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 количества осадков в провинции Хубэй»

Исполнитель Бинлун Чжан

(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

(подпись)

доктор физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Дробжева Яна Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

«07» 06. 2024 г.

Санкт–Петербург
2024

Оглавление

Введение 3

1 Физико-географическое описание провинции Хубэй 5

1.1 Особенности географического положения провинции Хубэй 5

1.2 Рельеф и геологическое строение провинции Хубэй 6

1.3 Гидрологические особенности провинции Хубэй 10

1.4 Особенности почв и растительного покрова провинции Хубэй 13

1.5 Синоптические особенности провинции Хубэй 15

1.6 Выводы по главе 1 20

2 Анализ многолетних рядов температуры и суммы осадков 21

2.1 Выбор пунктов наблюдений 21

2.2 Оценивание качества исходных данных 23

2.3 Оценки однородности и стационарности данных температуры 29

2.4 Оценки однородности и стационарности данных сумм осадков 49

2.5 Выводы по главе 2 61

3 Моделирование климатических изменений температуры и сумм осадков в провинции Хубэй 62

3.1 Статистические модели климатических изменений 62

3.2 Моделирование климатических изменений температуры для января 66

3.3 Моделирование климатических изменений температуры для июля 71

3.4 Моделирование климатических изменений сумм осадков 76

3.5 Выводы по главе 3 82

Заключение 85

Список использованной литературы 87

Введение

Климат над различными районами Земли изменяется не одинаково. Не смотря на широко распространенное мнение о глобальном потеплении, существуют даже области, в которых наблюдается тренд к понижению температуры. Изменение климата приводит к постепенному изменению условий хозяйственной деятельности людей и может быть, как благоприятным, так и не благоприятным.

Целью данной работы являются актуальные модели современных климатических изменений температуры и количества осадков в провинции Хубэй.

Провинция Хубэй – это политический, экономический, культурный и транспортный центр центрального Китая, а также важная база по производству зерна, хлопка и масла. Географическое положение провинции Хубэй занимает центральное место на карте Китайской Народной Республики, граничит с несколькими важными провинциями и имеет большое экономическое, культурное и транспортное значение [1]. Очень важно понять особенности изменения климата и его причины, влияние изменения климата на местную экологию и окружающую среду, а также устойчивое развитие местной экономики и общества.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических особенностей провинции Хубэй;
2. Сформировать базу временных рядов по интересующему району для анализа климатических изменений температуры и количества осадков.
3. Оценить качество временных рядов из сформированной базы данных на однородность и стационарность.

4. Выполнить статистическое моделирование климатических изменений температуры и количества осадков в провинции Хубэй.

В первой главе предполагается рассмотреть влияние особенностей расположения провинции и физико-географических факторов (геологического строения и рельефа, гидрологии, растительного и почвенного покрова), а также синоптические и климатические характеристики региона, которые определяют климат в провинции Хубэй.

Во второй главе сформирована база данных температуры и количества осадков с метеорологических станций в провинции Хубэй, осуществлена проверка качества временных рядов на однородность и стационарность. Из дальнейшего анализа исключены неоднородные экстремумы.

В третьей главе для каждой станции разработаны стационарная и нестационарные модели климатических изменений температуры и суммы осадков, а также модель внутригодовых изменений.

1 Физико-географическое описание провинции Хубэй

В данной главе будет рассмотрено влияние физико-географических особенностей местности на формирование климата в провинции Хубэй.

1.1 Особенности географического положения провинции Хубэй

Провинция Хубэй расположена в южно-центральной части Китайской Народной Республики, но административно является частью региона Центральный Китай (рисунок 1.1). Свое название Хубэй (hoo-BAY; кит. яз. 湖 – дословно «к северу от озера») провинция получила потому, что находится к северу от озера Дунтинху (см. рисунок 1.4). Хубэй сокращенно называется Е. Административным центром провинции является город Ухань.

Рисунок 1.1 – Географическое положение провинции Хубэй

Провинция Хубэй соседствует с провинцией Аньхой на востоке, муниципалитетом Чунцин на западе, провинциями Цзянси и Хунань на юге, провинцией Хэнань на севере и провинцией Шэньси на северо-западе. С севера на юг провинция простирается почти на 470 км (от 29°01'53" с.ш. до 33°16'47" с.ш.), с запада на восток – на почти 740 км (от 108°21'42" в.д. до 116°07'50" в.д.). Провинция имеет площадь 185 900 кв. км, что составляет 1,94% от общей площади страны, занимая 16 место в стране [1].

1.2 Рельеф и геологическое строение провинции Хубэй

С геологической точки зрения, через провинцию Хубэй проходит граница двух крупных тектонических образований: Циньлинской складчатой системы и квазиплатформы Янцзы (рисунок 1.2) [2].

Рисунок 1.2 – Геологическая тектоническая карта провинции Хубэй

Циньлинская складчатая система является частью Центрального орогенного пояса, который представляет собой сильно деформированную тектоническую единицу с активными разломами, являющимися причинами возникновения разрушительных землетрясений. Квазиплатформа Янцзы относится к квазистабильной геотектонической единице, но и здесь случаются спорадические разрушительные землетрясения, распределенные вдоль разлома.

Провинция Хубэй расположена в южно-центральной части КНР. С запада и севера провинцию Хубэй защищают от проникновения воздушных масс и атмосферных фронтов мощные горные хребты и нагорья: Гималаи, Цинхай-Тибетское нагорье, Куньлунь, Тянь-Шань, Алтай, нагорье Внутренней Монголии, Хэндуаньшань, Циньлин, Большой Хинган (рисунок 1.3). На востоке КНР рельеф понижается и занят приморскими низменностями, низкогорьями и средневысотными горами. Таким образом, с юга и востока провинция Хубэй открыта для проникновения воздушных масс и тропических циклонов.

Рисунок 1.3 – Карта рельефа, окружающего провинцию Хубэй

Рельеф провинции Хубэй представляет собой неполную котловину, окруженную горными хребтами на востоке, западе и севере (рисунок 1.4). Из общей площади на горы приходится 56 % территории провинции, на холмы – 24 %, на равнины и озера – 20 % [3].

На северо-западе провинции находится горный хребет Уданшань (упрощ. кит. – 武当山, см. рисунок 1.4, б), который является продолжением на юго-востоке хребта Дабашань. Хребет Уданшань ориентирован с северо-запада на юго-восток, и проходит вдоль южного берега реки Хань. Горы нагромождены друг на друга. Преобладающие высоты хребта – более 1000 м, а самая высокая точка (пик Тяньчжу) имеет высоту 1612,1 м. Самая высокая гора – Шэньнундин (кит. упр. 神农顶) высотой 3106,2 м.

На западе расположен горный хребет Ушань (упр. кит. – 巫山). Хребет Ушань также ориентирован с северо-запада на юго-восток, и проходит вдоль юго-восточного берега реки Янзцы. Поворачивая на восток и, пробиваясь сквозь горы, р. Янзцы образует местную достопримечательность – «Три ущелья». Средние высоты составляют 700-1500 м, локально – до более чем 2000 м.

На юго-западе провинции расположен горный хребет Улиншань (кит. упр. – 武陵山). Хребет Улиншань ориентирован с юго-запада на северо-восток. Средние высоты составляют порядка 700-1000 м.

На севере провинции расположен горный хребет Тунбайшань (кит. упр. – 桐柏山). Хребет Тунбайшань ориентирован с северо-запада на юго-восток. Средние высоты хребта, как правило, не превышают 1000 м.

На северо-востоке провинции расположен горный хребет Дабишань (кит. упр. – 大别山). Хребет Дабишань ориентирован с северо-запада на юго-восток, и образует водораздел между реками Янцзы и Хуай. Средние высоты хребта, как правило, превышают 1000 м, а главная вершина гора Тяньтанчжай имеет высоту 1729 м над уровнем моря.

а)

б)

Рисунок 1.4 – Физико-географическая карты провинции Хубэй:
а) с административными границами соседних провинций, б) только Хубэй.

На юго-востоке провинции расположен горный хребет Муфу (кит. упр. – 幕埠山). Хребет Муфу простирается почти на 200 км, и ориентирован с юго-запада на северо-восток. Главная вершина хребта Лао Цао Цзянь находится на высоте 1657 метра над уровнем моря [2].

Холмы расположены в центре Хубэя преимущественно между горами Цзиншань, Дабишань и Тунбайшань, а также на северо-востоке Хубэя.

Основными равнинами провинции Хубэй являются Цзяньханьская равнина и Восточно-Хубэйская равнина.

Цзяньханская равнина (кит. традиц. – 江汉平原) относится к аллювиальным равнинам, т.е. образована отложениями и наносами нижнего течения реки Янцзы и ее притока реки Ханьшуй, в честь которых и получила свое название. Площадь равнины составляет более 100 000 км^2. Равнина слегка наклонена с северо-запада на юго-восток и имеет высоты 20-100 м над уровнем моря. На юге провинции Цзяньханская равнина плавно переходит в равнину озера Дунътинху.

Восточно-Хубэйская равнина также является аллювиальной равниной, и расположена в среднем течении реки Янцзы.

1.3 Гидрологические особенности провинции Хубэй

Провинция Хубэй не имеет выхода в море, однако водными ресурсами она не обделена, и носит неофициальное название «провинции тысячи озер». В провинции Хубэй насчитывается 1 193 малых и средних рек общей протяженностью более 35 000 км. Кроме того, в Хубэе множество пресных озер, большинство из которых расположено на равнине Цзянхань (рисунок 1.5) [1].

Рисунок 1.5 – Гидрология провинции Хубэй

Самой крупной водной артерией является река Янцзы, которая пересекает провинцию с запада на восток. Пересекая горный хребет Ушань, она образует красивейшее место – «Три ущелья» (Санься), а затем медленно течет по Цзянганской равнине. Три четверти ее общей длины протекает по территории провинции Хубэй (1061 км), соединяя Янцзы со многими другими реками, берущими начало в приграничных горах.

Крупнейший приток реки Янцзы – река Хань, впадает в Янцзы у города Ухань. Общая длина реки составляет 858 километров, что составляет три четверти от общей длины Янцзы.

Как было отмечено выше, в Хубэе множество пресных озер. По состоянию на март 2023 года в провинции Хубэй числится 755 озер с общей площадью 2706,851 кв. км [3]. Самые крупные из них – с площадью поверхности 100 кв. км и более: озера Хонху, Чанг, Лянцзы и Топор.

Озеро Хонгху – самое крупное озеро в провинции Хубэй. Площадь озера составляет 348,33 кв. км. Средняя глубина озера составляет 13,5 м, а в период паводков – 23,2 м. Мелководное на западе и глубокое на востоке. Озеро Хонху собирает воду из верхнего течения Цзинмэнь, Цяньцзян, Цзинчжоу и других районов с общей площадью водосбора 10 375 000 квадратных километров, что является важным местом хранения паводковых вод реки Янцзы.

Рисунок 1.6 – Вид на озеро Хонгху

Кроме того, провинция Хубэй богата запасами неглубоких подземных вод, которые оцениваются в 265 миллиардов кубометров, а годовой извлекаемый запас составляет около 35,5 миллиарда кубометров [3].

Таким образом, расположение провинции Хубэй на некотором удалении от побережья Восточно-Китайского моря обуславливает наличие в провинции черт как континентального, так и мусонного климата. Обилие рек и озер является причиной повышенной влажности воздуха в провинции, и в еще большей степени смягчают континентальность климата.

1.4 Особенности почв и растительного покрова провинции Хубэй

Провинция Хубэй окружена горами, за исключением южной и центральной частей, где расположены низменные равнины импактного происхождения (вследствие падения астеорида) с многочисленными озерами и впадинами [4]. Такое различие в рельефе провинции обусловило значительную разницу в условиях увлажнения, что вместе с различиями в почвообразующих материалах привело к формированию различных видов почв.

К северу от реки Янцзы, в центральной части и на равнинах провинции Хубэй сформировалась четыре вида почв. К северу от реки Янцзы, в Эчжуне и северо-восточной части провинции преобладают желто-коричневые почвы. Чередование коричнево-красных и желто-коричневых почв на северном и южном берегах Янцзы отражает, что северный и южный берега Янцзы характеризуются переходом климатической зоны от средней субтропической до северной субтропической зоны. Влажная почва широко распространена на равнине Цзянган и в долинах рек Янцзы, Хань и ее притоков. Известняковая почва сосредоточена в горных районах на западе и юге провинции. Фиолетовая почва спорадически распространена в долинных бассейнах запада-юга и северо-запада провинции. В средней и верхней части гор с большой высотой есть коричневые почвы и темно-коричневые почвы, а также горно-луговые почвы и горно-болотные почвы в отдельных районах.

Сложная и разнообразная природная среда Хубэя делает распределение растительности в регионе различной, демонстрируя очевидные широтные, продольные и вертикальные региональные различия.

С точки зрения общего физико-географического районирования Китая территория Хубэя входит в состав четырех районов (рисунок 1.7) [4]:

1) североазиатские субтропические смешанные леса гор Циньлин и Дабашань (разделяется на три субрегиона: субрегион гор Дабашань, субрегион впадины Наньсян, субрегион гор Тунбай и Дабешань);

2) североазиатские субтропические смешанные леса равнины среднего и нижнего течения Янцзы (центральная и южная части Цзянханьской равнины);

3) вечнозеленые широколистные леса среднего субтропического пояса в холмистой местности и впадинах на южном берегу Янцзы и на юго-востоке;

4) вечнозеленые широколистные леса среднего субтропического пояса плоскогорья Гуйчжоу (к восточному субрегиону гор и холмов данного лесного района относятся горы Ушань и Улиншань).

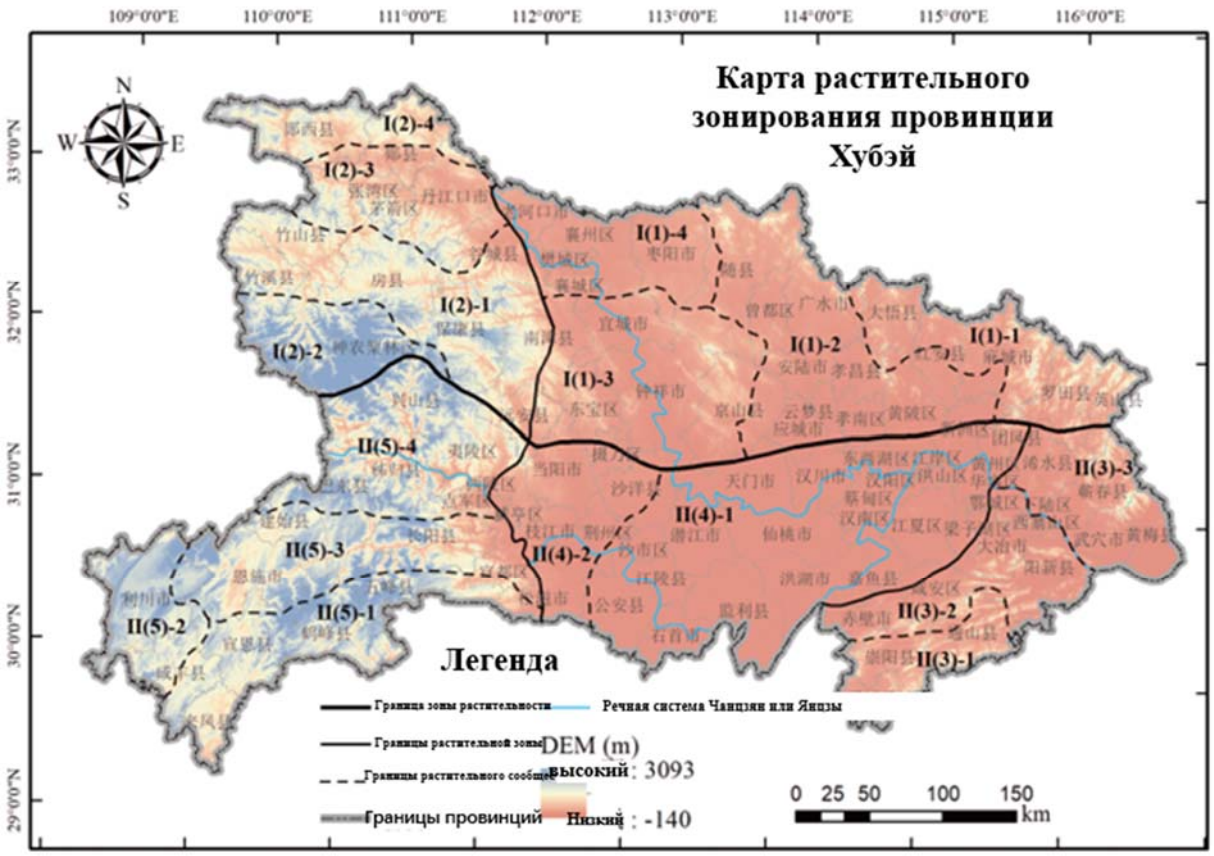


Рисунок 1.7 – Карта растительного зонирования провинции Хубэй

Наличие растительности препятствует процессу испарения с подстилающей поверхности и способствует повышенной влажности. Кроме того, растительность имеет не высокое альбедо, способствует поглощению поступающего солнечного излучения.

1.5 Синоптические особенности провинции Хубэй

Провинция Хубэй расположена в субтропической зоне, которая относится, кроме того, к типичной муссонной зоне [5]. Большая часть провинции, за исключением высокогорных районов, относится к субтропическому муссонному влажному климату с характеристиками перехода от субтропического к теплому умеренному поясу. Для данного типа климата характерны обилие тепла и осадков, длительный безморозный период.

Среднегодовое количество фактических солнечных часов для различных районов провинции Хубэй составляет 1100-2150 часов, и уменьшается от северо-востока к юго-западу [6]. На севере и северо-востоке оно составляет 2000÷2150 часов; на юго-западе – 1100-1400 часов. Сезонное распределение: больше всего летом, меньше всего зимой.

Среднегодовая температура в провинции Хубэй составляет 15-17℃. На большей части территории холодно зимой и жарко летом. Температура резко увеличивается весной и быстро падает осенью. Продолжительность безморозного периода в провинции составляет 230-300 дней.

Январь является самым холодным месяцем со средней температурой 2-4℃ в большинстве районов; июль – самый жаркий месяц со средней температурой 27-29℃, за исключением высокогорных районов, где максимальная температура может достигать более 40℃.

Среднегодовое количество осадков в провинции Хубэй составляет 800-1600 мм. Географическое распределение осадков имеет тенденцию к уменьшению с юга на север: до 1400-1600 мм в юго-западном Хубэя и не менее 800-1000 мм в северо-западном Хубэя. Распределение осадков имеет очевидные сезонные изменения, как правило, больше всего летом и меньше всего зимой, количество осадков летом составляет 300-700 мм, а зимой – 30-190 мм. В

период с середины июня по середину июля выпадает наибольшее количество осадков и наибольшая интенсивность, это период Meiyu (сливовый дождь).

Циркуляция атмосферы в провинции Хубэй, как и КНР в целом, носит ярко выраженный сезонный характер, что проявляется в изменении характера от сезона к сезону как циклонической деятельности, так и свойств воздушных масс.

