



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 Гуандун»

Исполнитель Фань Фэньюй
(фамилия, имя, отчество)

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

Лебедев Андрей Борисович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
И.о. заведующей кафедрой

Дробжева Яна Викторовна
(подпись)

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

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«07» 08, 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

Введение.....	3
1 Физико-географическое описание провинции Гуандун.....	5
1.1 Особенности географического положения провинции Гуандун	5
1.2 Рельеф и геологическое строение провинции Гуандун.....	6
1.3 Гидрологические особенности провинции Гуандун.....	9
1.4 Особенности почв и растительного покрова провинции Гуандун	12
1.5 Синоптические особенности провинции Гуандун	14
1.6 Выводы по главе 1	17
2 Анализ многолетних рядов температуры и сумм осадков	18
2.1 Выбор пунктов наблюдений	18
2.2 Оценивание качества исходных данных.....	21
2.3 Оценивание однородности и стационарности данных температуры	26
2.4 Оценки однородности и стационарности данных сумм осадков.....	48
2.5 Выводы по главе 2	60
3 Моделирование климатических изменений температуры и количества осадков в провинции Гуандун	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 количества осадков	76
3.5 Выводы по главе 3	81
Заключение	83
Список использованной литературы.....	85

Введение

Принято считать, что деятельность человека привела к увеличению выбросов парниковых газов, что привело к изменениям в глобальном климате [1-3]. Быстрый рост населения Земли влечет за собой возрастающий спрос на ископаемое топливо, и, как следствие, выбросы парниковых газов. Вырубка лесов и уничтожение растительности, строительство домов и искусственных сооружений ведут к изменению в структуре суши, которое также оказывает влияние на климат. Увеличение числа людей приводит к увеличению количества мусора, что влияет на окружающую среду. После его уничтожения выделяются аэрозоли, неблагоприятные для климата [4-7].

Изменения климата может быть не только неблагоприятными. Увеличение количества осадков могут пойти на пользу климату в некоторых районах, поскольку он станет более влажным, что способствует росту растительности или замедлит явление опустынивания в некоторых районах.

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

Провинция Гуандун была первой, кто осуществила политику «реформ и открытости» Китая, и ее экономика быстро развивалась. Она отличается быстрыми темпами экономического развития и высоким уровнем сжигания ископаемого топлива. Поэтому объем парниковых газов, выделяемых в провинции, вызывает озабоченность в связи с возможными климатическими изменениями [1]. Очень важно получить тенденции изменения температуры и сумм осадков в провинции Гуандун за последние десятилетия, чтобы обеспечить основу и информационную поддержку для последующих исследований климата в провинции Гуандун.

Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ физико-географических особенностей провинции.
2. Сформировать базу временных рядов по интересующему району для анализа климатических изменений температуры и сумм осадков.
3. Оценить качество временных рядов на однородность и стационарность.
4. Выполнить статистическое пространственно-временное моделирование климатических изменений температуры и количества осадков.

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 Гуандун.

Во второй главе сформирована база данных температуры и сумм осадков метеорологических станций в провинции Гуандун. 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. На основе стационарных моделей получены пространственные модели температуры и количества осадков в провинции Гуандун.

1 Физико-географическое описание провинции Гуандун

1.1 Особенности географического положения провинции Гуандун

Провинция Гуандун (досл. кит. – «обширный восток») находится на юге Китая на побережье Южно-Китайского моря (рис. 1.1). Она граничит с провинциями Хунань, Цзянси, Фуцзянь – на севере, Гуанси – на западе, провинцией Хайнань и с двумя специальными административными районами Китая – Гонконгом и Макао, расположенных у эстуария реки Чжуцзян (см. рис. 1.2) – на юге. Административный центр провинции – город Гуанчжоу, расположен также у эстуария реки Чжуцзян.

