,82	145,74
Ставангер	1156,86	212,01

На рисунке 3.4.1 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с временными графиками годовых сумм осадков.

В таблице 3.4.2 приведены основные параметры линейной модели. Для двух станций (Абердин и Леруик) линейная модель является статистически значимой в отношении коэффициента корреляции R .

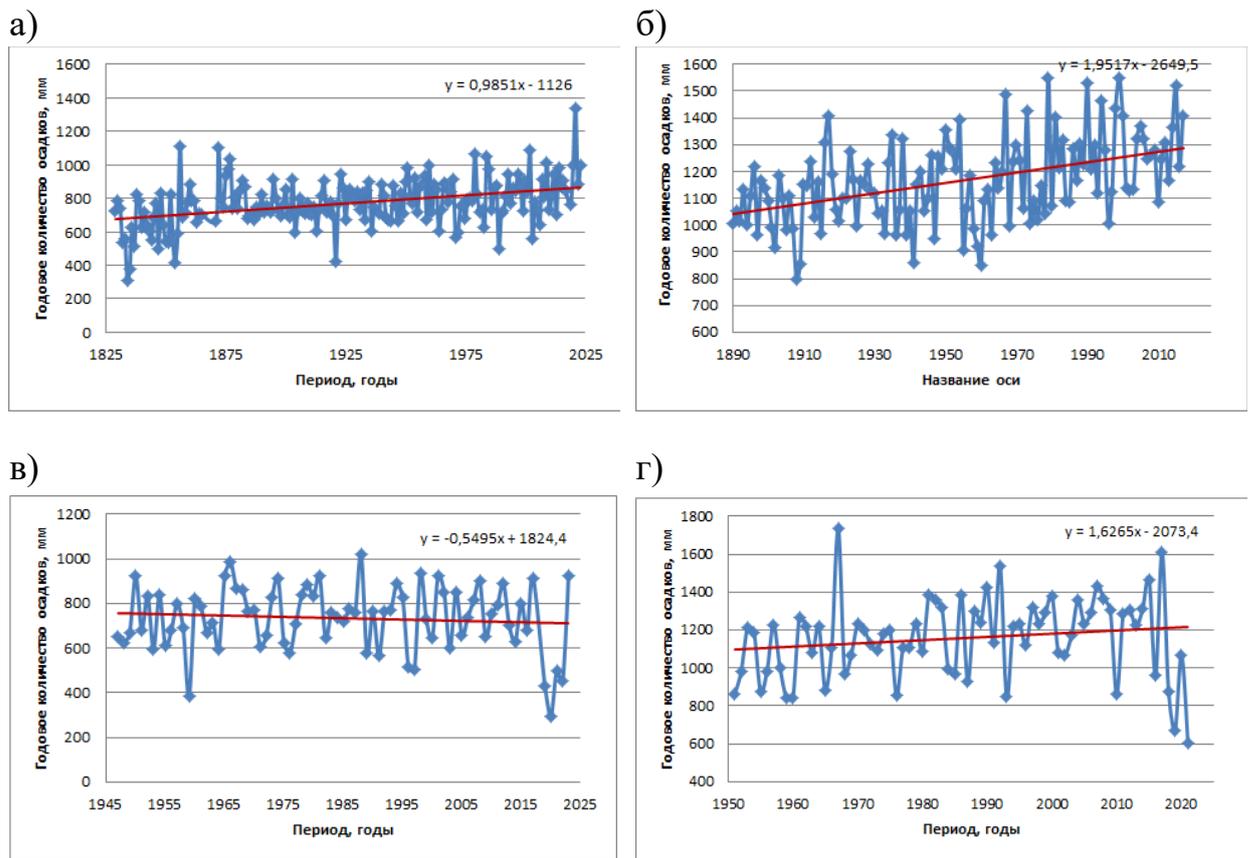


Рисунок 3.4.1 – Линейная модель годового количества осадков для станций Северного моря:
а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

Таблица 3.4.2 - Основные параметры линейной модели станций Северного моря

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Абердин	-1126,05	0,9851	0,39	0,12	Значима	129,77
Леруик	-2649,50	1,9517	0,46	0,17	Значима	140,52
Нордени	1824,36	-0,5495	-0,08	0,22	Незначима	145,23
Ставангер	-2073,43	1,6265	0,16	0,22	Незначима	209,33

На рисунке 3.4.2 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с временными графиками годового количества осадков. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.4.3.