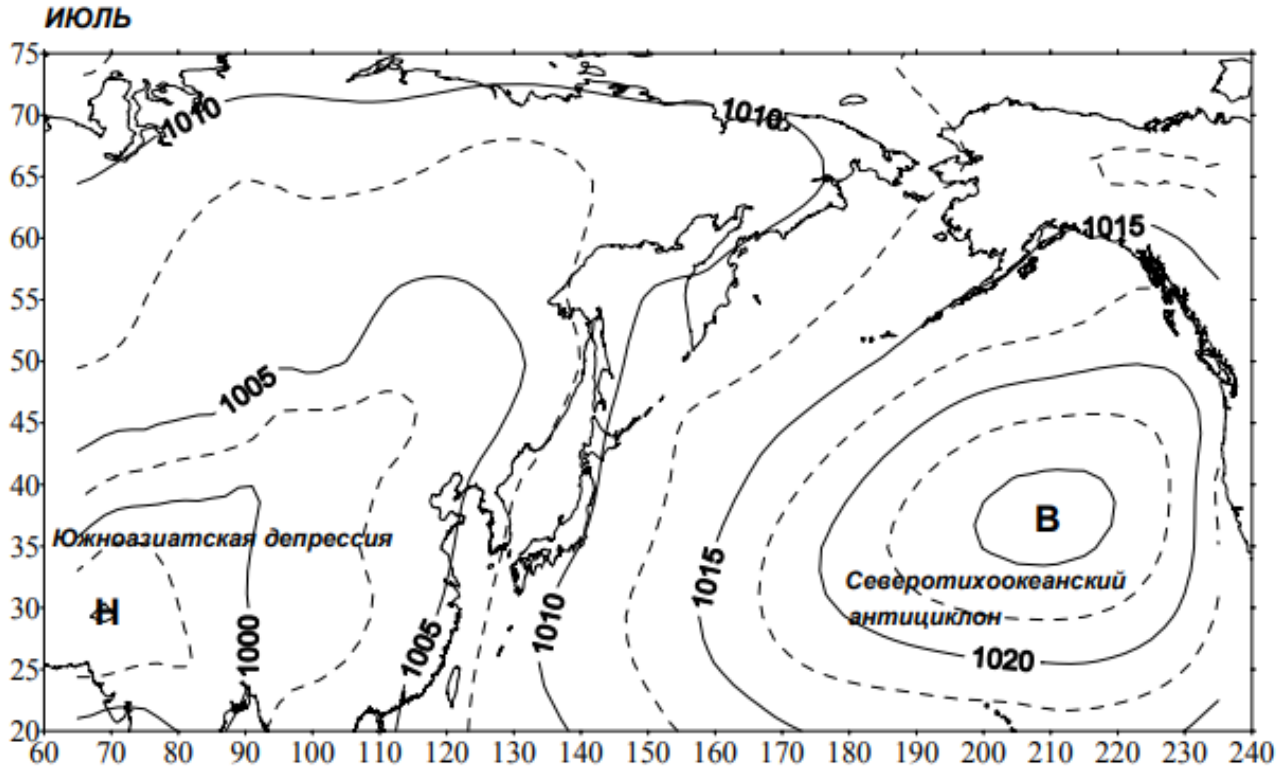
Летом вся территория Азиатского континента находится под влиянием сезонного центра действия атмосферы – обширной азиатской депрессии, которая формируется вследствие сильного прогрева континента (рисунок 1.8, а) [7]. Провинция Хубэй находится в восточной части данной депрессии, что обуславливает муссонные ветры юго-восточных направлений. Как было отмечено выше, количество осадков в провинции Хубэй плавно уменьшается с юго-востока на северо-запад, что может быть объяснено выносами влажного теплого воздуха с Южно-Китайского моря, а также выходом тропических циклонов. Поскольку провинция Хубэй находится все-таки на некотором удалении от побережья, то количество осадков уменьшается по мере продвижения тропического влажного воздуха над материком вглубь континента.

В Восточном Китае выделяют сезон дождей, который длится с мая по октябрь.

Осенью происходит существенная перестройка термобарических полей. Азиатская депрессия постепенно заполняется, на месте нее формируется сезонный центр действия атмосферы – Азиатский антициклон (или максимум, см. рисунок 1.8, б). На высотах формируются устойчивые северо-западные потоки. Циклоны по южной периферии Азиатского антициклона смещаются с запада на восток, что также обуславливает выпадение осадков.

Зимой над Азией воздух продолжает выхолаживаться, Азиатский антициклон усиливается (рисунок 1.8, в). При ясной или малооблачной погоде и слабом ветре происходит резкое выхолаживание приземного слоя воздуха.

а)



б)

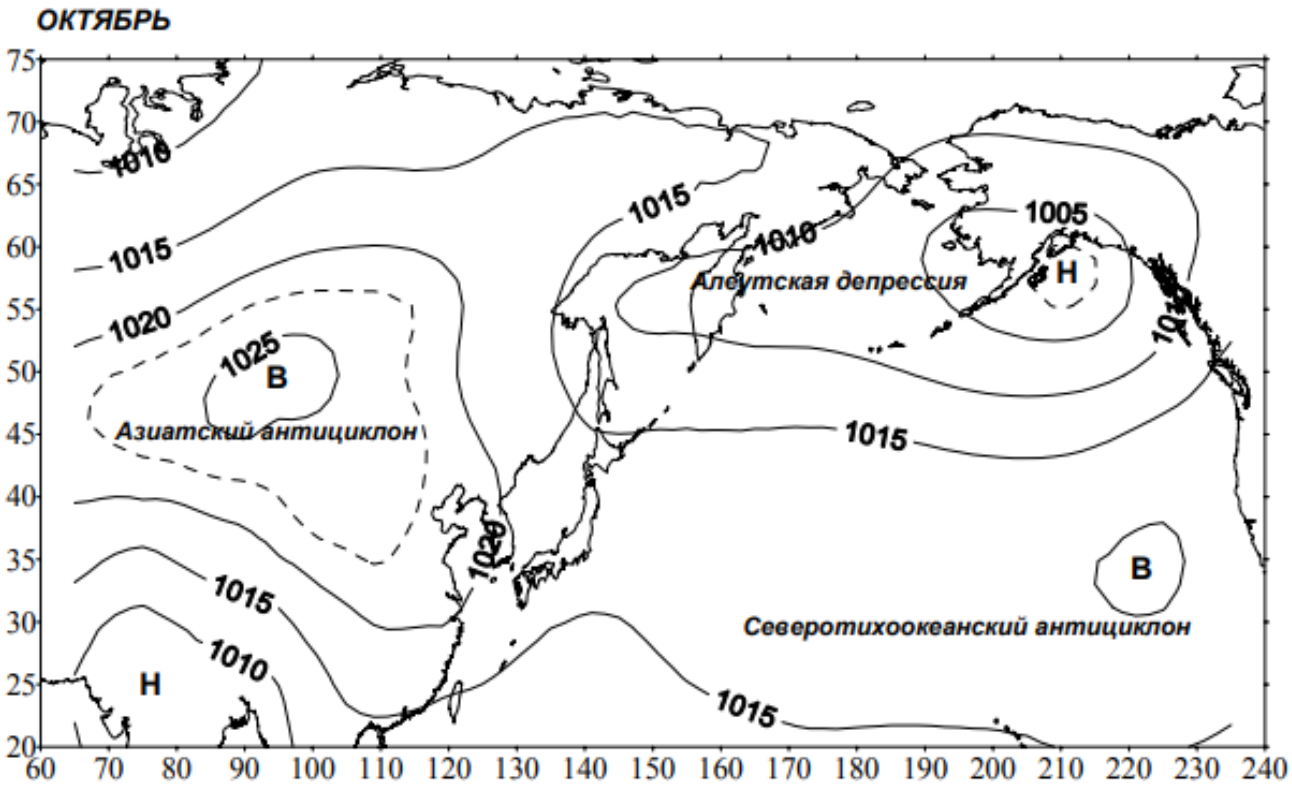
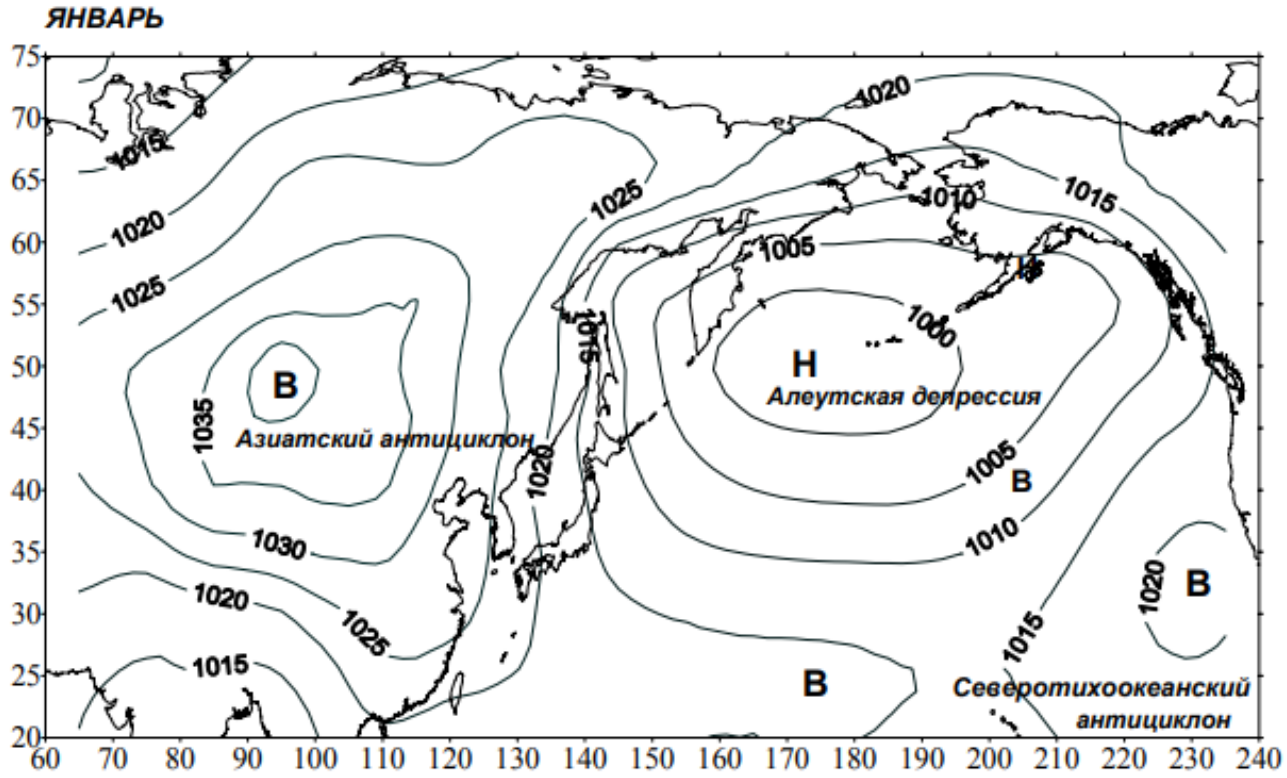


Рисунок 1.8 – Климатические карты центров действия атмосферы для Азиатско-Тихоокеанского региона по временам года [7]: а) лето; б) осень;

в)



г)

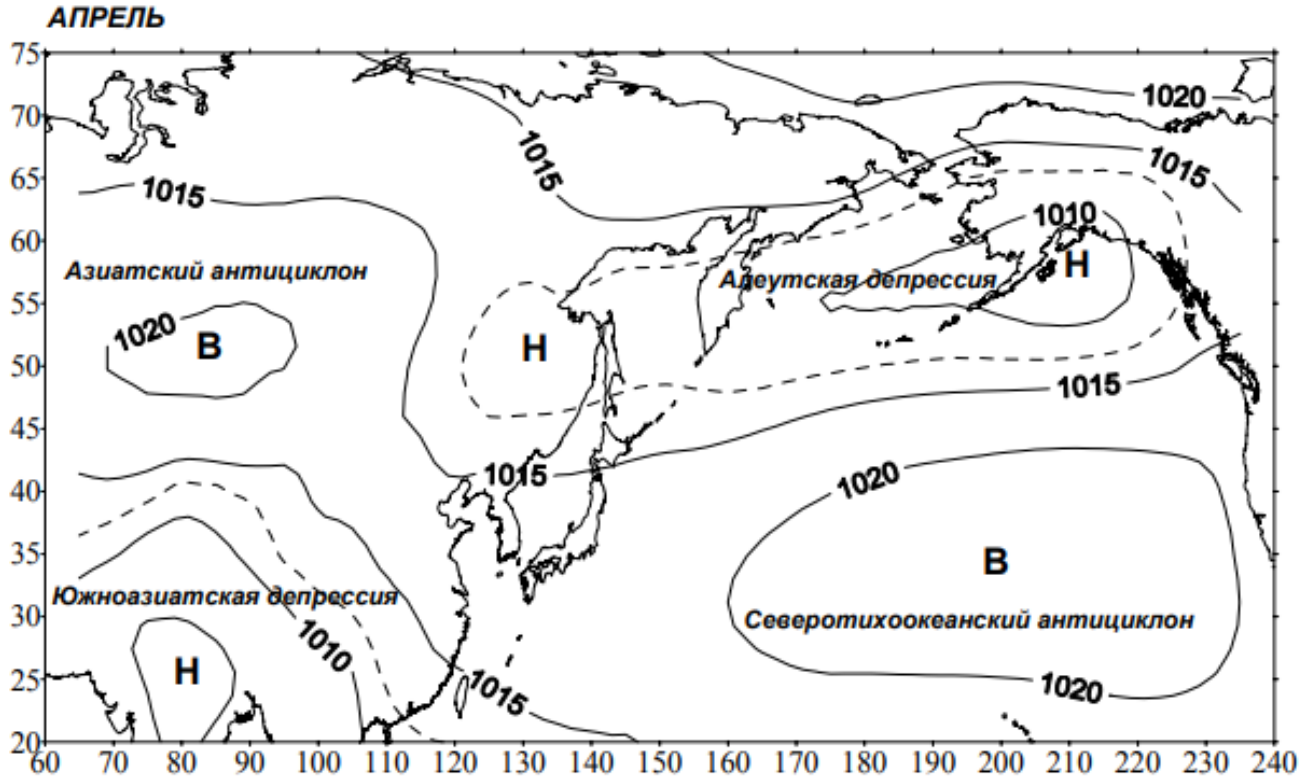


Рисунок 1.8 – Климатические карты центров действия атмосферы для Азиатско-Тихоокеанского региона по временам года [7]: в) зима; г) весна

В области отрога высокого давления формируется воздух, характеризующийся относительно низкими температурами в приземном слое, устойчивостью, приземными инверсиями, малой влажностью и высокой прозрачностью воздуха. Муссонный климат обуславливает изменение воздушных потоков от теплого времени года к холодному почти на противоположное. Зимой в провинции Хубэй преобладают ветры юго-восточных направлений (изнутри материка).

При переходе к весне Азиатский антициклон интенсивно разрушается. На его месте формируется Азиатская депрессия. Над востоком Китая преобладают ветры южных направлений.

Таким образом, анализ, выполненный в п. 1.5, позволил сделать вывод, что муссонная циркуляция является определяющей при формирования климатических условий в провинции Хубэй. Циркуляция атмосферы в данном районе носит резко выраженный сезонный характер.

1.6 Выводы по главе 1

В результате изучения физико-географических особенностей провинции Хубэй можно сделать ряд выводов, важных для понимания формирования климата этого региона.

Географическое расположение провинции определяет принадлежность климата к тропическому типу. Географическое положение провинции Хубэй вблизи восточного побережья Азии, но все-таки на некотором удалении от побережья вглубь материка, обуславливает в целом муссонный характер климата с некоторыми чертами континентальности.

Расположение горных хребтов на территории провинции Хубэй и в ее окрестностях обуславливает определенную защиту от проникновения фронтальных циклонов с запада и севера, и открытость данного региона для воздушных масс и тропических циклонов с востока и юга. Значительная часть территории провинции расположена в горной местности, что обуславливает высотную поясность климатов в данных районах.

Известность Хубэя, как «провинции тысячи озер», и, кроме того, тот факт что провинцию пересекает с запада на восток одна из самых полноводных рек Азии Янзцы обуславливает наличие большого количества влаги в провинции.

Разнообразный видовой состав растительности и состав почв обуславливает невысокие альбедо и испаряемость с подстилающей поверхности.

В целом, эти аспекты предоставляют важные данные для эффективного управления природными ресурсами провинции Хубэй, устойчивого развития региона и принятия решений в области охраны окружающей среды. Дальнейшие исследования и управленческие меры могут быть направлены на оптимизацию использования природных ресурсов и обеспечение устойчивости региона в условиях изменяющейся экологической ситуации.

2 Анализ многолетних рядов температуры и суммы осадков

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для моделирования климатических изменений температуры и количества осадков использованы данные с метеорологических станций, расположенные в провинции Хубэй. Метеорологические станции выбирались таким образом, чтобы они, по возможности, равномерно были распределены по территории провинции. Кроме того, при выборе станций принималась во внимание продолжительность периода наблюдений.

Расположение наблюдательных станций показано на рисунке 2.1, а их названия, координаты и доступные периоды наблюдений представлены в таблице 2.1.

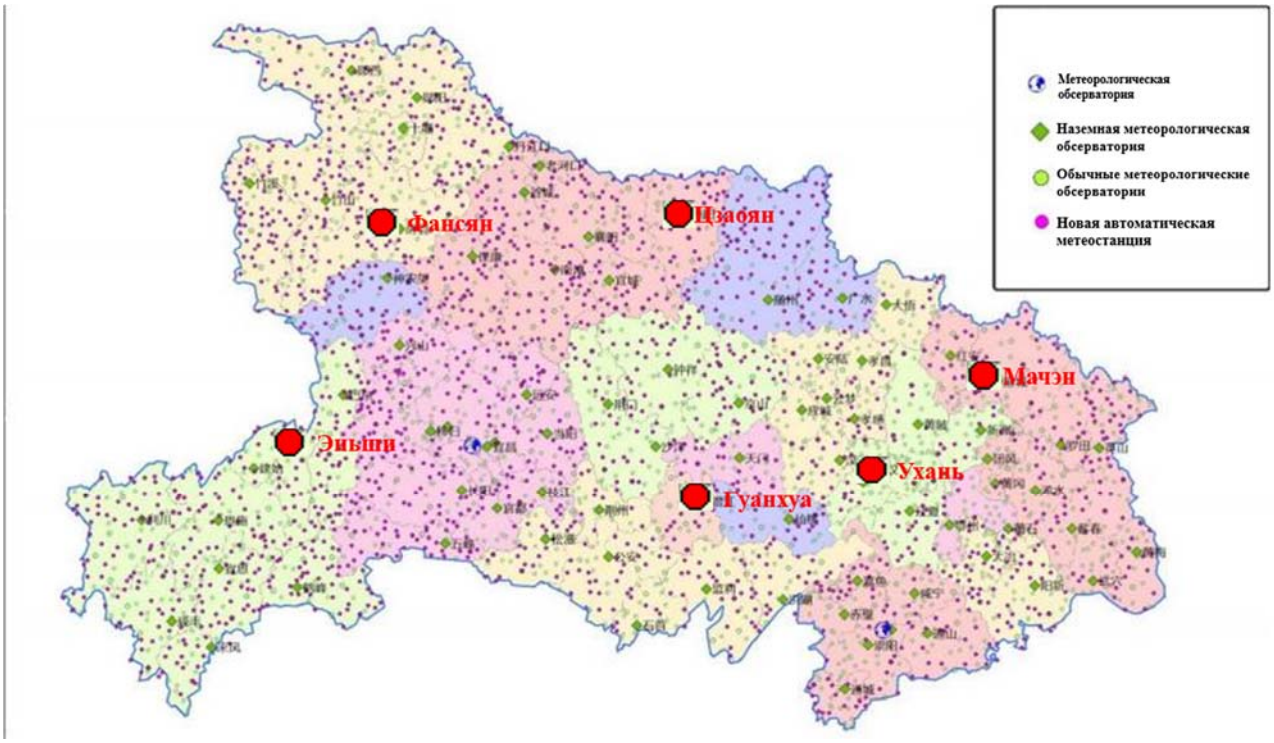


Рисунок 2.1 – Расположение пунктов наблюдения в провинции Хубэй

Таблица 2.1

Названия и координаты станций в провинции Хубэй

Индекс	Наименование	Продолжительность наблюдений	Кол-во лет	Широта, град	Долгота, град
57494	Ухань	1907-1942, 1947-2023	113	30,62	114,13
57265	Гуахуа	1951-2023	73	32.38	111.66
57399	Мачэн	1959-2023	65	31.18	114.96
57279	Цзаоян	1952-2023	72	32.15	112.66
57259	Фансян	1958-2023	66	32.03	110.76
57447	Эньши	1951-2023	73	30.28	109.46

Станции Ухань и Мачэн расположены в равнинных районах, остальные станции – на холмистой местности: Гуанхуа – 91 м, Цзаоян на высоте 127 м, Фансян – 435 м [8].

Многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков скачаны с сайта Королевского метеорологического института Нидерландов [8]. Наиболее продолжительный период наблюдений – на станции Ухань (административный центр провинции), который имеет пропуск в наблюдениях в период второй мировой войны (1943-1946 гг). Период наблюдений остальных станций начинается в 50-е годы прошлого столетия. Для всех станций общим является отсутствие данных на сайте [8] после 1990 г. Восстановление с помощью регрессионных уравнений по методике, описанной в [9], не выполнялось из-за отсутствия станций-аналогов. Период после 1990 г дополнялся данными с сайта «Погода и климат» [10].

Особенностью климатологических рядов в КНР является то, что период наблюдений за осадками превышает период наблюдений за температурой.

2.2 Оценивание качества исходных данных

Для статистического моделирования климатических изменений следует оценить качество исходной информации для расчета климатических характеристик.

Оценивание однородности многолетних рядов наблюдений – первая процедура, которая выполняется перед климатической обработкой [11]. Статистической однородностью временных рядов называют принадлежность всех элементов ряда метеорологических наблюдений и его выборочных статистических параметров (среднего арифметического и дисперсии) к одной генеральной совокупности. Выделяют два вида однородности [11]:

- однородность эмпирического распределения, которая проявляется в наличии резко отклоняющихся от общей совокупности экстремумов;
- стационарность – однородность средних значений и дисперсий последовательных частей временного ряда (т. е. однородность во времени).