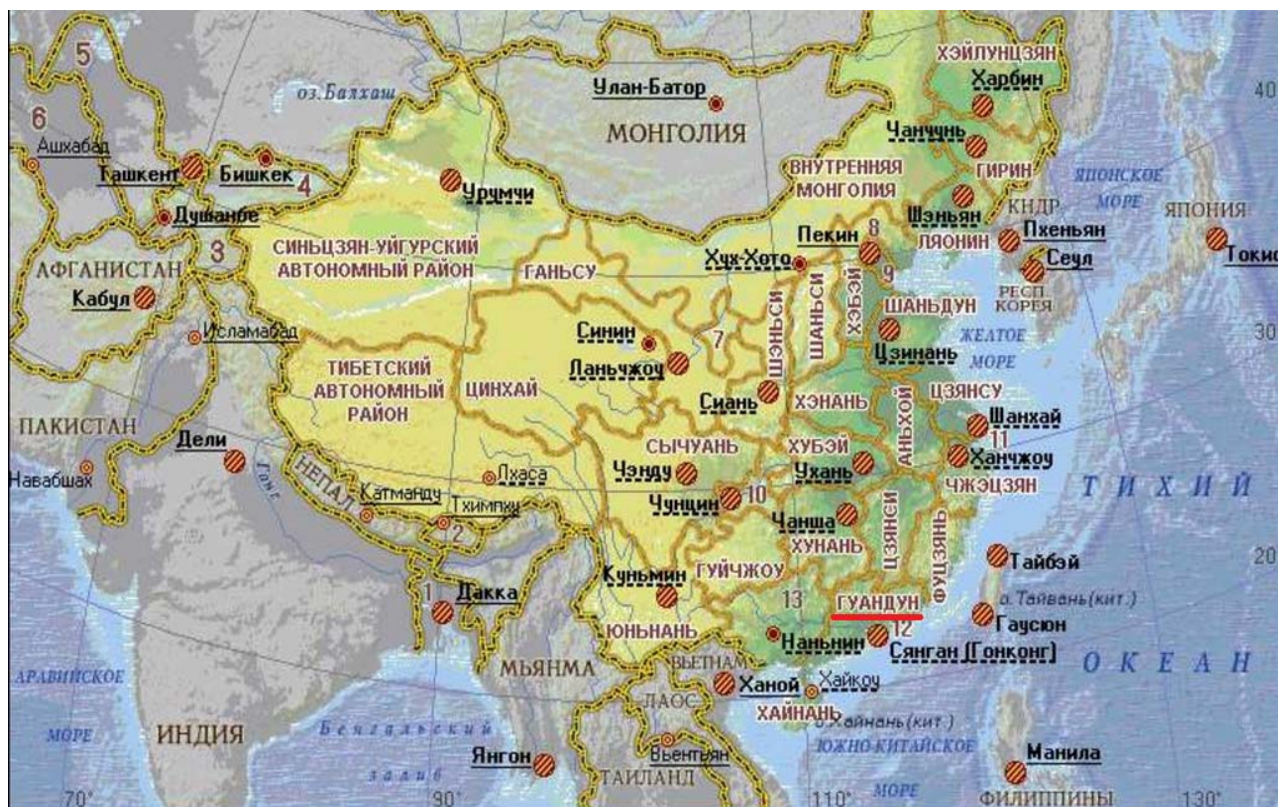


Рисунок 1.1 – Географическое положение провинции Гуандун

Провинция Гуандун расположена в низких широтах ($20^{\circ}13' \div 25^{\circ}31'$ с.ш.). Через территорию провинции проходит Северный тропик. С трех сторон провинция окружена материком, а на востоке вытянута вдоль побережья Южно-Китайского моря (протяженность побережья, не считая островов, составляет 3368 км). С запада на восток провинция простирается с $109^{\circ}39'$ в.д. до $117^{\circ}19'$ в.д. Поэтому следует предположить, что провинция Гуандун обладает чертами мусонного климата.

Разнообразие рельефа (наличие прибрежной зоны, равнин, террас, гор и холмов) делает климат в провинции более сложным и многообразным.

1.2 Рельеф и геологическое строение провинции Гуандун

Одними из ключевых климатообразующих факторов провинции Гуандун являются рельеф и геологическое строение, определяющие уникальные черты этого региона.

Геологическое строение Гуандуна является результатом длительного геологического эволюционного процесса [8]. Регион можно разделить на несколько геологических областей.

Северо-западные части провинции преимущественно состоят из палеозойских горных пород, таких как известняки и сланцы. Эти образования свидетельствуют о древних морских бассейнах, которые существовали здесь миллионы лет тому назад.

Центральные и южные части провинции представлены мезозойскими и кайнозойскими отложениями, включая разнообразные осадочные породы, такие как глины и песчаники.