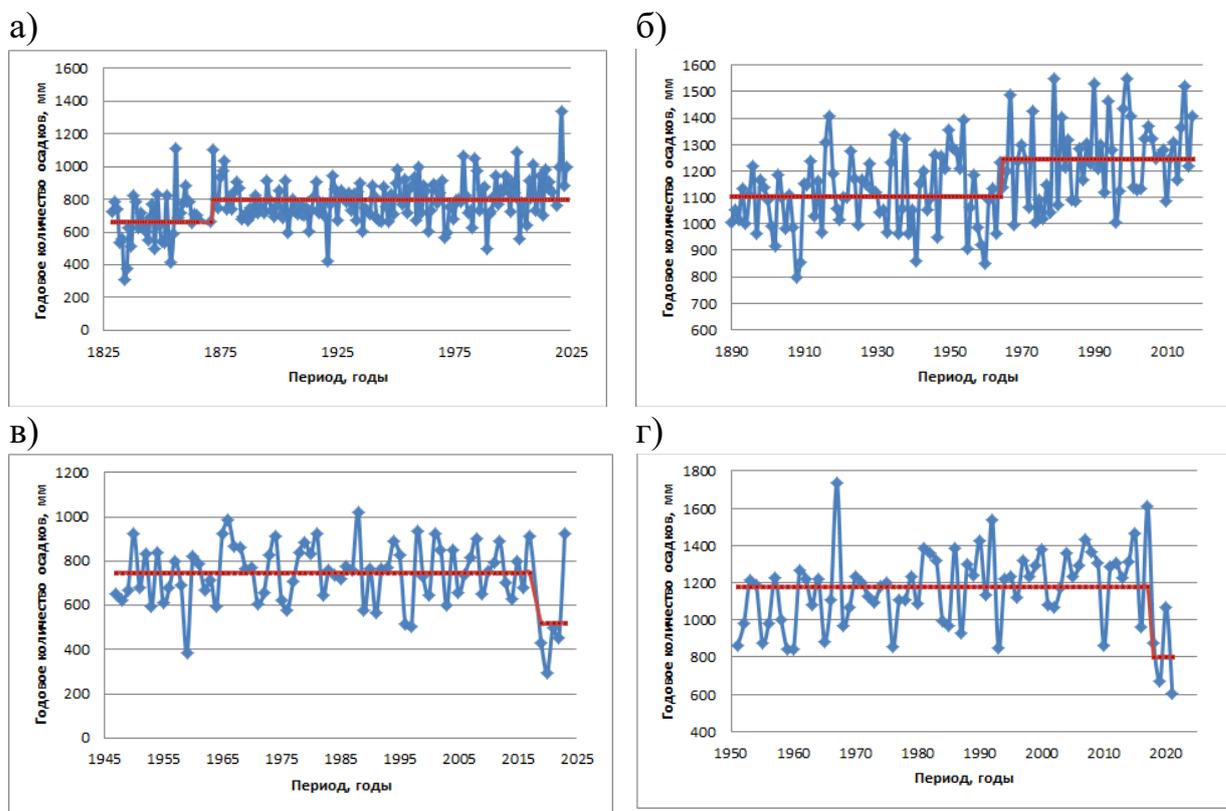


Рисунок 3.4.2 – Модель ступенчатых изменений годового количества осадков для станций Северного моря:

а – Абердин; б – Леруик; в – Нордени; Г – Ставангер

В таблице 3.3.4 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных табл. 3.3.4 показывает, что для станции Леруик линейная модель эффективна, а модель ступенчатых изменений квазиэффективна, но для всех станций нестационарные модели не являются и статистически значимыми.

Таблица 3.4.3 – Основные параметры ступенчатой модели станций
Северного моря

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	$\sigma_{ст}$
Абердин	1	38	666,03	151,01	131,33
	2	150	799,10	125,40	
Леруик	1	75	1104,30	134,80	142,74
	2	53	1246,39	152,01	
Нордени	1	71	748,85	126,63	137,69
	2	5	520,40	238,09	
Ставангер	1	67	1177,95	193,95	196,41
	2	4	803,75	212,23	

Таблица 3.3.4 – Оценки эффективности и статистической значимости
моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Абердин	141,11	129,77	131,33	8,04	6,93	1,18	1,15
Леруик	158,07	140,52	142,74	11,10	9,70	1,27	1,23
Нордени	145,74	145,23	137,69	0,35	5,52	1,01	1,12
Ставангер	212,01	209,33	196,41	1,26	7,36	1,03	1,17

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения количества осадков для станций Северного моря.

Заключение

Рассмотренные станции Северного моря находятся в северной части Европы и подвержены влиянию Атлантического океана. Сходные воздействия океанических и атмосферных циркуляционных процессов могут способствовать схожим паттернам климатических изменений.

Как показал анализ, температура Северного моря увеличивается. В большинстве случаев ступенчатая модель продемонстрировала наилучшие результаты при анализе временных рядов температуры. Она характеризовалась менее значительным стандартным отклонением остатков по сравнению с другими моделями. Точка бифуркации приходится на 1988 г на 3 станциях из 4, а у оставшейся – на 1993 г. Точки бифуркации могут быть связаны с крупными климатическими событиями или переходами, такими как изменение в Северо-Атлантическом колебании (NAO), что оказывает значительное влияние на климатические условия в этом регионе.

На всех метеостанциях (Норденин, Леруик, Абердин и Ставангер) наблюдается значительная разница между температурами января и июля. Январские температуры значительно ниже июльских температур, причем январь характеризуется большей изменчивостью и нестабильностью температуры, тогда как июльские температуры более стабильны. Это указывает на четко выраженные сезонные колебания температуры в регионе Северного моря.

Как показал анализ, количество осадков, выпадающих в акватории Северного моря, также увеличивается. Относительно осадков точка бифуркации также была выявлена в пределах ограниченного периода, кроме станции Абердин. Там точка бифуркации произошла намного раньше, что может быть обусловлено более продолжительным временным рядом исследуемой величины и означать более ранние изменения климатических условий.

Список использованной литературы:

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
2. Справочно-информационный портал "Погода и климат". pogodaiklimat.ru
3. Нидерландский королевский метеорологический <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?id=someone@>
4. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 1 Учебное пособие. -СПб.: РГГМУ, 2011
5. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 2 Учебное пособие. -СПб.:изд. РГГМУ, 2012
6. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений. - М.: Наука, 2006. – 173 с.
7. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казанский государственный университет. 2009. – 503 с.
8. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А. Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология, 2003, № 1, с. 18-30
9. Будыко М.И., Винников К.Я. Глобальное потепление, Метеорология и гидрология, № 7, 1976, с. 16–26.
10. Электронная версия Большой российской энциклопедии <https://old.bigenc.ru/geography/text/3543760>
11. Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Ч.1. – 2005. – 523 с.
12. 8. Climate explorer [Электронный ресурс]: WMO KNMI: [сайт]. – Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>