Методика оценивания однородности климатологических рядов включает в себя три этапа: проверку однородности эмпирического распределения на экстремумы; проверка стационарности дисперсий и средних значений.

Первоначально климатические данные были представлены в графическом виде и изучены методом визуального анализа. При помощи визуального анализа можно выявить резко выраженные экстремумы, а также неоднородность климатических рядов в случае, если естественный ход изменения климатической величины резко изменяется. Визуальный анализ также необходим для обнаружения наличия пропусков в наблюдениях.

Проверка качества исходных данных начинается с оценивания однородности экстремумов. Неоднородность экстремумов, как правило,

обусловлена малой длительностью наблюдений. Для проверки однородности экстремумов используются критерии Диксона и Смирнова-Граббса.

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 $\{Y_n\}$[9]:

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

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

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

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

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

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

2) для минимального члена Y_1 ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ [9]:

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

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

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

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

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

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

Критерии однородности Смирнова-Граббса позволяют оценить однородность только одного экстремума и является параметрическим (для ее расчета используются параметры распределения – среднее значение и среднее квадратическое отклонение (СКО).

Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена Y_n ранжированной последовательности $\{Y_n\}$ рассчитывается по формуле [9]:

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

где: $Y_{\text{ср}}$, σ_Y – среднее значение и среднее квадратическое отклонение анализируемой выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для минимального члена Y_1 рассчитывается по формуле [9]:

$$G_{n1} = \left(Y_{cp} - Y_1\right)/\sigma_Y\,. \qquad (2.12)$$

Для оценивания однородности расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями [9], 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 $\alpha \geq 5$ %.

С помощью статистических критериев Диксона и Смирнова-Граббса можно определить выборки, которые соответствуют нормальному (симметричному) закону распределения [12]. Отличие же выборки гидрометеорологических данных состоит в том, что их эмпирические распределения часто не являются симметричными. К тому же, их временный ряд не является полностью случайной выборкой из-за циклических колебаний различных масштабов времени. Критические табличные значения используются для учета влияния асимметрии и автокорреляции. Как правило, для критериев оценки однородности асимметрия увеличивает критические значения, а автокорреляция их уменьшает.

Второй и третий этап проверки качества климатических рядов – это оценивание стационарности дисперсий и средних значений [9]. Для этого используется критерий Фишера и Стьюдента.

Сформированный временный ряд делится на две подвыборки, при этом границы разбиения выбираются исходя из даты предполагаемого нарушения стационарности. В случаях отсутствия априорной информации о сроках нарушения стационарности выборка делится на две равные по продолжительности подвыборки.

По каждой подвыборке вычисляются значения средних ($Y_{\text{ср } j}$, $j = 1, 2$) и дисперсий (σ_j , $j = 1, 2$), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера [9]:

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

где σ_j^2 , σ_{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:

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

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 [9]:

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

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

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 [9]:

$$t = \frac{Y_{cpI} - Y_{cpII}}{\sqrt{n_1\sigma_I^2 + n_2\sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \qquad (2.17)$$

где Y_{cpI}, Y_{cpII}, σ_{I}^2, σ_{II}^2 – средние значения и дисперсии двух смежных выборок.

Критические значения статистики Стьюдента t'_α определяются по формуле:

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

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 Оценки однородности и стационарности данных температуры

Первоначально для определения самого теплого и самого холодных месяцев в году для каждой метеорологической станции были построены графики внутригодовых колебаний температуры. Данные графики для каждой станции будут приводиться по мере изложения. Затем были построены хронологические графики температуры для выбранных метеостанций для самого теплого и холодного месяцев в году и проведен контроль их однородности и стационарности по методике, описанной в п.п. 2.2. Перейдем к изложению выполненного анализа.

График внутригодовых колебаний температуры на станции Ухань представлен на рисунке 2.2. Как следует из анализа данного графика, самым холодным месяцем в году в Ухане является январь, а самым теплым – июль.

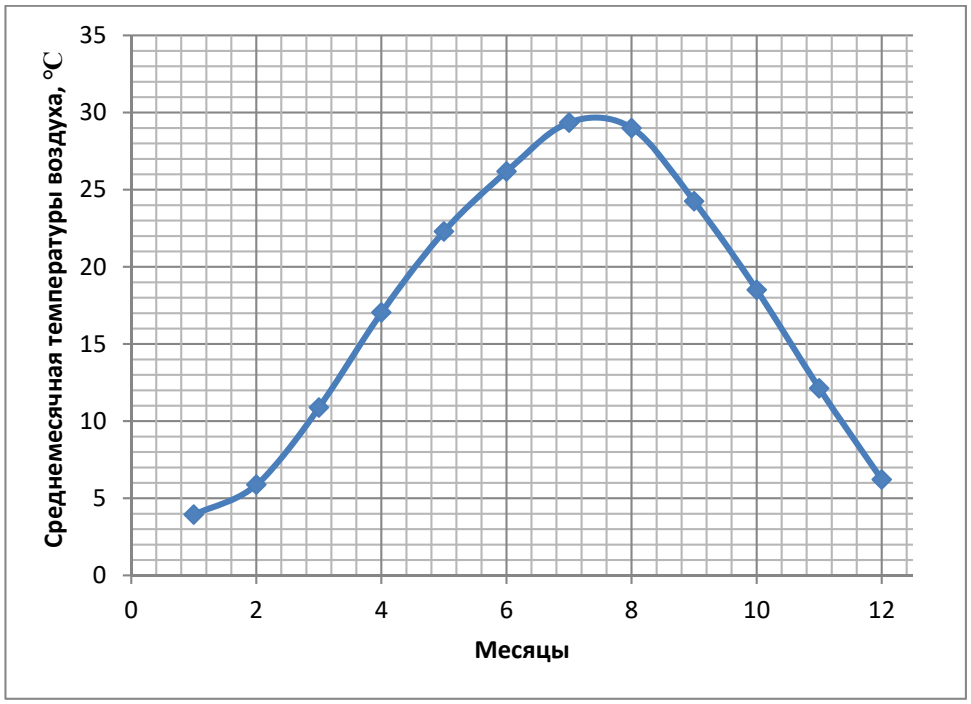
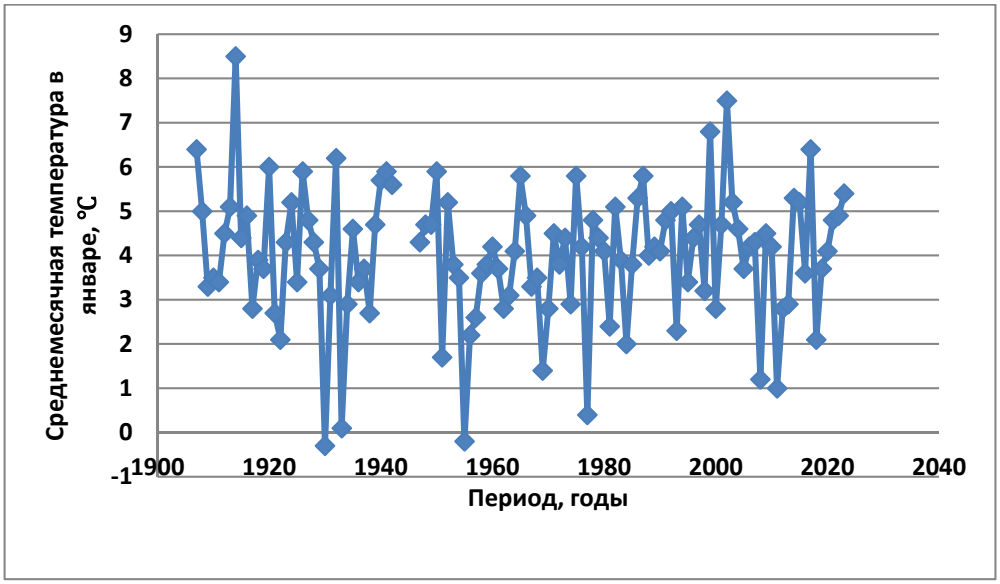


Рисунок 2.2 – График внутригодовых колебаний температуры на станции Ухань

Хронологические графики температуры данных месяцев представлены на рисунке 2.3.

а)



б)

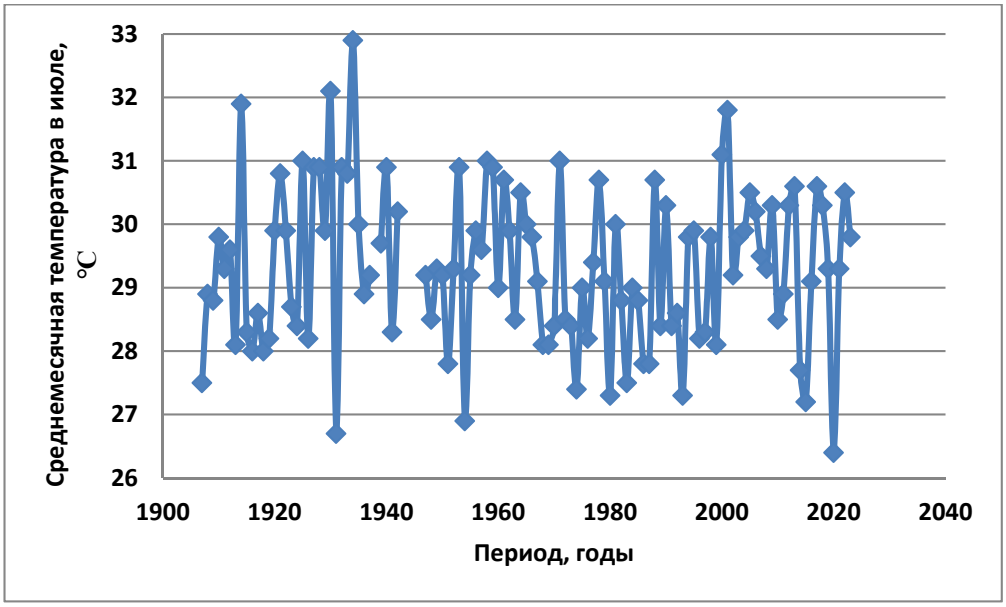


Рисунок 2.3 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры на станции Ухань: а – в январе, б – в июле

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в январе на станции Ухань (рисунок 2.3 (а), показал, что зарегистрирован резко выраженный максимум в 1914 г (8,5°С), который на 1,0 °С превосходит следующий максимум, наблюдавшийся в 2002 г (7,5°С). Как следует из дальнейшего анализа графика 2.3, наблюдаются сразу несколько экстремальных минимальных значений температуры в 1930 г (–0,3°С), 1933 г (0,1 °С), 1955 г (–0,2°С) и в 1977 г (0,4°С).

По формулам (2.1)-(2.12) произведены расчеты статистик Диксона и Смирнова-Граббса, которые вместе с оценками однородности приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на метеостанции Ухань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,113636	0,114943	0,195402	0,202381	0,193182	3,00329
Критерий	0,214826	0,228457	0,276527	0,286527	0,269071	3,741184
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,011364	0,012821	0,051282	0,056338	0,045455	2,89533
Критерий	0,10509	0,122418	0,158003	0,165983	0,144931	2,64017
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	неоднороден

Из анализа данных таблицы 2.2 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Ухань является однородным. При проверке однородности по минимальным значениям по критерию Смирнова-Граббса расчетная статистика больше табличного критерия. Однако проверка однородности по критериям Диксона, свидетельствует об однородности климатологического ряда.

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в июле на станции Ухань (рисунок 2.3 (б), показал, что зарегистрирован в 1934 г максимум (32,9℃), который на 0,8 ℃ превосходит следующий максимум, наблюдавшийся в 1930 г (32,1℃). Как следует из дальнейшего анализа графика 2.3 (б), резко выраженных минимумов не наблюдается. Оценки однородности среднемесячных температур в июле приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на метеостанции Ухань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,123077	0,129032	0,161290	0,166667	0,153846	2,888010
Критерий	0,186351	0,194952	0,244091	0,254091	0,237864	3,415569
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,046154	0,052632	0,087719	0,090909	0,076923	2,365542
Критерий	0,133524	0,148606	0,192940	0,199985	0,173290	3,044024
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.3 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Ухань является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Ухань был разбит на две неравные подвыборки: с 1907 по 1942 гг. и с 1947 по 2023 гг – по

моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Период пропуска в ряду наблюдений пересекается с периодом второй мировой войны. Возможно, в это время метеостанция была разрушена и перенесена в другое место.

По формулам (2.13) и (2.17) получены расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента. Определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Результаты оценивания стационарности представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Оценки стационарности эмпирического распределения температуры для метеостанции Ухань

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,448612	1,634544	стационарен
Стьюдент	0,722215	2,08089	стационарен
Июль			
Фишер	1,505885	1,595460	стационарен
Стьюдент	1,270263	2,081100	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе и июле на станции Ухань меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Рассмотрим особенности изменения температуры на станции Гуанхуа, которая расположена на юге провинции. На рисунке 2.4 представлены внутригодовые колебания температуры на данной станции. Как следует из анализа графика, самым холодным месяцем в году также является январь, а самым жарким – июль.

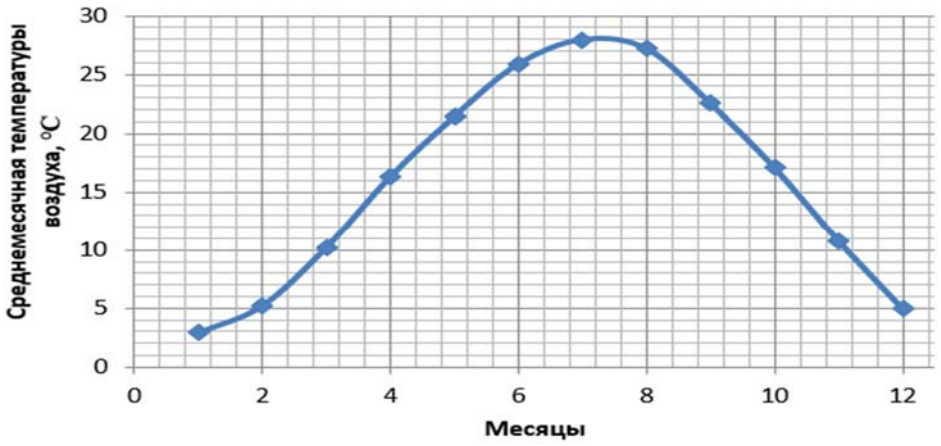
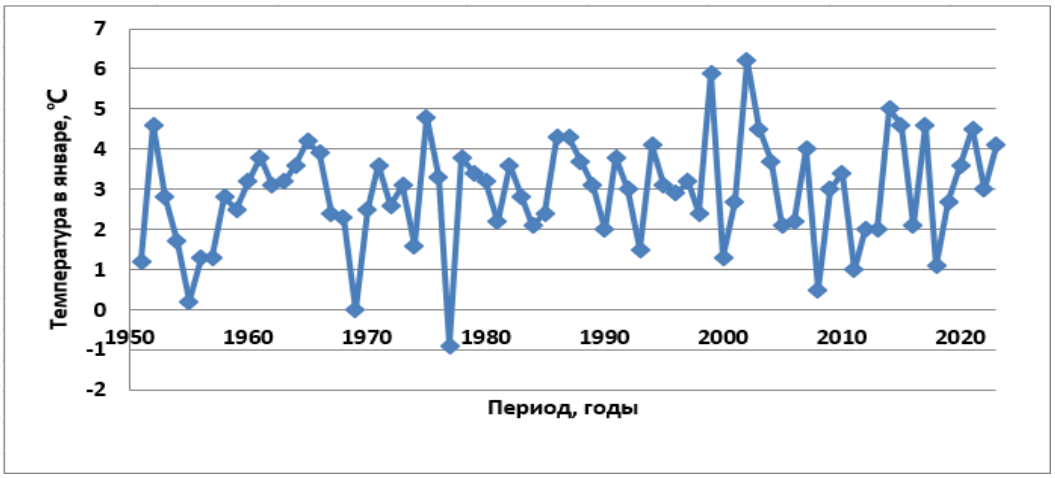


Рисунок 2.4 – График внутригодовых колебаний температуры в Гуанхуа

Хронологические графики температуры данных месяцев представлены на рисунке 2.5.

а)



б)

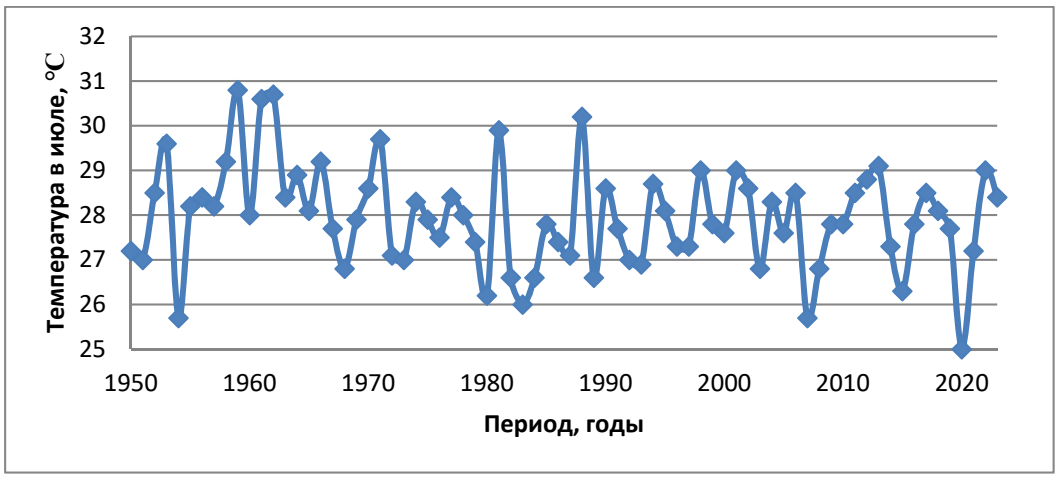


Рисунок 2.5 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры на станции Гуанхуа: а – в январе, б – в июле

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в январе (рисунок 2.5 (а), показал, что зарегистрированы два резко выраженных максимума в 1999 г (5,9℃) и в 2002 г (6,2℃), которые на 0,9÷1,2℃ отличается от следующего максимума в 2014 г (5,0℃). Кроме того, наблюдается резко выраженный минимум в 1977 г (–0,9℃), который на 0,9℃ отличается от следующего минимума в 1969 г (0,0℃).

Из анализа данных таблицы 2.5 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Гуанхуа является однородным. При проверке однородности по минимальным значениям по критерию Смирнова-Граббса расчетная статистика больше табличного критерия. Однако проверка однородности по критериям Диксона свидетельствует об однородности климатологического ряда.

Таблица 2.5 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на метеостанции Гуанхуа

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.042254	0.048387	0.193548	0.2	0.169014	2.490734
Критерий	0.229988	0.254270	0.304189	0.314189	0.290167	3.428522
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.126761	0.132353	0.161765	0.186441	0.15493	2.906204
Критерий	0.149896	0.161057	0.200418	0.214448	0.189961	2.72594
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	неоднороден

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в июле на станции Гуанхуа (рисунок 2.5 (б), показал, что зарегистрированы три максимума в 1959 г (30,8℃), 1961 г (30,6℃) и 1962 г (30,7℃), которые на 0,5 ℃ превосходит следующий максимум, наблюдавшийся в 1988 г (30,2℃). Резко выраженный минимум наблюдается в 2020 г (25,0℃). Оценки однородности среднемесячных температур в июле приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на метеостанции Гуанхуа

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.017241	0.019607	0.039216	0.039216	0.034483	2.446078
Критерий	0.215355	0.237000	0.285583	0.295583	0.271483	3.287137
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.12069	0.122807	0.122807	0.125	0.12069	2.5242696
Критерий	0.162175	0.169876	0.213935	0.228171	0.203393	2.870161
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.6 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Гуанхуа является однородным.

Определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента, оценки стационарности представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Оценки стационарности эмпирического распределения температуры для метеостанции Гуанхуа

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1.161426	1.842355	стационарен
Стьюдент	1.436639	2.089290	стационарен
Июль			
Фишер	1.754227	1.823349	стационарен
Стьюдент	1.299464	2.089290	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе и июле на станции Гуанхуа меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Рассмотрим особенности изменения температуры на станции Мачэн. На рисунке 2.6 представлены внутригодовые колебания температуры. Самым холодным месяцем в году является январь, самым теплым – июль.