Хребет Наньлин является естественной административной границей, разделяющей провинцию Гуандун от других провинций. Кроме того, хребет является водоразделом между крупными водными артериями Китая: реками Янцзы и Чжуцзян («Жемчужной реки»). Горные хребты Наньлин вытянуты преимущественно с юго-запада на северо-восток. Протяженность Наньлин превышает 1400 км. Средние высоты гор составляют около 1000 м. Некоторые горные пики имеют высоту более 1500 м: Мяоэршань (2142 м), Чжэньбаодин (2138 м, главный пик хребта Юэчэнлин), Цзюцайлин (2009 м – главный пик хребта Дупанлин), Матандин (1787 м, главный пик хребта Мэнчжулин), Цитяньлин (1510 м) и др. [9].

Уишаньский хребет расположен севернее провинции Гуандун, и также является естественной административной границей между провинциями Фуцзянь и Цзянси (рисунок 1.3). Хребет представляет собой горную гряду, вытянувшуюся с юго-запада на северо-восток. Средние высоты хребта составляют около 650 м. Наивысшая точка хребта – гора высотой 2158 м.



Рисунок 1.3 – Карта окружающего провинцию Гуандун рельефа

Горные хребты чередуются с долинами. Холмы распределены в предгорных областях и по своей форме не отличаются от гор. Плато в основном распределены в районе полуострова Лэйчжоубаньдао, городского округа

Хайлуфэн и западной части уезда Хуэйлай. Центральная и южная части Гуандуна характеризуются равнинами и низменными районами.

Как было сказано выше, горные хребты вытянуты преимущественно с юго-запада на северо-восток и оказывают существенное влияние на климат данной провинции. Во-первых, горы Наньлинь блокируют перемещение холодных воздушных масс с севера и северо-запада из северного Китая, Монголии и Сибири. Во-вторых, расположение относительно не высоких горных хребтов вдоль побережья, а также относительно низменная центральная часть провинции способствуют беспрепятственному проникновению влажных и теплых тропических воздушных масс и тропических циклонов с юга и юго-востока, выпадению осадков в предгорьях и в центральной части провинции.

1.3 Гидрологические особенности провинции Гуандун

Как было отмечено выше, провинция Гуандун находится на побережье Южно-Китайского моря, что обуславливает муссонный характер климата на его побережье и в прилегающих районах.

Рельеф дна Южно-Китайского моря имеет обширный шельф с глубинами до 200 м, который занимает более половины площади моря; особенно широкий в его северо-западной и юго-восточных частях. Следующий за ним материковый склон имеет крутой и ступенчатый характер, и понижается до глубин 3000–3600 м. В глубоководной котловине в северо-восточной части моря, глубины плавно понижаются с северо-запада на юго-восток, и во впадинах превышают отметку 5000 м.

Южно-Китайское море расположено в южной части активной зоны перехода от Тихого океана к материковой части Азии, с чем связаны частые подводные землетрясения и извержения подводных вулканов.

В Южно-Китайском море наблюдается такое явление, как морские приливы. Разница между большой водой прилива и малой водой отлива на побережьях полуострова Лэйчжоубаньдао составляет 4-6 м. Немного меньше эта разница в районе эстуария р. Чжуцзян.

Мелководный шельф хорошо прогревается, поэтому море имеет повышенную температуру поверхности воды, высокую испаряемость и, кроме того, большое содержание соли. Этому способствует также то обстоятельство, что земная кора под глубоководной котловиной имеет небольшую толщину (в центральной части вообще не более 500 м); вследствие чего наблюдается повышенный по сравнению с прилегающим шельфом поток тепла изнутри Земли.

В Гуандуне протекает более 640 рек, имеющих водный бассейн протяженностью более 100 км. Реки в провинции не замерзают круглый год, имеют длительный период половодья, являются достаточно полноводными. Основу речной сети провинции Гуандун составляют река Чжуцзян (или Жемчужная река, устар. – Кантонская река) с ее притоками Сицзян (Западная река), Дунцзян (Восточная река) и Бэйцзян (Северная река). Чжуцзян впадает в Южно-Китайское море. Свое название «Жемчужная река» получила из-за развитого на ее берегах промысла по добыче речного жемчуга. Кроме того, нельзя не сказать, что вода из рек провинции Гуандун, как и всего Китая, широко используется для орошения в сельском хозяйстве. Ирригационные системы, построенные на реке, занимают большие площади и представляют собой гидрологическую систему, которую следует учитывать при анализе климата данной провинции.

Большие колебания уровня воды в реке, в совокупности с морскими приливами, достигающими 15-20 м, часто приводят к катастрофическим наводнениям. Для их предотвращения на реке создана сеть мощных гидротехнических сооружений. Кроме того, следует отметить, что река Гуандун является одной из самых загрязненных рек Китая.