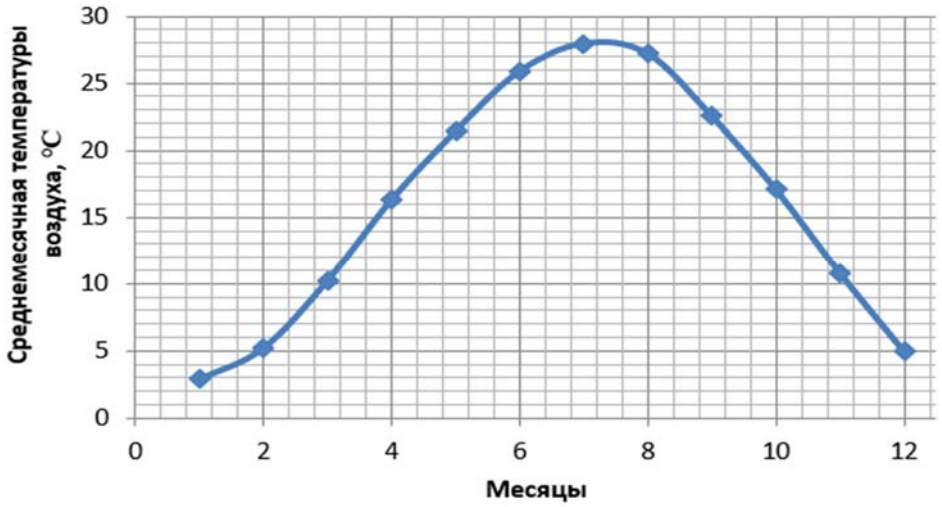
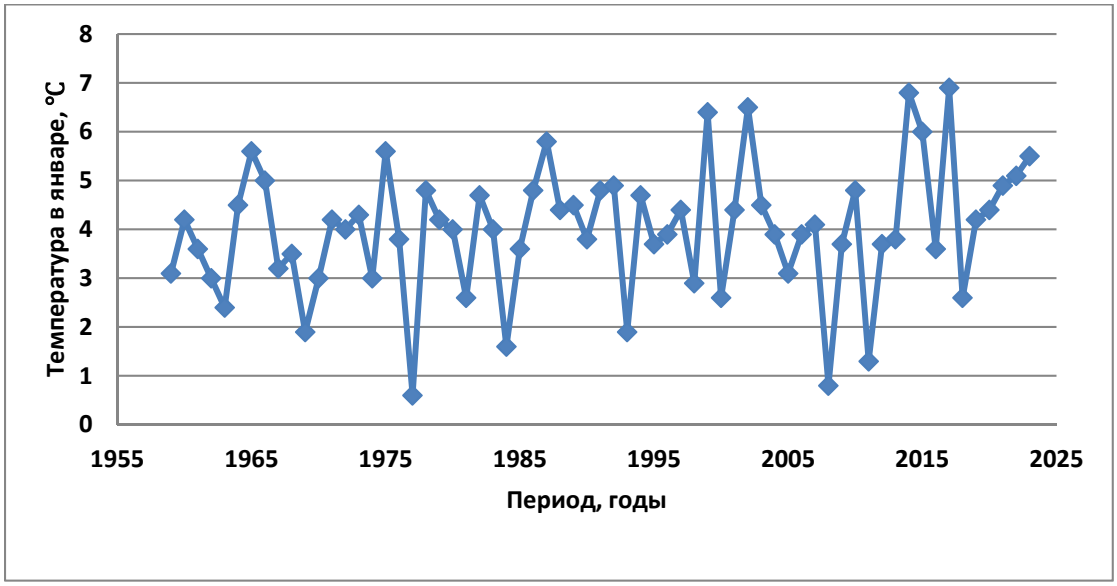


Рисунок 2.6 – График внутригодовых колебаний температуры на станции Мачэн

Хронологические многолетние графики температуры данных месяцев представлены на рисунке 2.7.

а)



б)

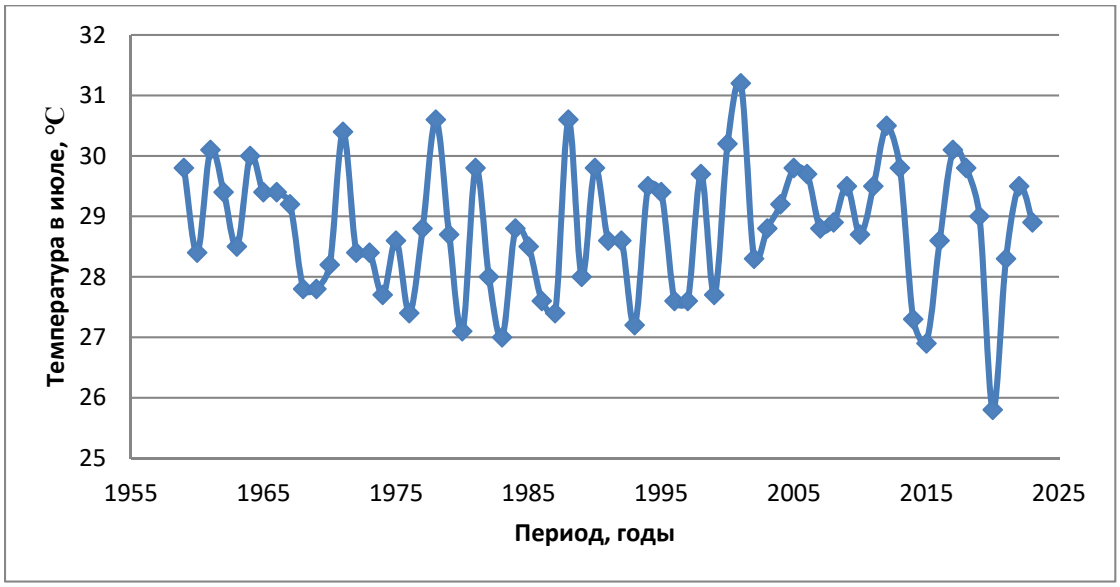


Рисунок 2.7 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры на станции Мачэн: а – в январе, б – в июле

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в январе на станции Мачэн (рисунок 2.7 (а), показал, что резко выраженные максимумы и минимумы отсутствуют.

Таблица 2.8 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на метеостанции Мачэн

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.015385	0.016393	0.065574	0.068966	0.061538	2.314228
Критерий	0.212221	0.233591	0.283592	0.293592	0.266724	3.25202
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.061538	0.062500	0.109375	0.114754	0.107692	2.514713
Критерий	0.170649	0.176152	0.221412	0.23828	0.210648	2.940846
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.8, в которой содержатся оценки однородности, следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Мачэн является однородным.

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в июле на станции Мачэн (рисунок 2.7 (б), показал, что в 2001 г зарегистрирован максимум (31,5℃), который на 0,5 ℃ превосходит следующий максимум, наблюдавшийся в 1988 г (31,0℃). Как следует из дальнейшего анализа графика 2.7 (б), наблюдается резко выраженный минимум в 2020 г (25.8℃). Оценки однородности среднемесячных температур в июле приведены в таблице 2.9.

Из анализа данных таблицы 2.9 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Мачэн по максимальным значениям является однородным.

Таблица 2.9 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на метеостанции Мачэн

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.074074	0.090909	0.159091	0.159091	0.12963	2.190440
Критерий	0.220312	0.244468	0.293368	0.303368	0.277068	3.248889
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,203704	0,229167	0,250000	0,250000	0,222222	2,778800
Критерий	0,160879	0,169334	0,210750	0,225899	0,201556	2,758345
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден
Оценки однородности по минимальным значениям после исключения неоднородного минимума						
Статистика	0,023256	0,027027	0,054054	0,054054	0,046512	1,913339
Критерий	0,193794	0,192937	0,243051	0,263936	0,234866	3,068183
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

При проверке однородности по минимальным значениям по всем критериям расчетные статистики оказываются больше табличных значений, из чего следует сделать вывод, что экстремальный минимум является

неоднородным. После исключения неоднородного экстремума, проверка однородности по минимальным значениям позволяет сделать вывод, что климатологический ряд оказывается однородным.

Определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Оценки стационарности представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Оценки стационарности эмпирического распределения температуры для станции Мачэн

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,545247	1,847428	стационарен
Стьюдент	1,245025	2,09097	стационарен
Июль			
Фишер	1,054238	1,822132	стационарен
Стьюдент	0,913522	2,091180	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе и июле на станции Мачэн меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Далее проанализируем особенности изменения температуры на станции Цзаоян, которая расположена на севере провинции. На рисунке 2.8 представлены внутригодовые колебания температуры. Самым холодным месяцем в году по-прежнему является январь, а самым жарким – июль.

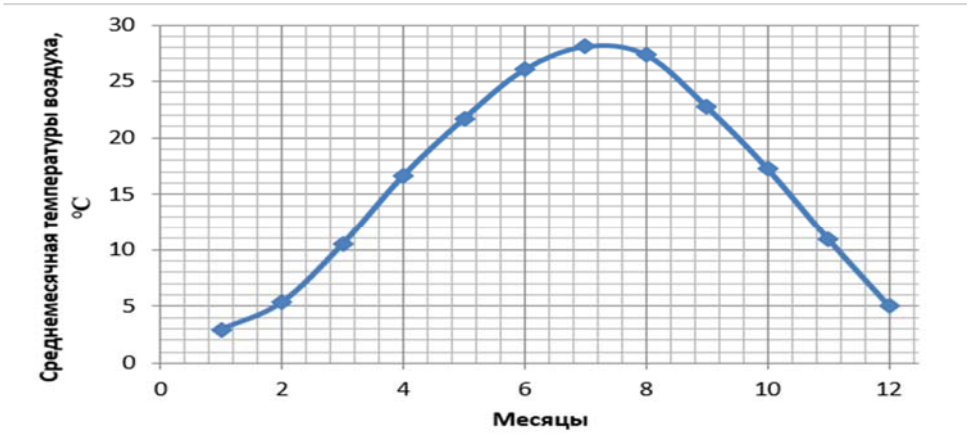
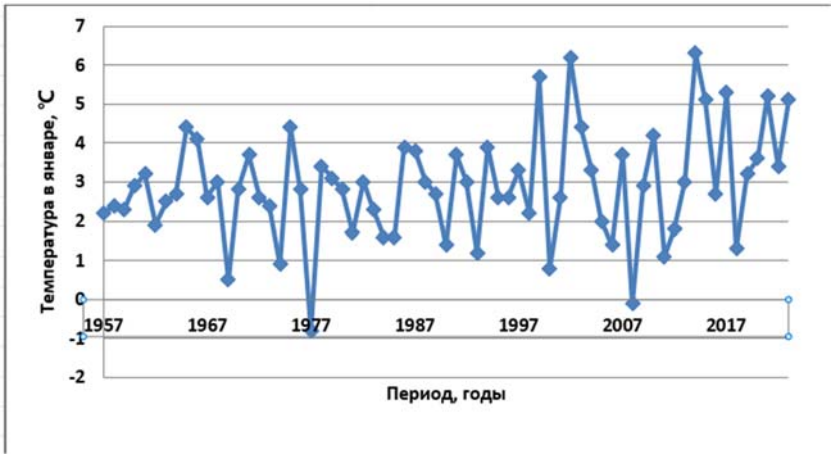


Рисунок 2.8 – График внутригодовых колебаний температуры в Цзаоян

Хронологические многолетние графики температуры данных месяцев представлены на рисунке 2.9.

а)



б)

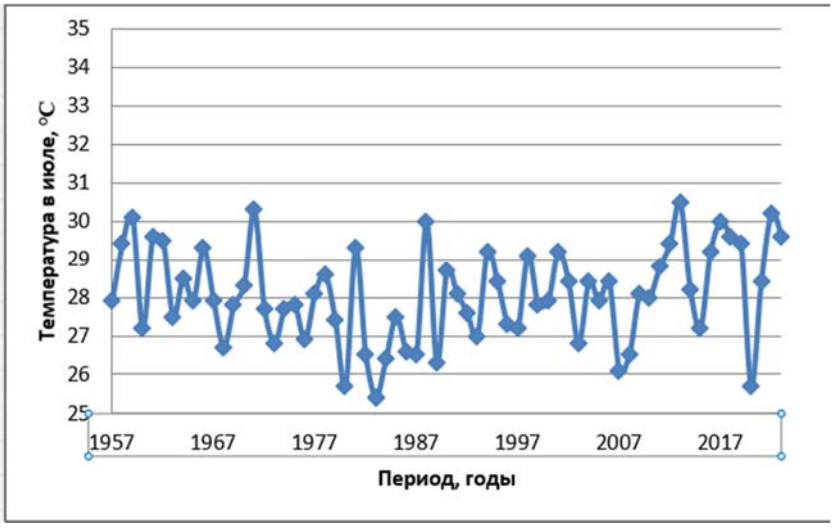


Рисунок 2.9 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры на станции Цзаоян: а – в январе, б – в июле

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в январе на станции Цзаоян (рисунок 2.9 (а), показал, что зарегистрированы два резко выраженных максимума в 2002 г (6.2℃) и в 2014 г (6.2℃), которые на 0,5℃ превышают следующий максимум в 1999 г (5,7℃). Как следует из дальнейшего анализа графика 2.9, наблюдаются сразу несколько экстремальных минимальных значений температуры в 1969 г (0,5℃), в 1977 г (–1,0 ℃) и в 2007 г (0.1 ℃). Оценки однородности для января приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на метеостанции Цзаоян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.014085	0.015625	0.09375	0.103448	0.084507	2.43873
Критерий	0.217119	0.240673	0.290912	0.300912	0.272296	3.235879
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.098592	0.10000	0.185714	0.20000	0.183099	2.658387
Критерий	0.176015	0.180001	0.224965	0.243606	0.215744	2.917802
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.11 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Цзаоян является однородным.

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в июле на станции Цзаоян (рисунок 2.9 (б), показал, что резко выраженные максимумы и минимумы отсутствуют. Оценки однородности среднемесячных температур в июле приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на метеостанции Цзаоян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.039216	0.041667	0.062500	0.062500	0.058824	1.951486
Критерий	0.204679	0.226312	0.273746	0.283746	0.256616	3.119626
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.058824	0.061224	0.061224	0.0625	0.058824	2.162164
Критерий	0.181007	0.184532	0.23321	0.250081	0.223859	3.003516
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.11 следует сделать вывод, что временной ряд среднемесячной температуры в июле является однородным.

Определены критические значения статистик Фишера и Стьюдента. Для этого временной ряд был разбит на две приблизительно равные подвыборки, по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности – 1990 г, когда перестали на сайте [8] публиковать данные наблюдений. Результаты оценивания стационарности представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Оценки стационарности эмпирического распределения температуры для метеостанции Цзаоян

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	2.394163	1.883935	нестационарен
Стьюдент	1.913449	2.090550	стационарен
Июль			
Фишер	1.174419	1.862606	стационарен
Стьюдент	1.596981	2.090550	стационарен

Из анализа данных таблицы 2.13 следует, что расчетное значение статистики Фишера превышает критическое значение, что указывает на нестационарность временного ряда температуры в январе по дисперсии. Во всех остальных случаях временной ряд оказывается стационарным.

Далее проанализируем особенности изменения температуры на станции Фансян, которая расположена на востоке провинции. На рисунке 2.10 представлены внутригодовые колебания температуры. Самым холодным месяцем в году по-прежнему является январь, а самым теплым – июль.

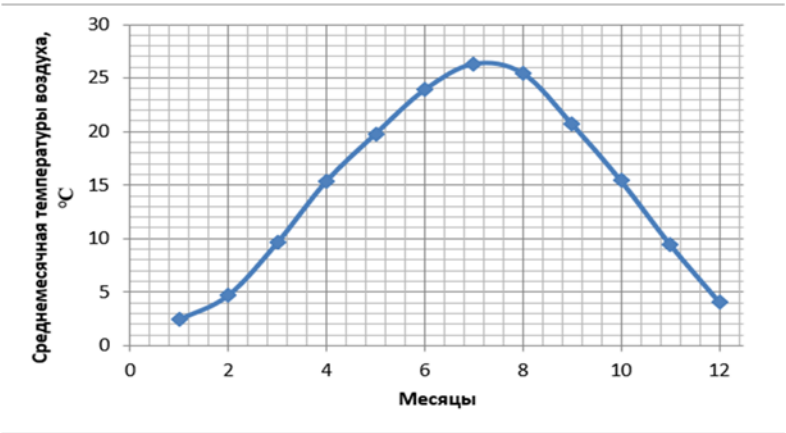
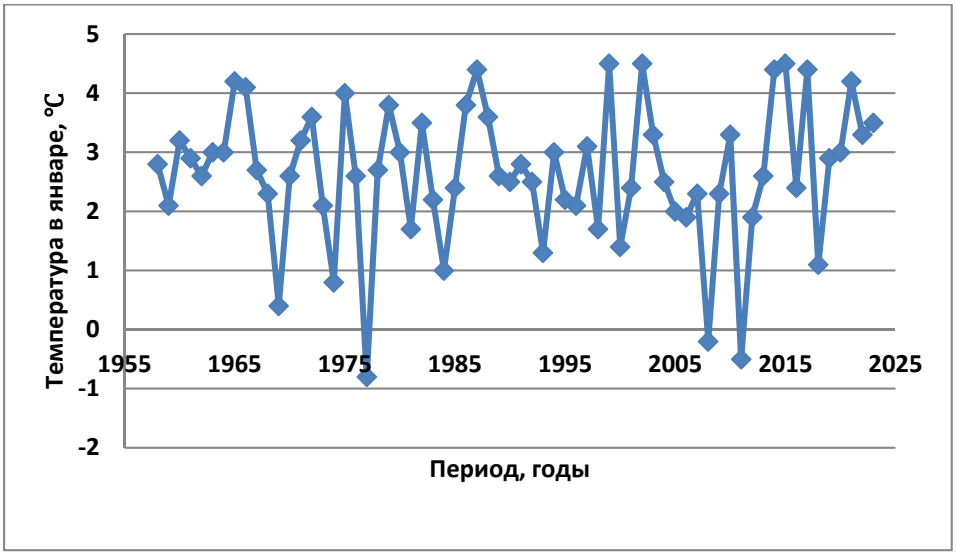


Рисунок 2.10 – График внутригодовых колебаний температуры в Фансян

Хронологические многолетние графики температуры данных месяцев представлены на рисунке 2.11.

а)



б)

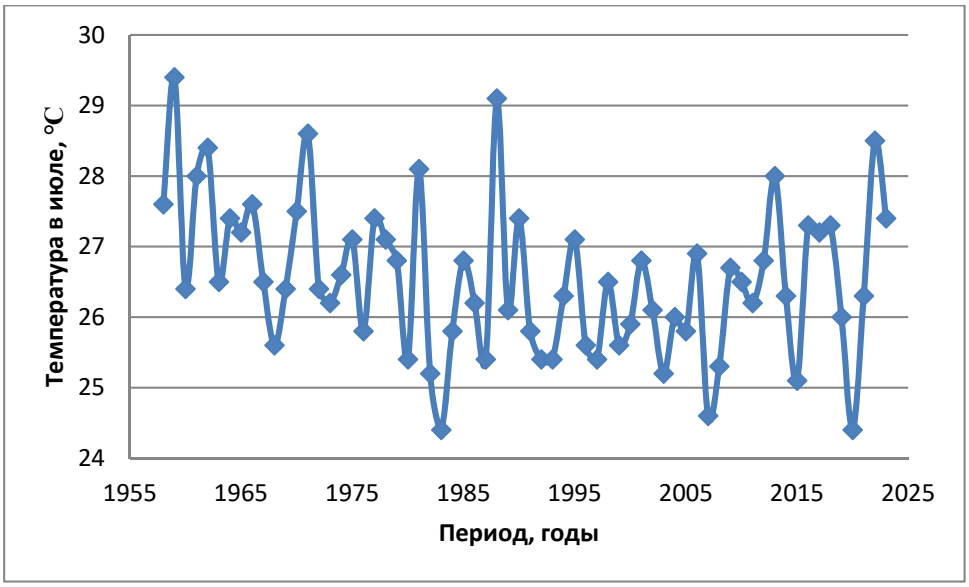


Рисунок 2.11 – Хронологические графики изменения среднемесячной температуры на станции Фансян: а – в январе, б – в июле

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в январе на станции Фансян (рисунок 2.11 (а) показал, что резко выраженные максимумы отсутствуют. Как следует из дальнейшего анализа графика 2.11 , наблюдаются сразу три резко выраженных минимума в 1977 г (–1,2℃), в 2008 г (–0,2 ℃) и в 2011 г (0.8 ℃).

Таблица 2.14 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на метеостанции Фансян

Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,056604	0,056604	0,113208	0,113208	0,113208	2,949205
Критерий	0,089399	0,117115	0,139251	0,142541	0,128687	2,055757
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	неоднороден

При проверке однородности по минимальным значениям по критерию Смирнова-Граббса расчетная статистика больше табличного критерия. Однако проверка однородности по критериям Диксона свидетельствует об однородности климатологического ряда.

Визуальный анализ данных наблюдений изменений температуры в июле на станции Фансян (рисунок 2,11 (б), показал, что имеются два резко выраженных максимума в 1959 г (29,4℃) и в 1988 г (29,1℃). Резко выраженные минимумы отсутствуют. Оценки однородности среднемесячных температур в июле приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на метеостанции Фансян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.155172	0.176471	0.196078	0.200000	0.172414	2.821434
Критерий	0.242747	0.268311	0.317670	0.327670	0.308315	3.481478
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.120690	0.142857	0.163265	0.166667	0.137931	2.338838
Критерий	0.139804	0.152469	0.190713	0.199934	0.18094	2.572095
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных таблицы 2.15 следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Фансян является однородным.

Результаты оценивания стационарности представлены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Оценки стационарности эмпирического распределения температуры для метеостанции Фансян

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1.324808	2.037392	стационарен
Стьюдент	1.399730	2.090760	стационарен
Июль			
Фишер	1.927498	1.966767	стационарен
Стьюдент	0.398400	2.090760	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе и июле на станции Фансян меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Таким образом, временные ряды температуры выбранных станций в провинции Хубэй являются однородными и стационарными.

2.4 Оценки однородности и стационарности данных сумм осадков

График внутригодовых колебаний сумм осадков на станции Ухань представлен на рисунке 2.12. Как следует из анализа данного графика, дождливым в Ухане является период с марта по август, когда выпадает более 90 мм в месяц.

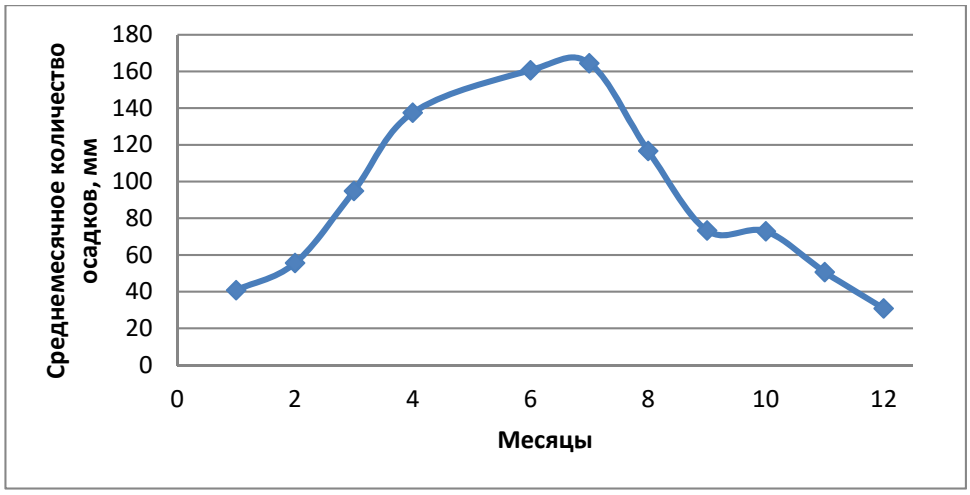


Рисунок 2.12 – График внутригодовых колебаний количества осадков на станции Ухань

Визуальный анализ данных наблюдений изменений сумм осадков на станции Ухань (рисунок 2.13), показал, что зарегистрированы два резко выраженных максимума в 2015 г (4700 мм) и в 2016 г (5087 мм), который более чем на 3500 мм превосходит следующий максимум, наблюдавшийся в 1954 г (2058 мм). Как следует из дальнейшего анализа графика 2.13, наблюдается резко выраженный минимум в 1938 г (299,2 мм), который почти вдвое меньше следующего минимума, наблюдавшегося в 1902 г (575,4 мм).

Очевидно, что максимумы 2015-2016 гг являются неоднородными, однако проверку по методике, описанной в п.п. 2.2 провести не удается, т.к. получается коэффициент асимметрии $C_s = 4{,}96$, который выходит за пределы табличных значений. Поэтому при оценке однородности вышеупомянутые максимумы были исключены из расчетов.

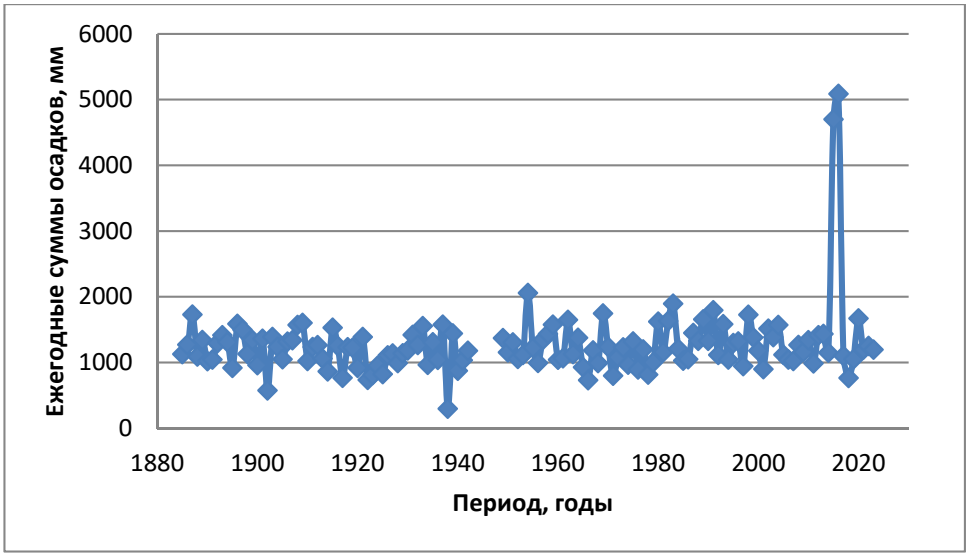


Рисунок 2.13 – Хронологический график изменения годовых сумм осадков на станции Ухань

Оценки однородности временных рядов сумм осадков на станции Ухань приведены в таблице 2.17. После удаления максимумов 2015-2016 гг ряд сумм осадков оказывается однородным по максимальным значениям, но неоднородным по минимальным значениям. Поэтому минимум 1938 г также был исключен из рассмотрения. Статистики критериев Диксона и Смирнова-Граббса были пересчитаны и приведены ниже в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков на метеостанции Ухань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,09268	0,10998	0,17745	0,19819	0,14953	3,03848
Критерий	0,17382	0,17535	0,22705	0,23705	0,22374	3,48196
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,15732	0,17339	0,27059	0,28868	0,24551	3,32360
Критерий	0,11812	0,13980	0,18732	0,18843	0,15923	3,13676
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден
Оценки однородности по минимальным значениям (после пересчета)						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,10465	0,11758	0,12243	0,13248	0,10897	2,44629
Критерий	0,09300	0,11334	0,14846	0,15603	0,13309	2,67604
Оценка	не однороден	не однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

После удаления минимума 1938 г при проверке однородности по критерию Смирнова-Граббса временной ряд оказывается однородным, а по критериям Диксона $D1_1$ и $D2_1$ – неоднородным. Учитывая, что отличие имеет порядок третьего знака после запятой, временной ряд принимается условно однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Ухань был разбит на две неравные подвыборки: с 1885 по 1942 гг. и с 1949 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Результаты оценивания стационарности представлены в таблице 2.18. Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для сумм осадков на станции Ухань меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Таблица 2.18 – Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для метеостанции Ухань

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,23557	1,55232	стационарен
Стьюдент	1,28627	2,07732	стационарен

Далее проанализируем временной ряд сумм осадков на станции Гуахуа. График внутригодовых колебаний сумм осадков представлен на рисунке 2.14. Дождливым в Гуахуа является период с мая по сентябрь, когда выпадает более 80 мм в месяц.

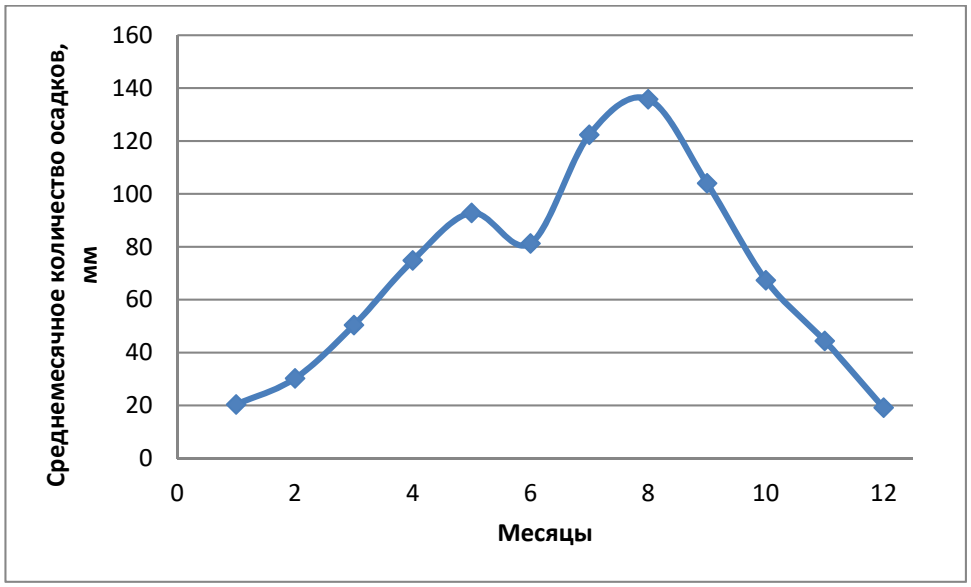


Рисунок 2.14 – График внутригодовых колебаний сумм осадков на станции Гуахуа

Визуальный анализ изменений сумм осадков на станции Гуахуа (рисунок 2.15) показал, что колебания сумм осадков достаточно значительны из года в год. Есть периоды с повышенными и пониженными уровнями осадков. Например, существуют пики около 1935, 1955, 1980 и 2005 гг. Также видны явные падения, особенно заметное в 2013 году.

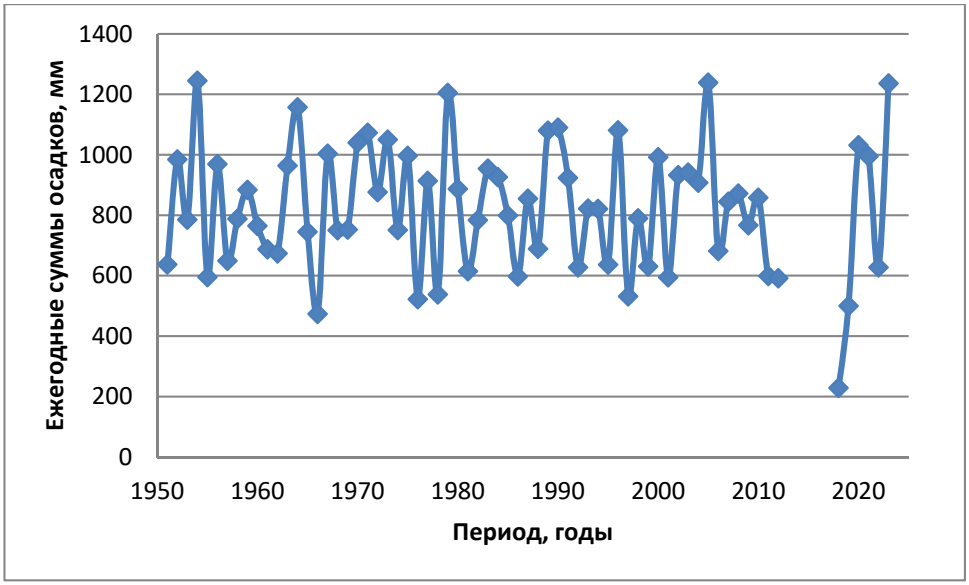


Рисунок 2.15 – Хронологический график изменения годовых сумм осадков на станции Гуахуа

Таблица 2.19 – Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков на метеостанции Гуахуа

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0.005906	0.007782	0.011673	0.012081	0.008858	1.874446
Критерий	0.208873	0.229858	0.281199	0.291199	0.261663	3.205175
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.241142	0.242574	0.268317	0.269116	0.266732	2.827223
Критерий	0.280561	0.283002	0.299982	0.28943	0.299323	3.014111
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Оценки однородности, представленные в таблице 2.19, указывают на статистически однородное распределение ежегодных сумм осадков, как для максимальных, так и для минимальных значений.

Результаты оценивания стационарности представлены в таблице 2.20.

Таблица 2.20 – Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для метеостанции Гуахуа

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1.06149	1.804482	стационарен
Стьюдент	1.287588	2.089500	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для сумм осадков на станции Гуахуа меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Далее проанализируем временной ряд сумм осадков на станции Мачэн. График внутригодовых колебаний сумм осадков представлен на рисунке 2.14. Как следует из анализа данного графика, дождливым в Мачэне является период с апреля по сентябрь, когда выпадает более 100 мм в месяц.

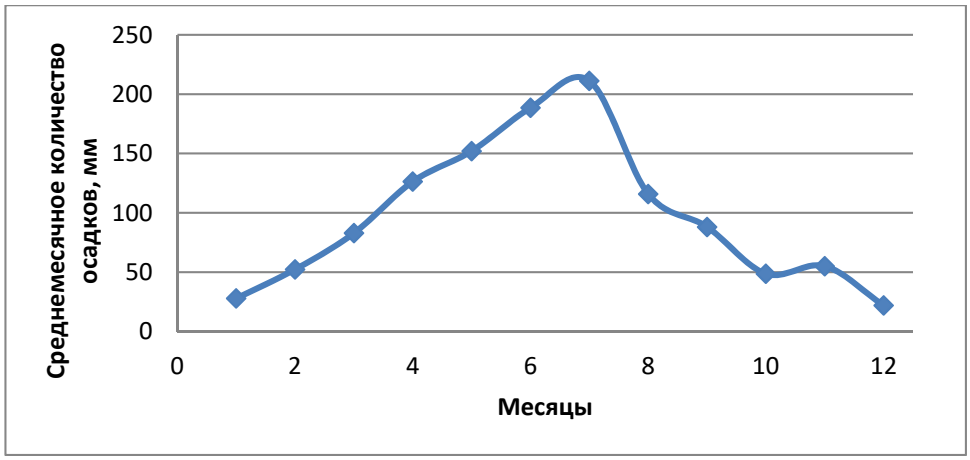


Рисунок 2.16 – График внутригодовых колебаний количества осадков на станции Мачэн

Хронологические многолетние графики сумм осадков представлены на рисунке 2.17. Резко выраженных максимумов на графике не выявлено, имеется минимум сумм осадков в 1978 г, который более чем на 100 мм меньше следующего минимума.

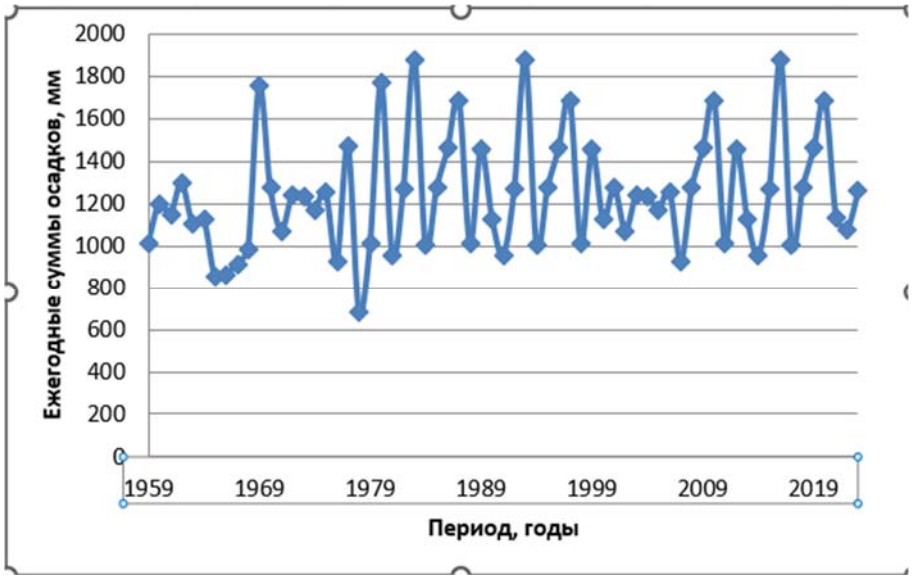


Рисунок 2.17 – Хронологический график годовых сумм осадков на станции Мачэн

Оценки однородности сумм осадков по минимальным значениям приведены в таблице 2.21, которые позволяют сделать вывод, что ряд однороден.

Таблица 2.21 – Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков на метеостанции Мачэн

Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.143096	0.143096	0.151464	0.151464	0.151464	2.050224
Критерий	0.164783	0.157361	0.156648	0.154706	0.165875	2.112447
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Оценки стационарности представлены в таблице 2.22, из анализа которых можно сделать вывод, что ряд является стационарным.

Таблица 2.22 – Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для метеостанции Мачэне

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1.32794	2.082453718	стационарен
Стьюдент	1.25833	2.09097	стационарен

Далее проанализируем временной ряд сумм осадков на станции Цзаоян. График внутригодовых колебаний сумм осадков представлен на рисунке 2.14. Как следует из анализа данного графика, дождливым в Цзаоян является период с апреля по сентябрь, когда выпадает более 80 мм в месяц.

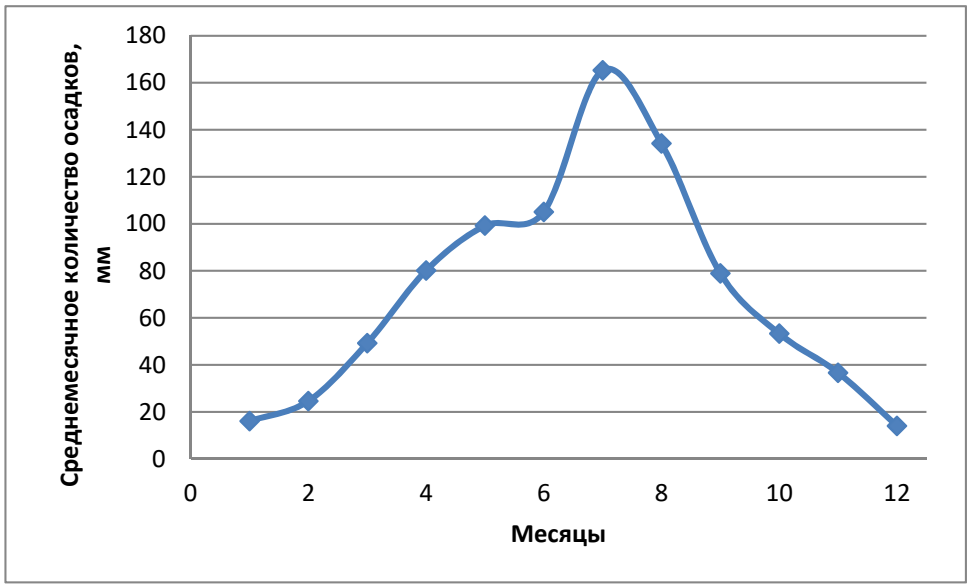


Рисунок 2.18 – График внутригодовых колебаний количества осадков на станции Цзаоян.

Хронологический многолетний график сумм осадков представлен на рисунке 2.19.

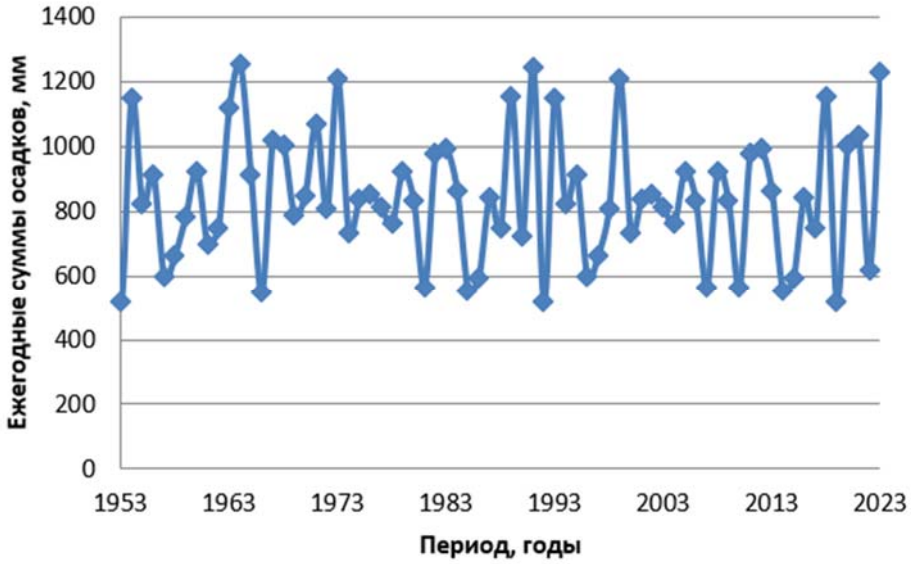


Рисунок 2.19 – Хронологический график изменения годовых сумм осадков на станции Цзаоян.

Резко выраженных максимумов и минимумов во временном ходе осадков не выявлено. Расчет оценок однородности временного ряда выполнен (оценки здесь не приводятся), во всех случаях рассчитанные статистики оказались меньше критических табличных значений, из чего следует сделать вывод, что временной ряд сумм осадков на станции Цзаоян является однородным.