Рисунок 1.4 – Бассейн реки Чжуцзян

Гуандун – провинция со множеством озер. В данной провинции количество выпадающих осадков в течение года превышает испарение. Преобладающее большинство озер провинции являются проточными, т.е. получают воду из рек, и являются составной частью соответствующих водных систем. Кроме того, вода из озер вытекает, поэтому соли здесь не накапливаются. В некоторых районах сток из озер отсутствует, поэтому озера постепенно заболачиваются, например, озеро Кунцюэ (уезд Кайпин). В таких местах организуются парки водно-болотных угодий, которых на настоящий момент в провинции насчитывается порядка 30.

Таким образом, положение провинции Гуандун на побережье Южно-Китайского моря обуславливает наличие в провинции муссонного климата. Обилие рек и озер, заболоченных участков, а также районов с орошаемыми полями является причиной избытка влажности в провинции.

1.4 Особенности почв и растительного покрова провинции Гуандун

Различные физико-географические условия от низменностей до горных районов, обильное увлажнение, а также, умеренные и высокие температуры стало причиной разнообразных как почв, так и форм растительности (свыше 5 тысяч видов) в провинции Гуандун.

В провинции Гуандун обширные площади заняты красноземами и желтоземами. Данные виды почв являются для влажных субтропиков наиболее характерными видами почв. Как известно, почвы формируются на основе первоначальной литогенной породы в условиях медленно изменяющихся климата и рельефа под воздействием живых организмов. От материнской породы почвы наследуют, в первую очередь, минералогический и химический состав, которые имеют определенный цвет. Первоначально в материнской породе провинции содержится большое количество железа и алюминия. Рельеф распределяет поступающие тепло и влагу по поверхности. Так, в низинах скапливается больше влаги. Наличие тепла увеличивает скорость химических реакций. Органические вещества, попадающие в почву благодаря деятельности живых организмов, дают черные и серые цвета. В условиях теплого и влажного климата, бактерии практически полностью разлагают огромное количество растительного опада. В условиях, когда много влаги проникает глубоко в почву, хорошо растворимые вещества вымываются вниз, а нерастворимые гидроксиды железа и алюминия остаются. Гидроксиды железа образуют минералы гётит и гематит охристо-ржавого и красного цветов, а гидроксиды алюминия – гидраргиллит и бёмит желтого цвета. Красноземы имеют преимущественно тяжелосуглинистый или глинистый механический состав, хорошо выраженную водопрочную структуру, высокую водопроницаемость, большую влагоемкость и пористость. Накопление гумуса в данных видах почв не наблюдается.

При использовании красноземов в земледелии в них уменьшается содержание гумусовых веществ, снижается кислотность, ухудшаются водно-физические свойства. Для повышения урожайности вносят органические и минеральные удобрения. В связи с повышенным содержанием полуторных оксидов в красноземах, которые связывают фосфорную кислоту, фосфорные удобрения вносятся в повышенных дозах. Поэтому поливное земледелие в течение трех тысяч лет, привели к качественным изменениям природных почвенных покровов и их трансформации в не встречающиеся в природе культурные формы: лессовые, светлолуговые и рисовые почвы.

Кроме того, рассматривая почвы, следует отметить, что почвы провинции имеют высокое содержание естественных радиоактивных элементов [8]. Гамма-спектрометрический анализ почвы в данной провинции показал, что она характеризуется ториевой природой радиоактивности (Th – 190 Бк/ кг; U (по Ra) – 120 Бк/ кг; K 40 – 150 Бк/ кг) [8]. Повышенное содержание радиоактивных элементов в почвах и в почвообразующих породах влечет за собой высокие концентрации радона, и соответственно, радиоэкологические проблемы.

Первоначально широколиственные вечнозеленые леса с примесью хвойных и лиственных пород преобладали над большей частью провинции, за исключением, южного побережья, где произрастал тропический муссонный тип растительности. Впоследствии, значительная часть естественного растительного покрова была уничтожена пожарами и хозяйственной деятельностью человека (в частности, использованием в виде топлива). Гуандун является одной из самых густонаселенных провинций Китая, и многие территории возделываются и используются для нужд сельского хозяйства. Эти обстоятельства привели к тому, что естественная растительность сохранилась лишь в труднодоступных горных районах и в отдельных местах, где имеет вид вторичных лесов из лиственных пород и хвощевой сосны. С 1949 года реализуются программы восстановления лесных массивов. На холмах произрастают, как правило, травы и папоротники (растительность саванн).