Оценки стационарности временного ряда представлены в таблице 2.20.

Таблица 2.23 – Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для метеостанции Цзаоян

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1.155898	1.914686	стационарен
Стьюдент	0.606747	2.0895	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для сумм осадков на станции Цзаоян меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

Далее проанализируем временной ряд сумм осадков на станции Фансян. График внутригодовых колебаний сумм осадков представлен на рисунке 2.20. Как следует из анализа данного графика, дождливым на станции Фансян является период с мая по сентябрь, когда выпадает более 100 мм в месяц.

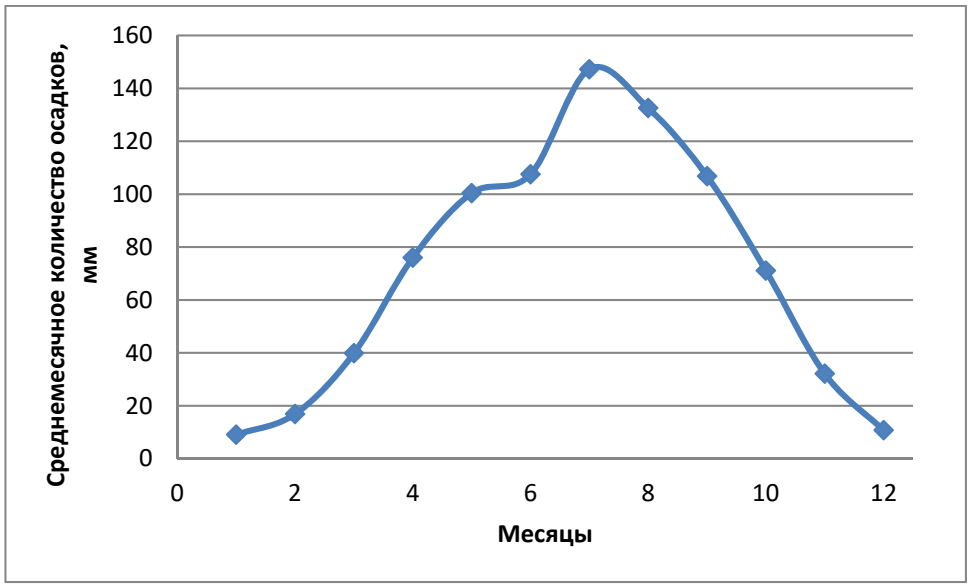


Рисунок 2.20 – График внутригодовых колебаний количества осадков на станции Фансян.

Хронологический многолетний график сумм осадков представлен на рисунке 2.21.

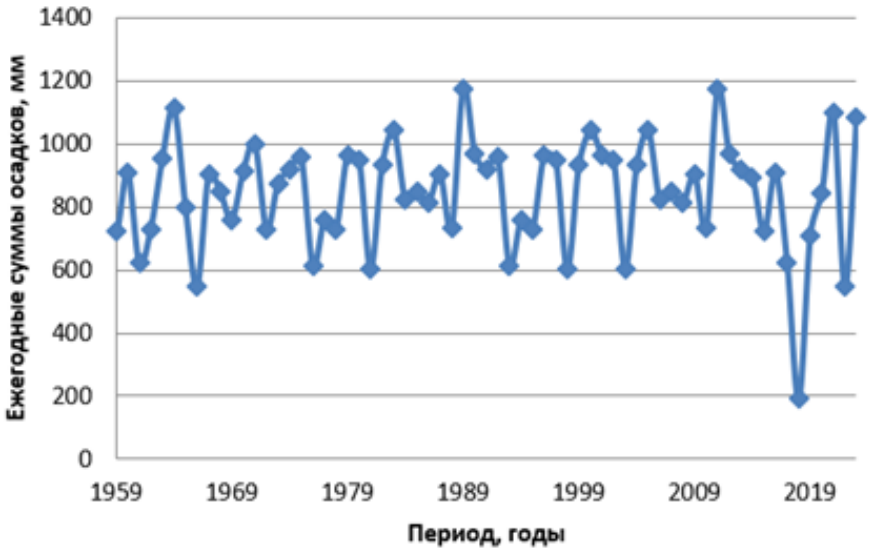


Рисунок 2.21 – Хронологический график годовых сумм осадков на станции Фансян.

Как следует из анализа рисунка 2.20, резко выраженных максимумов не выявлено. Имеется резко выраженный минимум в 2018 г (197 мм/год), который более чем на 300 мм меньше, чем следующий минимум в 2022 г. Оценки стационарности для сумм осадков для станции Фансян приведены в таблице 2.21.

Таблица 2.21 – Оценки однородности эмпирического распределения годовых сумм осадков на станции Фансян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,0	0,0	0.099842	0.100318	0.063895	1.931267
Критерий	0.30624	0.344491	0.394675	0.404675	0.393134	4.092705
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден
Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0.360041	0.360041	0.363083	0.387866	0.363083	3.828282
Критерий	0.070934	0.106004	0.121729	0.123289	0.110775	1.877716
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден

Рассчитанные статистики Диксона и Смирнова-Граббса для минимальных значений оказываются больше табличных критериев. После удаления минимума 2018 г ряд оказывается однородным.

Оценки стационарности временного ряда сумм осадков на станции Фансян представлены в таблице 2.22.

Таблица 2.22 – Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для метеостанции Фансян

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	0.203676	2.084189	стационарен
Стьюдент	0.011697	2.090760	стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для сумм осадков на станции Фансян меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего.

2.5 Выводы по главе 2

В результате работы над главой 2 сформирована база данных из результатов наблюдений 5 метеорологических станций. Метеорологические станции выбирались таким образом, чтобы они равномерно были распределены по территории провинции и имели наибольший период наблюдений. Максимальный период наблюдений имеется на станции Ухань (административный центр провинции). На остальных станциях период наблюдений начинается в 50-е гг прошлого столетия.

На всех станциях самым холодным месяцем в году является январь, самым теплым июль. Дождливым является период, приходящийся на теплое время года: с апреля по сентябрь.

Проведено оценивание однородности и стационарности временных рядов температуры и сумм осадков.

На станции Ухань два максимума сумм осадков 2015 и 2016 гг исключены из рассмотрения, а также неоднородный минимум 1938 г, а для станции Фансян – минимум 2018 г. Из временного ряда температуры январе для станции Гуанхуа удален неоднородный минимум 1977 г. В трех последних случаях выводы о неоднородности экстремумов были сделаны по критериям Диксоан и Смирнова-Граббса.

В некоторых случаях ряд оказывался неоднородным по критерию Смирнова-Граббса, но однородным – по критериям Диксона. Например, максимум температуры в январе 1914 г для станции Ухань, минимум температуры в январе 1977 г для станции Фансян. В таких случаях, экстремум не исключался из рассмотрения, а ряд считался однородным.

На станции Цзаоян временной ряд температуры в январе оказался нестационарным по дисперсии.

3 Моделирование климатических изменений температуры и сумм осадков в провинции Хубэй

Следующим этапом исследований является оценивание изменений среднемесячной температуры воздуха самого холодного и самого теплого месяцев года, а также годовых сумм осадков в провинции Хубэй.

3.1 Статистические модели климатических изменений

Климатическая система Земли постоянно меняется и формирует целый спектр колебаний климатических характеристик с различной периодичностью. Изменчивость климатической системы оценивается на основе анализа большого числа показателей, но, в первую очередь, на основе анализа температуры воздуха и количество осадков. В данном исследовании будут построены модели климатических изменений основных показателей и произведено оценивание качества разработанных моделей.

Изменение климатической системы может быть представлено с помощью двух основных видов моделей [12]:

– стационарных моделей;

– нестационарных моделей.

В данной работе для оценивания климатических изменений использовались стационарная модель и две нестационарные модели: модель линейного тренда и модель ступенчатых изменений.

В основе стационарной модели лежит предположение, что основные параметры временного ряда (среднее значение и среднее квадратическое

отклонение) являются стационарными (неизменными во времени), что может быть описано в виде [12]:

$$Y_{\text{ср}}(t) = const, \tag{3.1}$$

$$\sigma(t) = const. \tag{3.2}$$

Данная модель может корректно применяться для некоторых районов Земного шара и (или) для некоторых промежутков времени. Среди нестационарных моделей, в настоящее время, наибольшее распространение получила модель линейного тренда, которая может быть описана с помощью регрессионного уравнения вида:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \tag{3.3}$$

где b_1, b_0 – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты b_1 и b_0 определяются с помощью метода наименьших квадратов по формулам [12]:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_{\text{ср}})(t_i - t_{\text{ср}})}{\sum_{i=1}^{n}(t_i - t_{\text{ср}})^2}, \tag{3.4}$$

$$b_0 = Y_{\text{ср}} - b_1 t_{\text{ср}}, \tag{3.5}$$

где $Y_{\text{ср}}$, $t_{\text{ср}}$ – средние значения для рядов климатической характеристики и времени.

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или коэффициента корреляции R зависимости (3.5), который может быть рассчитан по формуле [12]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_{\text{ср}})(t_i - t_{\text{ср}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_{\text{ср}})^2 \sum_{i=1}^{n}(t_i - t_{\text{ср}})^2}}. \tag{3.6}$$

Статистическая значимость модели линейного тренда определяется из условия:

$$R \geq R^*, \tag{3.7}$$

где R^* – критическое значение коэффициента корреляции.

Критическое значение R^* – табличное значение, которое изменяется в зависимости от числа степеней свободы ν $(\nu = n - 2)$ и уровня значимости α.

В последнее время, все чаще используется для описания климатических изменений модель ступенчатых изменений. Данная модель характеризует неравновесную систему, которая некоторое время может сопротивляться внешним воздействиям.

Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или более) стационарным моделям, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и СКО для каждой части ряда [13]:

$$Y_{\text{ср},j}(t_j) = const1_j, \;\; j = 1,(1),m, \tag{3.8}$$

$$\sigma_j(t_j) = const2_j, \;\; j = 1,(1),m, \tag{3.9}$$

где $Y_{\text{ср},j}(t_j)$, $\sigma_j(t_j)$ – среднее значение и СКО j-ой части ряда, t_j – периоды временного ряда, которые предполагают стационарными, m – число ступенчатых изменений во временном ряду.

Периоды перехода из одного стационарного состояния в другое определяется либо визуально, либо на основании дополнительной информации о моменте нарушения стационарности.

Следующим шагом является оценивание эффективности моделей. Наиболее распространенной мерой оценки эффективности любой модели является ее остаточная дисперсия σ_ε [13]:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{ср}})^2}{(n-1)}}, \tag{3.10}$$

где ε_i – остатки, рассчитываемые как разность между фактическими Y_i и полученными по модели значениями Y_i^* $(\varepsilon_i = Y_i - Y_i^*)$; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – среднее значение остатков (при несмещенности значения равно нулю).

Оценивание эффективности моделей осуществляется относительно стационарной модели. Стандартизированный остаток σ_ε стационарной модели равен стандартному отклонению временного ряда σ_Y: $\sigma_\varepsilon = \sigma_Y$

$$\varepsilon_i = \sigma_Y. \tag{3.11}$$

Для модели линейного тренда стандартизированный остаток рассчитывается по формуле [18]:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_Y\sqrt{1 - R^2}, \tag{3.12}$$

где R – коэффициент корреляции модели линейного тренда, рассчитываемый по формуле (3.6).

Для модели ступенчатых изменений стандартизированный остаток определяется с помощью формулы [20]:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}\sigma_j^2 m_j}{(n-1)}}, \tag{3.13}$$

где σ_j , m – СКО и объем i-ой части ряда.

Для количественного оценивания качества моделей рассчитываются их относительные погрешности Δ относительно стационарной модели по формуле:

$$\Delta = \left(\frac{\sigma_Y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_Y}\right)100\% \tag{3.14}$$

Можно считать, что рассматриваемая модель будет эффективнее стационарной модели при выполнении условия:

$$\Delta \geq 10\ \%. \tag{3.15}$$

Условие (3.15) можно назвать достаточным условием, так как оно гарантирует, что отличие между моделями превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценивания статистической значимости рассматриваемых моделей используется статистический критерий Фишера для оценивания однородности дисперсий (если дисперсии неоднородны, то данная модель статистически значимо отличается от стационарной модели). Статистика критерия Фишера рассчитывается по формуле:

$$F = \sigma_Y^2 / \sigma_\varepsilon^2 . \qquad (3.16)$$

В случае, если расчетное значение статистики Фишера больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие, и рассматриваемая модель статистически эффективнее стационарной модели.

3.2 Моделирование климатических изменений температуры для января

В таблице 3.1 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры января для провинции Хубэй.

Таблица 3.1 – Основные параметры стационарных моделей провинции Хубэй

Название метеостанции	Среднее $Y_{\text{ср}}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Ухань	4,02	1,49
Гуанхуа	2.57	1.39
Мачэн	3,85	1,35
Цзаоян	2.91	1.40
Фансян	2.41	1.20

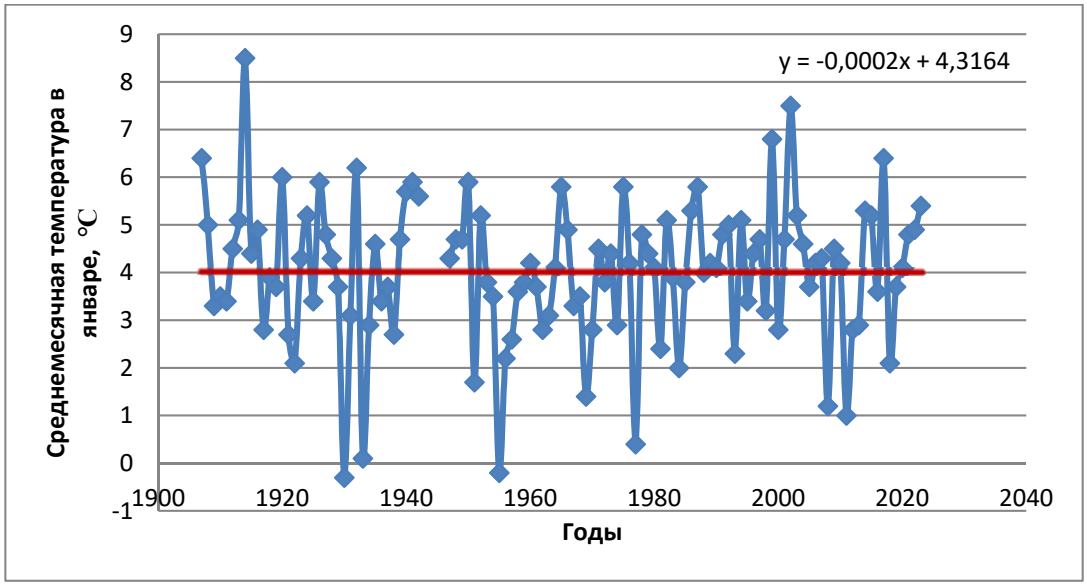
Проверка стационарности временного ряда была осуществлена ранее при выполнении п. 2.3-2.4. Для проверки использовались критерии Стьюдента и Фишера.

На рисунке 3.1 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур января. В таблице 3.2 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры января для провинции Хубэй. Для проверки статистической значимости модели линейного тренда выполняется проверка условия (3.7). Для двух из пяти станций линейная модель не является статистически значимой.

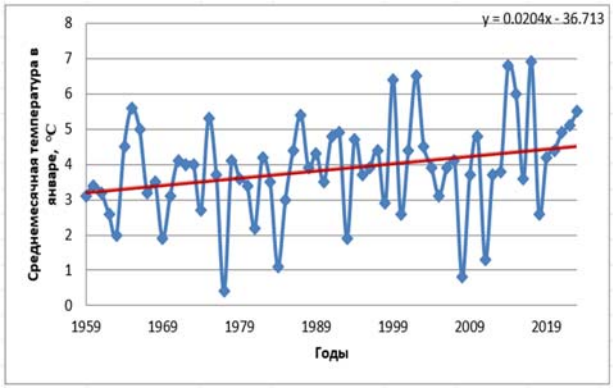
Таблица 3.2 Основные параметры линейной модели станций провинции Хубэй

Название метеостанции	b_o	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Ухань	4,316	-0,0002	-0,004	0,184	Незначима	1,49
Гуанхуа	-48.358	0.0256	0.391	0.218	Значима	1.28
Мачэн	-36.712	0.0203	0.284	0.224	Значима	1.29
Цзаоян	-32.101	0.0175	0.241	0.223	Значима	1.35
Фансян	-16.055	0.0092	0.148	0.224	Незначима	1.18

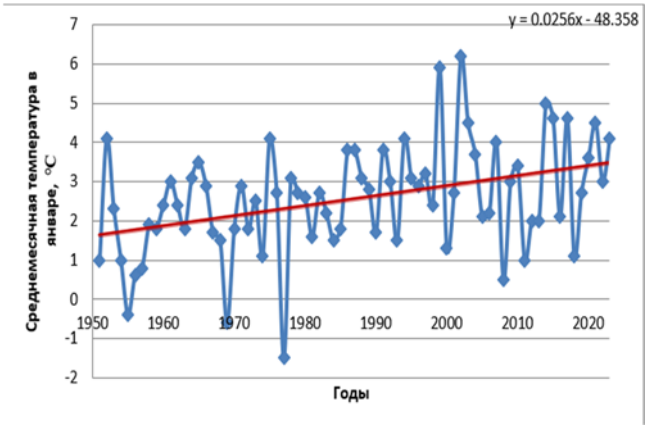
а)



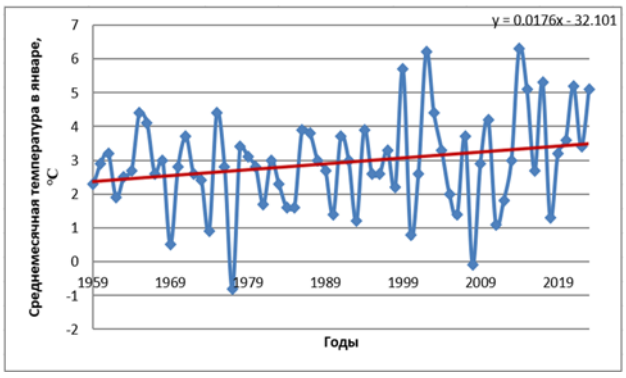
б)



в)



г)



д)

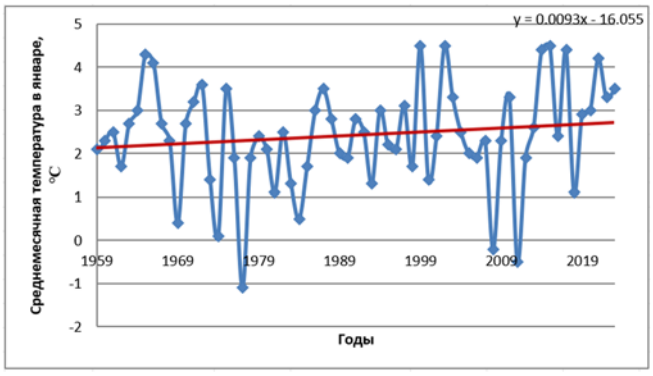


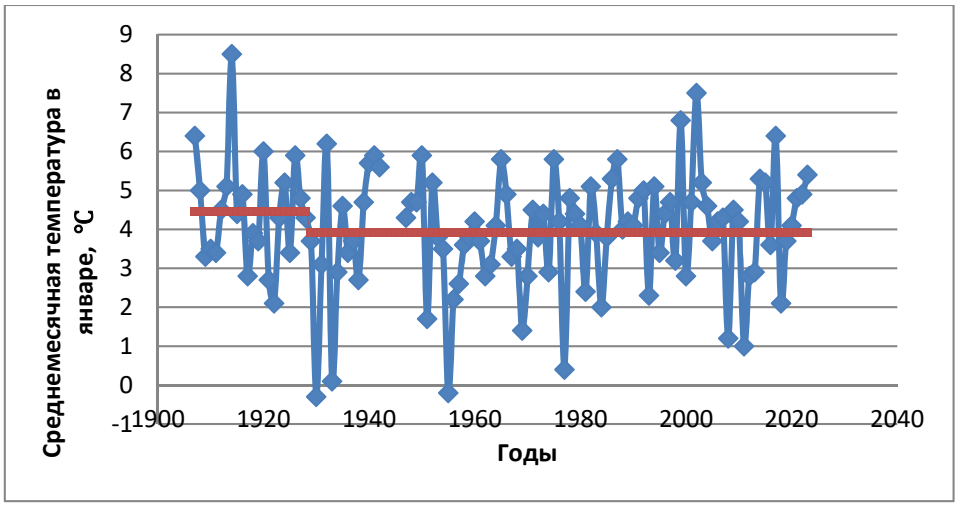
Рисунок 3.1 – Линейная модель среднемесячных температур в январе для станций провинции Хубэй:

а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансян

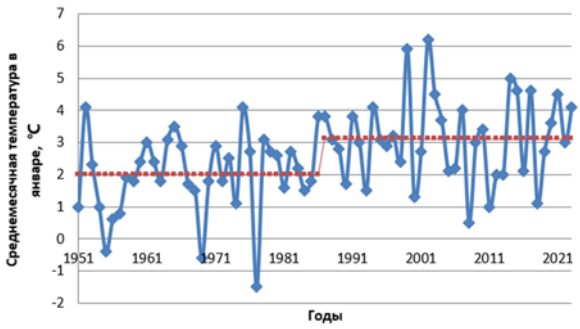
На рисунке 3.2 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с хронологическими графиками

среднемесячных температур января. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.3.