Бамбуковые рощи распространены в речных долинах. Определенные деревья, в частности камфорные, почитаются в Китае и частично сохранились.

Таким образом, следует отметить, что интенсивная хозяйственная деятельность в провинции Гуандун привела к коренным преобразованиям как почвенного, так и растительного покровов.

Наличие растительности препятствует процессу испарения с подстилающей поверхности и способствует повышенной влажности. Кроме того, растительность имеет не высокое альbedo, поглощает поступающее солнечное излучение.

Хозяйственная деятельность человека привела к замене широколиственных вечнозеленых лесов на сельскохозяйственные поля, что привело к уменьшению альbedo региона и к повышению испаряемости.

1.5 Синоптические особенности провинции Гуандун

Провинция Гуандун расположена в субтропической муссонной зоне. Для данного климата характерны обилие тепла и осадков.

Циркуляция атмосферы в провинции Гуандун носит ярко выраженный муссонный характер. Муссонами называются устойчивые сезонные переносы воздуха вблизи подстилающей поверхности и в нижней тропосфере. Они характеризуются резкими изменениями направления от зимы к лету и от лета к зиме над обширными районами Земли. В каждом из сезонов одно направление ветра заметно преобладает над другими, а при смене сезона меняется на 120-180°. Муссоны вызывают резкую смену погодных условий.

Зима в провинции Гуандун не продолжительная, мягкая и относительно сухая. Морозы могут наблюдаться несколько дней каждую зиму. Лето продолжительное, жаркое и очень влажное. Среднегодовая температура в

провинции составляет $19\div 24^{\circ}\text{C}$, средняя температура января – $16\div 19^{\circ}\text{C}$, а средняя температура июля – $28\div 29^{\circ}\text{C}$. Период дождей длится с апреля по октябрь. Среднегодовое количество осадков составляет от 1300 до 2500 мм, а среднее значение по провинции – 1777 мм [9].

Летом над Азией из-за сильного прогрева континента формируется сезонный центр действия атмосферы – азиатская депрессия (рис. 1.5). Провинция Гуандун находится в ее юго-восточной части, что обуславливает муссонные ветры юго-восточных направлений. Данное направление ветра благоприятно для перемещения тропических циклонов с Тихого океана во второй половине лета – первой половине осени.

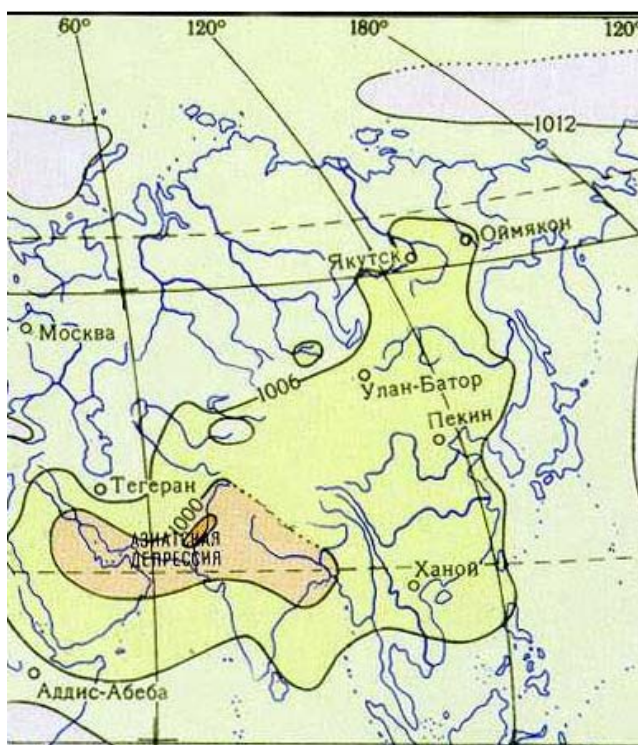


Рисунок 1.5 – Расположение центров действия атмосферы в Азиатско-Тихоокеанском регионе летом.

Осенью происходит существенная перестройка термобарических полей. Азиатская депрессия постепенно заполняется, а на этом месте формируется зимний сезонный центр действия атмосферы – Азиатский антициклон (или максимум, см. рис. 1.6). Направление преобладающих ветров меняются на северо-западные.