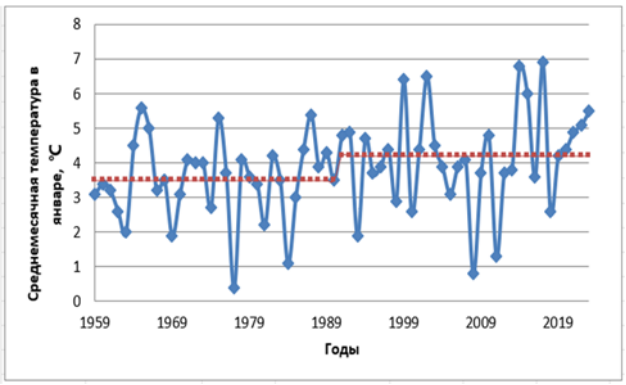
а)



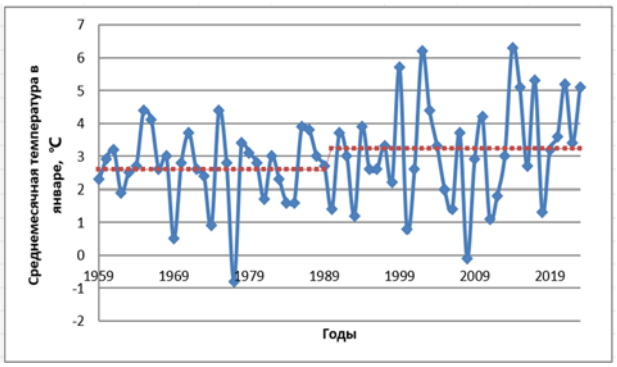
б)



в)



г)



д)

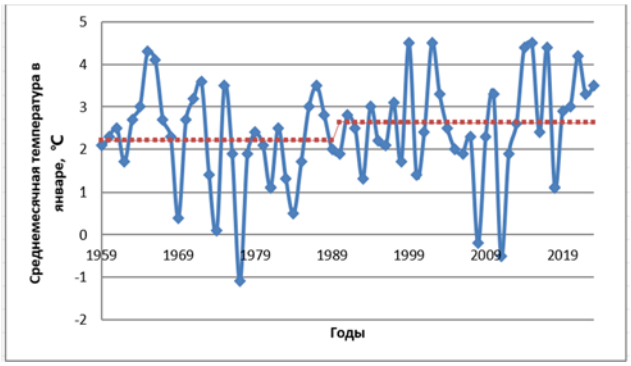


Рисунок 3.2 – Модели ступенчатых изменений среднемесячных температур в январе для станций провинции Хубэй:

а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансянь

Таблица 3.3 – Основные параметры ступенчатой модели для станций Хубэй

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{\text{ср},j}$, мм	σ_j	$\sigma_{\text{ст}}$
Ухань	1	22	4,459	1,431	1,489
	2	91	3,913	1,495	
Гуанхуа	1	36	2.005	1.240	1.292
	2	37	3.113	1.324	
Мачэн	1	32	3.496	1.16	1.32
	2	33	4.203	1.44	
Цзаоян	1	33	2.593	1.10	1.38
	2	33	3.233	1.59	
Фансянь	1	33	2.212	1.15	1.20
	2	33	2.624	1.23	

В таблице 3.4 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных табл. 3.4 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.

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменения температуры в январе для станций провинции Хубей.

Таблица 3.4 – Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{\text{тр}}$	$\sigma_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$, %	$\Delta_{\text{ст}}$, %	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$
Ухань	1,492	1.492	1,489	0,001	0,200	1,00	1,00
Гуанхуа	1.391	1.280	1.292	7.957	7.110	1.18	1.16
Мачэн	1.351	1.295	1.320	4.140	2.010	1.088	1.04
Цзаоян	1.401	1.359	1.380	2.940	1.171	1.061	1.02
Фансян	1.201	1.187	1.201	1.110	0.02	1,022	0,99

3.3 Моделирование климатических изменений температуры для июля

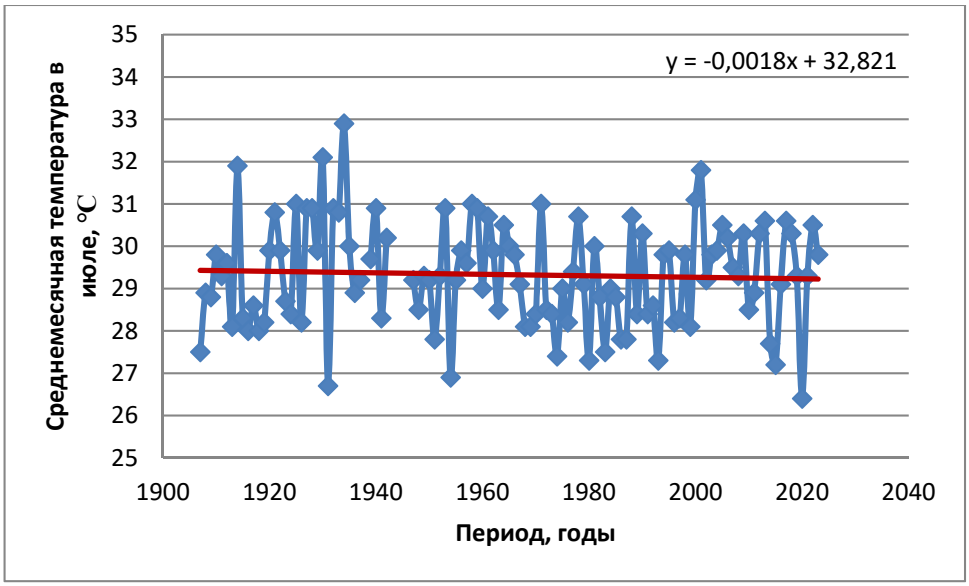
В таблице 3.5 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры июля для провинции Хубэй.

Таблица 3.5 – Основные параметры стационарных моделей станций Хубэй

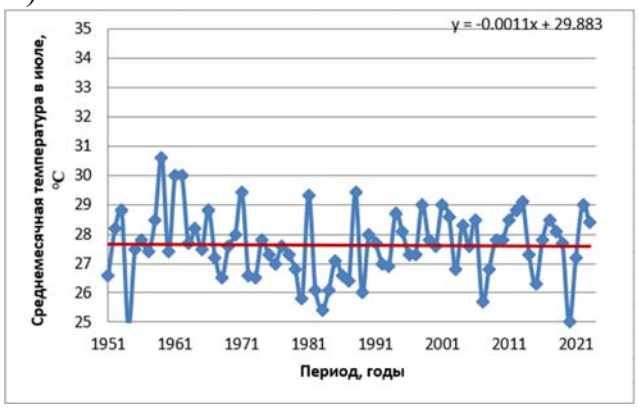
Название метеостанции	Среднее $Y_{\text{ср}}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Ухань	29,33	1,24
Гуанхуа	27.64	1.16
Мачэн	28.74	1.12
Цзаоян	28.08	1.24
Фансян	26.32	1.12

На рисунке 3.3 представлены модели линейного тренда совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур для июля.

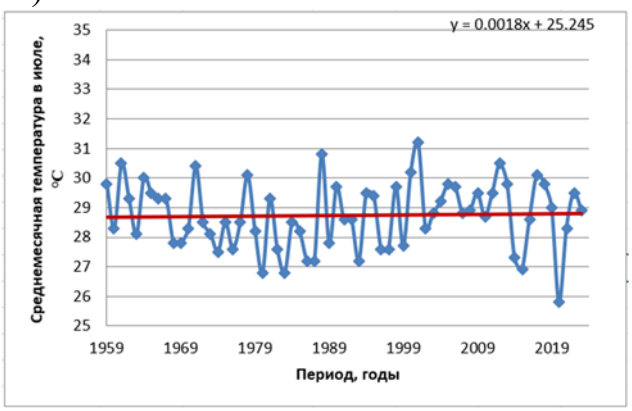
а)



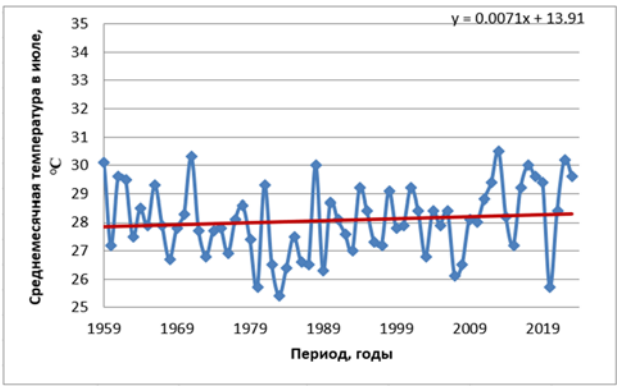
б)



в)



г)



д)

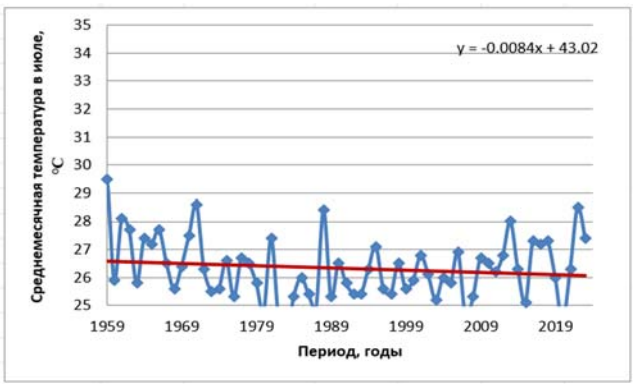


Рисунок 3.3 – Линейные модели среднемесячных температур в июле:
а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансянь

В таблице 3.6 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры июля для провинции Хубэй. Как следует из ее анализа, для всех станций линейная модель не является статистически значимой.

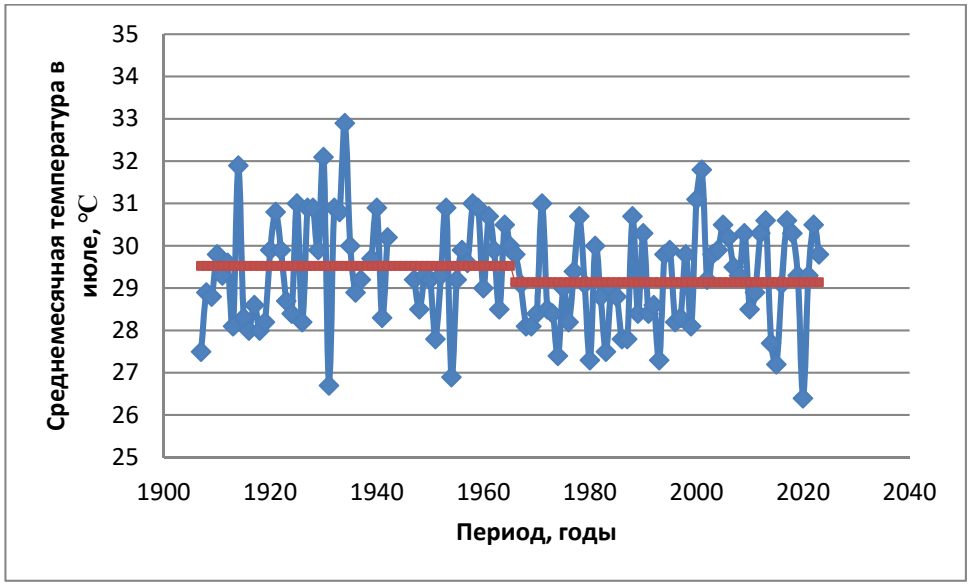
Таблица 3.6

Основные параметры линейной модели станций провинции Хубэй

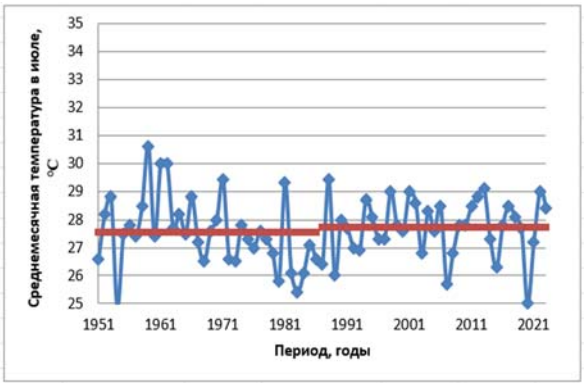
Название метеостанции	b_o	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Ухань	32,82	–0,002	–0,049	0,1848	Незначима	1,236
Гуанхуа	29.88	–0.001	–0.020	0.2180	Незначима	1.156
Мачэн	25.24	0.0017	0.029	0.224	Незначима	1.121
Цзаоян	13.91	0.0071	0.109	0.223	Незначима	1.241
Фансян	43.02	–0.0083	–0.143	0.224	Незначима	1.112

На рисунке 3.4 представлены изображения моделей ступенчатых изменений совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур для июля. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в табл. 3.7.

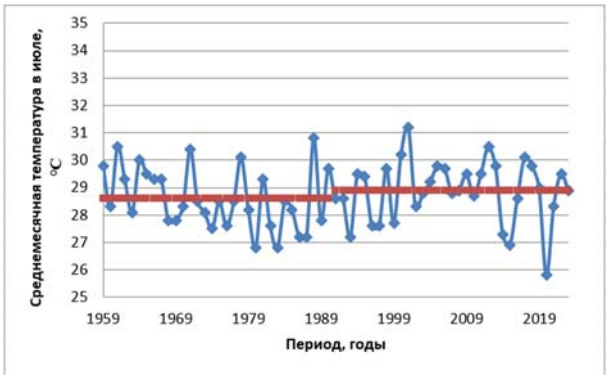
а)



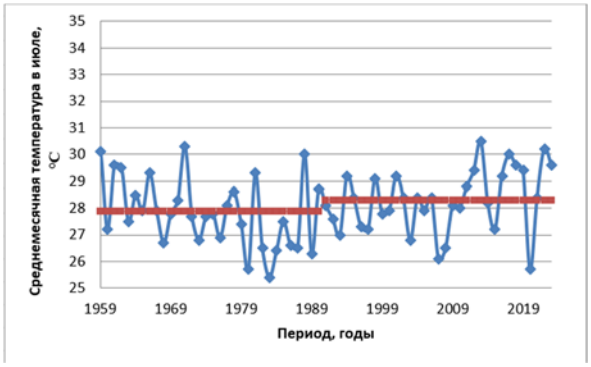
б)



в)



г)



д)

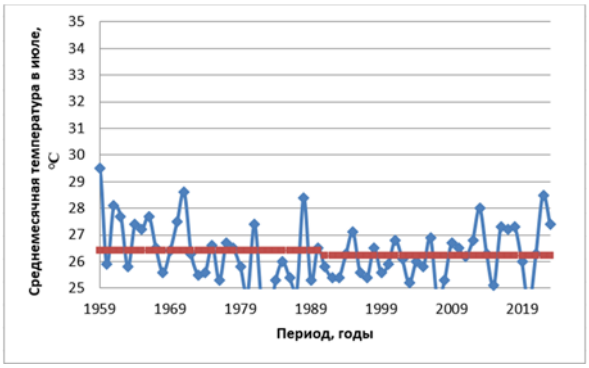


Рисунок 3.4 – Модели ступенчатых изменений среднемесячных температур в июля для станций провинции Хубэй:

а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансянь

Таблица 3.7 – Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций в провинции Хубэй

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{\text{ср},j}$, мм	σ_j	$\sigma_{\text{ст}}$
Ухань	1	22	29,53	1,29	1,23
	2	91	29,14	1,16	
Гуанхуа	1	36	27.55	1.29	1.17
	2	37	27.72	1.02	
Мачэн	1	32	28.60	1.11	1.13
	2	33	28.87	1.14	
Цзаоян	1	33	27.87	1.30	1.25
	2	33	28.29	1.17	
Фансянь	1	33	26.42	1.29	1.14
	2	33	26.23	0.93	

В таблице 3.8 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных таблицы 3.8 показывает, что для всех рассмотренных метеостанций значения относительной погрешности линейной модели $\Delta_{\text{тр}}$ и ступенчатых изменений $\Delta_{\text{ст}}$ имеют порядок одного процента, что говорит о том, что нестационарные модели не являются эффективными для описания

климатических изменений температуры в июле в провинции Хубэй. Соответственно, нестационарные модели и не являются статистически значимыми.

Таблица 3.8 Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{\text{тр}}$	$\sigma_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$, %	$\Delta_{\text{ст}}$, %	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$
Ухань	1,237	1,236	1,233	0,122	0,350	1,002	1,007
Гуанхуа	1,156	1,156	1,169	0,021	–1,112	1,0004	0,978
Мачэн	1.121	1.121	1.130	0.043	–0.792	1.0008	0.984
Цзаоян	1.249	1.241	1.250	0.601	0.117	1.0121	0,999
Фансян	1.123	1.112	1.137	1.031	1,1779	1.0709	0,976

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменений температуры в июле в провинции Хубэй.

3.4 Моделирование климатических изменений сумм осадков

В таблице 3.9 параметры стационарной модели сумм осадков для провинции Хубэй.

На рисунке 3.5 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с хронологическими графиками годовых сумм осадков.

Таблица 3.9 Основные параметры стационарных моделей годовых сумм осадков для станций провинции Хубэй

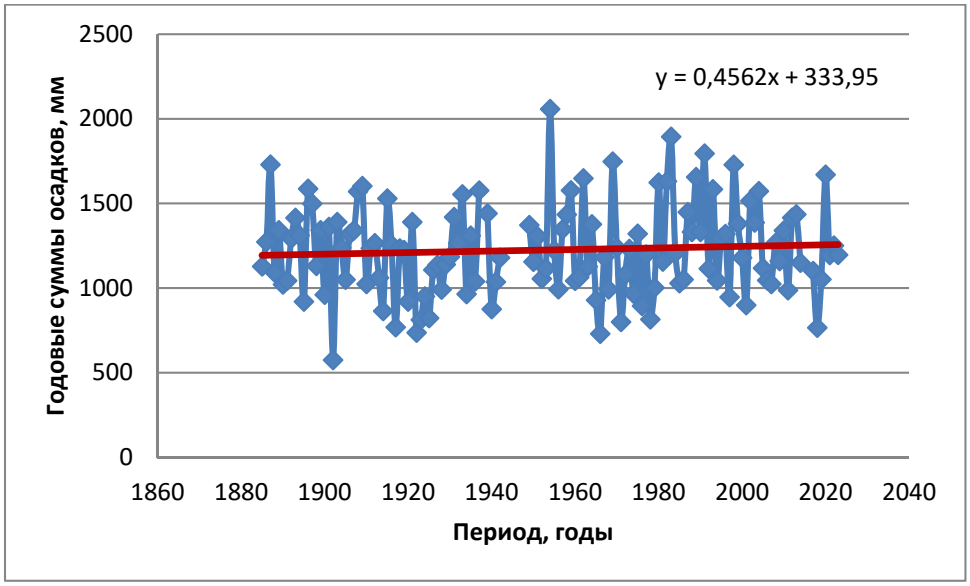
Название метеостанции	Среднее $Y_{\text{ср}}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Ухань	1225,08	265,37
Гуанхуа	824.51	209.21
Мачэн	1191.87	311.44
Цзаоян	835.25	211.48
Фансян	818.13	172.06

В таблице 3.10 приведены основные параметры линейной модели. Как следует из ее анализа, для всех станций линейная модель не является статистически значимой.

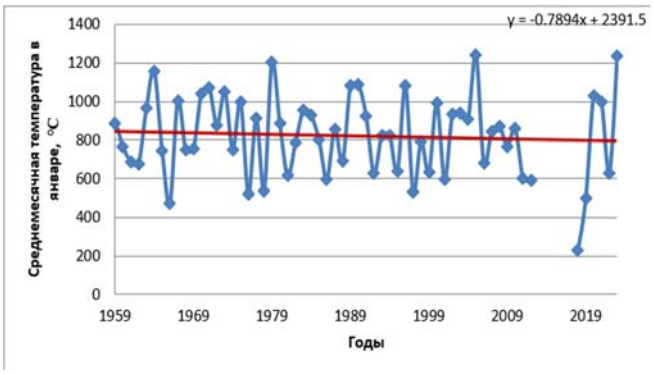
Таблица 3.10 – Основные параметры линейной модели станций провинции Хубэй

Название метеостанции	b_o	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Ухань	333,95	0,46	0,07	0,1695	Незначима	264,7168
Гуанхуа	2391.51	-0.78	-0.07	0.2222	Незначима	208,5872
Мачэн	-970.63	1.08	0.06	0.2248	Незначима	310.7698
Цзаоян	3921.63	1.55	0.15	0.2188	Незначима	208.9689
Фансян	3590.12	1.39	0.15	0.2239	Незначима	169.9718

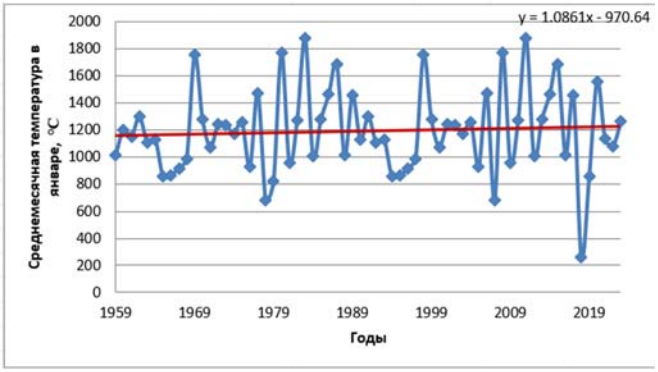
а)



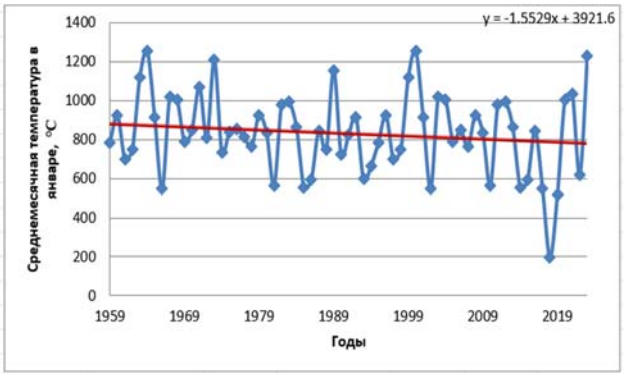
б)



в)



г)



д)

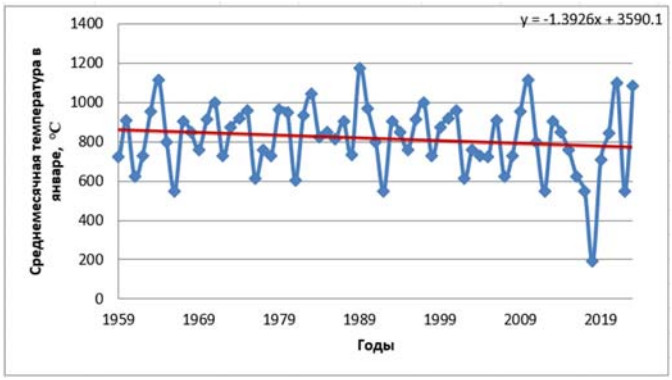
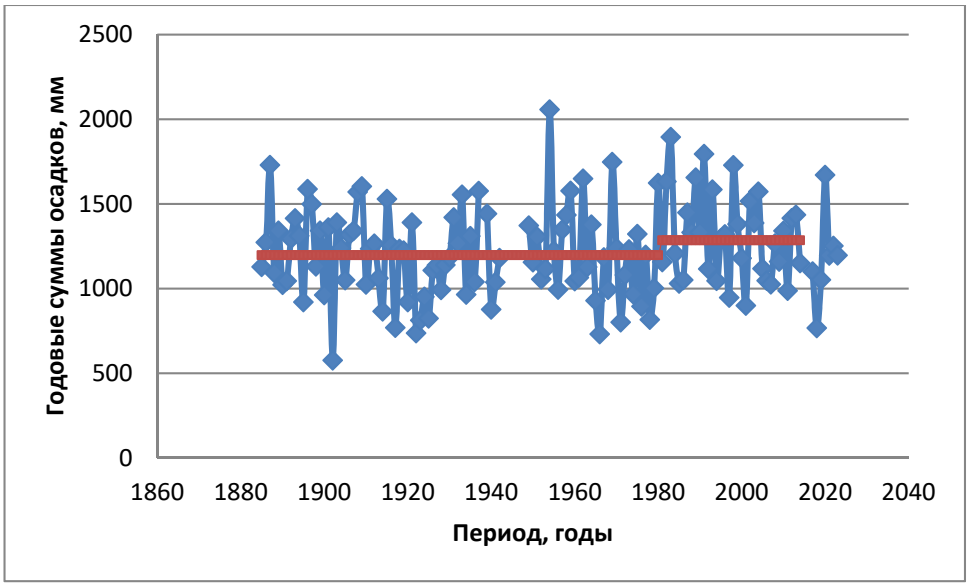


Рисунок 3.5 – Линейная модель сумм осадков для станций провинции Хубэй: а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансянь

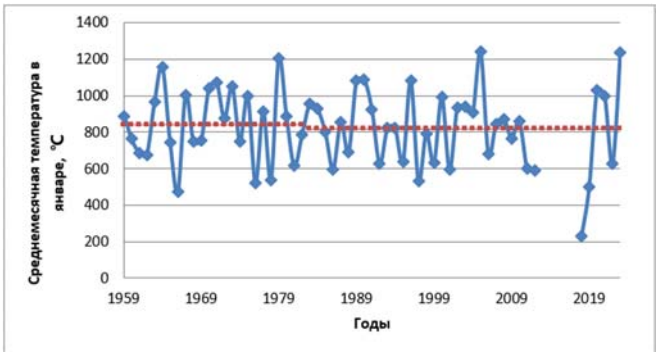
На рисунке 3.6 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с хронологическими графиками сумм

осадков. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.11.

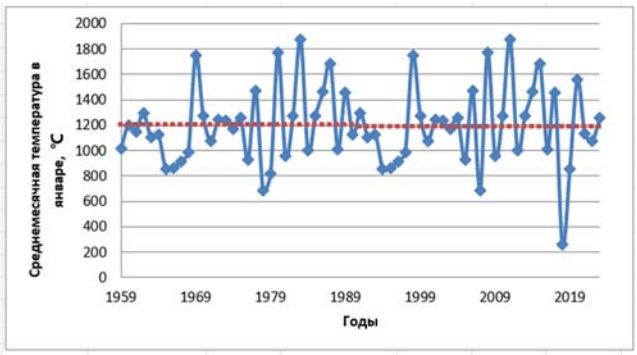
а)



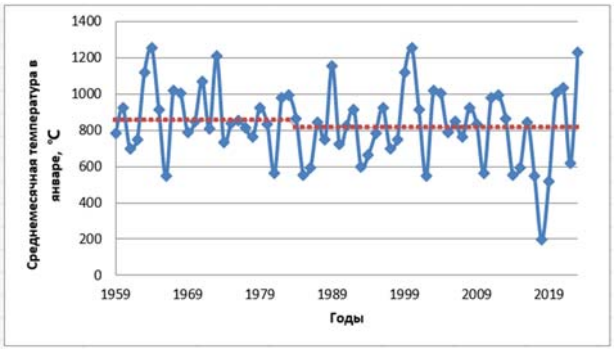
б)



в)



г)



д)

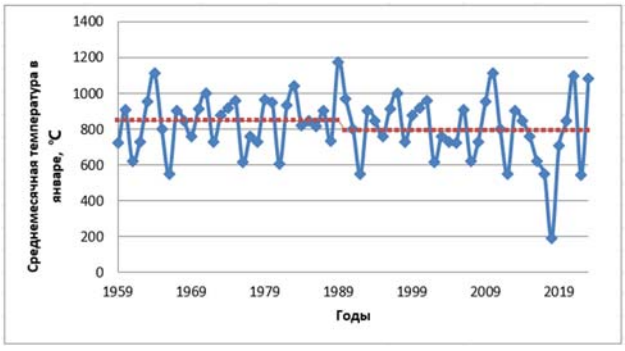


Рисунок 3.6 – Модели ступенчатых изменений сумм осадков для станций провинции Хубэй:

а – Ухань; б – Гуанхуа; в – Мачэн; г – Цзаоян; д – Фансянь

Таблица 3.11 – Основные параметры ступенчатой модели сумм осадков

Название метеостанции	Ступень	n	$Y_{\text{ср},j}$, мм	σ_j	$\sigma_{\text{ст}}$
Ухань	1	89	1197,31	264,56	264,20
	2	41	1285,37	260,17	
Гуанхуа	1	22	841.00	195.22	211.92
	2	46	817.90	217.22	
Мачэн	1	32	1197.40	290.84	316,29
	2	33	1186.51	334.65	
Цзаоян	1	36	855.58	197.76	213.47
	2	36	814.91	225.31	
Фансянь	1	32	846.96	145.96	172.34
	2	34	791.00	191.66	

В таблице 3.12 приведены СКО остатков нестационарных моделей, их относительная погрешность относительно стационарной модели и расчетные значения статистик критерия Фишера.

Анализ данных таблицы 3.8 показывает, что для всех рассмотренных метеостанций значения относительной погрешности линейной модели $\Delta_{\text{тр}}$ и ступенчатых изменений $\Delta_{\text{ст}}$ имеют порядок одного процента, что говорит о том, что нестационарные модели не являются эффективными для описания климатических изменений сумм осадков в провинции Хубэй. Соответственно, нестационарные модели и не являются статистически значимыми.

Таблица 3.12 Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{\text{тр}}$	$\sigma_{\text{ст}}$	$\Delta_{\text{тр}}$, %	$\Delta_{\text{ст}}$, %	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$
Ухань	265,37	264,71681264,20		0,259341	0,44	1,005	1,009
Гуанхуа	209.21	208.58	211.92	0.300	-1.29	1.006	0.974
Мачэн	311.44	310.76	316.29	0.217	-1.55	1.004	0.969
Цзаоян	211.48	208.96	213.47	1.187	-0.942	1,024	0,981
Фансян	172.06	169.97	172.34	1.214	-0.166	1,024	0,996

Таким образом, стационарная модель является наилучшей для описания изменений сумм осадков в провинции Хубэй.

3.5 Выводы по главе 3

На основе оценивания качества моделей, разработанных для описания изменения температуры и количества осадков метеостанций провинции Хубэй, следует сделать вывод, что простейшие нестационарные модели не являются эффективными и статистически значимыми. Проведем более детальный анализ изменения температуры и сумм осадков.

Наиболее продолжительным периодом наблюдений обладает метеостанция Ухань.

Изменение среднемесячной температуры в январе на станции Ухань имеет тенденцию к понижению от начала измерений (1907 г) до 50-х гг прошлого столетия, которая сменяется тенденцией к росту до середины 80-гг, затем снова тенденция к понижению температуры приблизительно до 2010 г, и в последние 10-15 лет наблюдается рост температуры. Аналогичные изменения температуры прослеживаются на остальных выбранных станциях провинции. Поэтому характер изменения климатологических характеристик на остальных станциях можно распространить на период до 1907 г.

Изменение среднемесячной температуры в июле на станции Ухань имеет тенденцию к росту от начала измерений до 30-х гг прошлого столетия, которая сменяется тенденцией к понижению температуры до середины 80-гг, затем снова рост температуры приблизительно до 2010 г, и в последние 10-15 лет – понижение температуры. Аналогичные изменения температуры прослеживаются на остальных выбранных станциях провинции.

В таблице 3.13 приведены средние значения температур января и июля и их СКО по выбранным станциям за тридцатилетние периоды 1959-1988 гг и 1994-2023 гг. С середины прошлого века наблюдается тенденция к росту температуры в январе и июле. Повышение среднемесячной температуры составляет 0,2÷0,4°С, причем зимой (в январе) повышение температуры больше, чем летом (в июле). Исключение составляют две станции Гуанхуа и Фансян,

которые расположены на высотах 91 и 435 м соответственно, и имеют даже некоторое понижение среднемесячной температуры в июле. Если сравнивать со средними значениями начала прошлого века, то рост в июле по данным станции Ухань составляет всего 0,15℃, а в январе имеет даже отрицательное значение –0,05℃ – в пределах погрешности измерений.

Таблица 3.13 Основные параметры стационарных моделей температуры января и июля для станций провинции Хубэй

Название метеостанции	Месяц	1959-1988 гг		1993-2023 гг		$\Delta Y_{\text{ср}}(t)$, мм
		$Y_{\text{ср}}(t)$, мм	$\sigma(t)$, мм	$Y_{\text{ср}}(t)$, мм	$\sigma(t)$, мм	
Ухань	январь	3,83	1,26	4,22	1,45	0,39
	июль	29,08	1,12	29,47	1,18	0,39
Гуанхуа	январь	2,95	1,20	3,18	1,41	0,23
	июль	28,16	1,37	27,81	0,99	–0,35
Мачэн	январь	3,77	1, 02	4,18	1,45	0,41
	июль	28,73	1,04	28,89	1,15	0,16
Цзаоян	январь	2,91	1,13	3,29	1,63	0,38
	июль	28,10	1,23	28,30	1,27	0,20
Фансян	январь	2,69	1,18	2,67	1,27	–0,02
	июль	26,84	1,18	26,30	0,95	–0,54

Изменение годовых сумм осадков на станции Ухань имеет колебательный характер при общей тенденции к увеличению количества осадков. От начала измерений (1885 г) до 20-х гг прошлого столетия наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков, которая сменяется тенденцией к увеличению на протяжении 10-15 лет до конца 30-х гг, затем снова плавное уменьшение количества осадков до конца 70-х гг, затем резкий рост на протяжении 5 лет (начало 80-х гг) и плавное уменьшение количества осадков до конца 10-х гг. В настоящее время наблюдается увеличение количества осадков. Аналогичные

изменения сумм осадков прослеживаются на остальных выбранных станциях провинции.

Таблица 3.14 Основные параметры стационарных моделей годовых сумм осадков для станций провинции Хубэй

Название метеостанции	1959-1988 гг		1993-2023 гг		$\Delta Y_{\text{ср}}(t)$, мм
	$Y_{\text{ср}}(t)$, мм	$\sigma(t)$, мм	$Y_{\text{ср}}(t)$, мм	$\sigma(t)$, мм	
Ухань	1212,00	297,25	1230,79	242,80	18,79
Гуанхуа	831,12	187,54	797,4	238,39	–33,72
Мачэн	1164,23	361,20	1121.4	312.97	–42.83
Цзаоян	854,71	178,00	834.93	237.9	–19.78
Фансян	834,43	137,03	832.88	174.53	–1.55

В таблице 3.14 приведены средние значения годовых сумм осадков и их СКО по выбранным станциям за периоды 1959-1988 гг и 1994-2023 гг. Как показывает анализ, на всех станциях, за исключением станции Ухань, наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков за последние шестьдесят лет.

Заключение

В рамках данного исследования были проанализированы климатические изменения в провинции Хубэй с использованием данных с нескольких метеорологических станций. Изменения температуры и осадков были изучены через призму стационарных и нестационарных моделей.

Географическое расположение провинции Хубэй определяет принадлежность климата к тропическому типу. Географическое положение провинции Хубэй вблизи восточного побережья Азии, но все-таки на некотором удалении от побережья вглубь материка, обуславливает в целом муссонный характер климата с некоторыми чертами континентальности.

Расположение горных хребтов на территории провинции Хубей и в ее окрестностях обуславливает определенную защиту от проникновения фронтальных циклонов с запада и севера, и открытость данного региона для воздушных масс и тропических циклонов с востока и юга.

Сформирована база данных из результатов наблюдений 5 метеорологических станций провинции. Метеорологические станции равномерно распределены по территории провинции и имеют наибольший период наблюдений. Максимальный период наблюдений имеется на станции Ухань. На всех станциях самым холодным месяцем в году является январь, самым жарким июль. Дождливым является период, приходящийся на теплое время года: с апреля по сентябрь. Проведено оценивание однородности и стационарности временных рядов температуры и сумм осадков. Неоднородные экстремумы исключены из рассмотрения.

Для оценивания климатических изменений температуры и количества осадков для каждой станции были разработаны стационарные и простейшие нестационарные модели (линейная и ступенчатая модели). На основе оценивания качества моделей, разработанных для описания изменения температуры и количества осадков метеостанций провинции Хубэй, следует сделать вывод, что простейшие нестационарные модели не являются

эффективными и статистически значимыми. Характер изменения температуры и осадков имеет периодический характер различной продолжительности, что не может быть адекватно описано с помощью вышеупомянутых моделей. Поэтому целесообразно использование более сложных моделей, например, модели гармонических колебаний с несколькими гармониками.

По результатам оценивания климатических изменений сделан вывод, что за последние 60 лет температура летом и зимой имеет тенденцию к повышению. На большинстве станций температуры выросла на 0,2-0,4°C, что согласуется с оценками, полученными ранее другими исследователями. Однако на высотной станции Фансян (435 м) наблюдался тренд к понижению температуры.

Что касается изменения количества осадков, то на всех станциях, за исключением станции Ухань, наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков за последние шестьдесят лет.

Полученные результаты следует учитывать при планировании хозяйственной деятельности. Изменения температурных режимов и увеличение количества осадков требуют пересмотра методов ведения сельского хозяйства, особенно в отношении выбора культур и сроков их посадки и сбора урожая. Кроме того, увеличение осадков влияет на стратегии управления водными ресурсами, требуя улучшения инфраструктуры для предотвращения затоплений и оптимизации водосбора.

Необходимо разработать адаптационные меры, которые могли бы минимизировать отрицательное воздействие климатических изменений, такие как усиление дренажных систем и повышение устойчивости сельскохозяйственных систем к переменам климата.

Предложено продолжать мониторинг климатических условий для более точного прогнозирования изменений климата для обеспечения устойчивого развития провинции Хубэй.

Список использованной литературы

1. Обзор провинции Хубэй [Электронный ресурс]: Народное правительство провинции Хубэй: [сайт]. – Режим доступа: http://www.hubei.gov.cn/2015change/2015sq/sa/gk/201609/t20160930_902878.shtml

2. О геологическом строении провинции Хубэй [Электронный ресурс]: Геологическое бюро Хубэя: [сайт]. – Режим доступа: https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA5NjU3MDk0Mg==&mid=2652017085&idx=1&sn=06dc314f20d096f624ab0619e66149d8&chksm=8b482aecbc3fa3faf0fc82fcacc9e07a0c08c84503d14a047ae61f29e9defe35b8085c9d9924&scene=27

3. Обзор провинции Хубэй (2024) [Электронный ресурс]: Народное правительство провинции Хубэй: [сайт]. – Режим доступа: https://www.hubei.gov.cn/jmct/hbgk/202404/t20240416_5159972.shtml

4. Почвенные условия в провинции Хубэй [Электронный ресурс]: Народное правительство провинции Хубэй: [сайт]. – Режим доступа: https://wenku.baidu.com/view/9e96ed3f59cfa1c7aa00b52acfc789eb162d9e48?aggId=9e96ed3f59cfa1c7aa00b52acfc789eb162d9e48&fr=catalogMain_&_wkts_=1715078265673&bdQuery=%E6%B9%96%E5%8C%97%E7%9C%81%E7%9A%84%E5%9C%9F%E5%A3%A4%E5%92%8C%E5%9C%9F%E5%9C%B0%E8%A6%86%E7%9B%96%E7%89%B9%E5%BE%81

5. Климат провинции Хубэй [Электронный ресурс]: Народное правительство провинции Хубэй: [сайт]. – Режим доступа: http://www.hubei.gov.cn/hbgk/zrdl/201203/t20120328_342614.shtml

6. Бюллетень мониторинга изменения климата в провинции Хубэй [Электронный ресурс]: Метеорологическое бюро провинции Хубэй: [сайт]. – Режим доступа: http://hb.cma.gov.cn/qxfw/qhyxpj/202012/t20201230_2548306.html

7. Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Ч.1. – 2005. – 523 с.

8. Climate explorer [Электронный ресурс]: WMO KNMI: [сайт]. – Режим доступа:: http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone

9. Лобанов В.А., Лебедев А.Б. Практикум по климатологии [Электронный ресурс]: учебное пособие – СПб.: Изд-во «НИЦ АРТ», 2024. – 124 с. ISBN 978-5-00231-067-8 // RSHU – eLibrary: [сайт]. – Режим доступа: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_0538a13597d644f8a8002c76bafa19ed.pdf

10. Летопись погоды [Электронный ресурс]: Погода и климат: [сайт]. – Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru

11. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 1. Общая климатология: Книга 1. − СПб, РГГМУ, 2019. – 378 с.

12. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата: Книга 1. − СПб, РГГМУ, 2016. – 332 с.

13. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата: Книга 2. − СПб, РГГМУ, 2018. – 377 с.