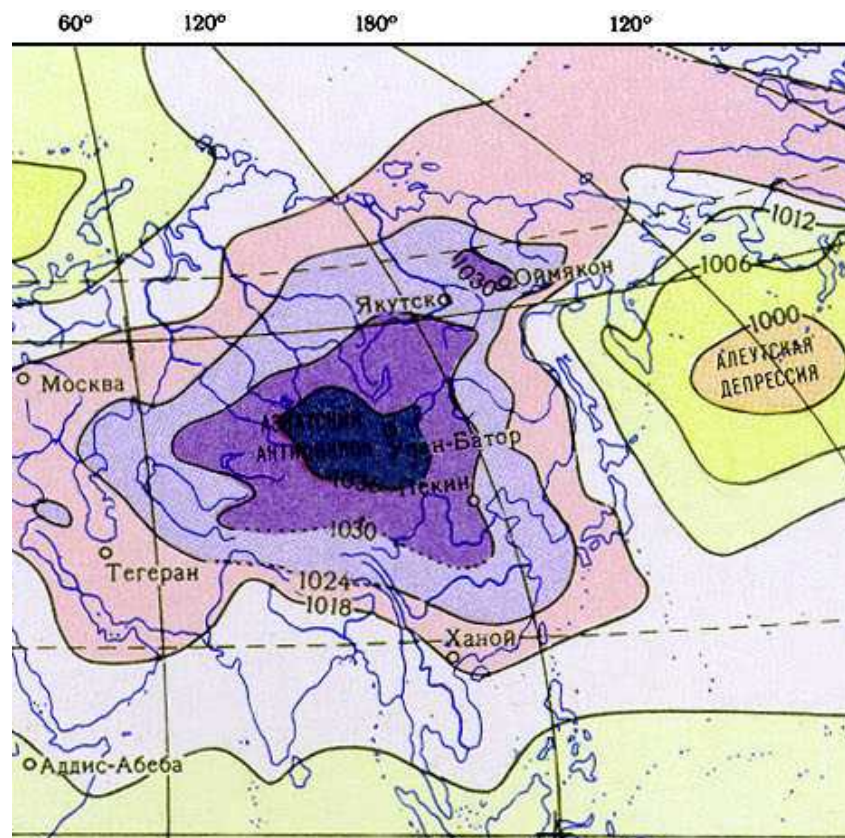


Рисунок 1.6 – Расположение центров действия атмосферы в Азиатско-Тихоокеанском регионе зимой.

Зимой над Азией воздух продолжает выхолаживаться, Азиатский антициклон усиливается. В нем в нижней тропосфере происходит выхолаживание воздуха, формируется воздух с очень низкими температурами. Однако хребет Наньлин препятствует проникновению более плотного холодного воздуха в провинцию.

При переходе к весне Азиатский антициклон интенсивно разрушается. Южно-Азиатская депрессия формируется на юге Азии и постепенно смещается на север. Над провинцией Гуандун направления ветра изменяется на юго-восточные.

Таким образом, анализ, выполненный в п. 1.5, позволил сделать вывод, что муссонная циркуляция является определяющей в провинции Гуандун.

1.6 Выводы по главе 1

При анализе физико-географических условий провинции Гуандун сделаны следующие выводы, важные с точки зрения формирования климата:

Расположение провинции определяет принадлежность климата к тропическому типу. Географическое положение провинции Гуандун на побережье Южно-Китайского моря обуславливает муссонный характер климата.

Ориентация горного хребта Наньлин на территории провинции Гуандун с юго-запада на северо-восток обеспечивает некоторую защиту от проникновения холодного воздуха с запада и севера, и открытость для воздушных масс и тропических циклонов с востока и юга.

Близость Южно-Китайского моря, наличие одной из полноводных рек Китая – Чжуцзян, а также многочисленных рек, озер и болот, преобладание выпавших осадков над испарением обуславливает наличие большого количества влаги в провинции.

При изучении влияния климатообразующих факторов на климат провинции следует учитывать влияние антропогенного фактора. Провинция Гуандун является самой многочисленной провинцией Китая с развитой промышленностью и сельским хозяйством. Почти три тысячелетия орошаемого земледелия привели к коренному изменению видового состава растительности и качества почв. Территории, которые изначально были заняты вечнозелеными тропическими лесами, в настоящее время находятся в сельскохозяйственном использовании. Кроме того, особенности почв тропических регионов приводят к необходимости при использовании ее для земледелия вносить большое количество удобрений, что привело к ее качественному изменению.

2 Анализ многолетних рядов температуры и сумм осадков

2.1 Выбор пунктов наблюдений

Для моделирования климатических изменений температуры и количества осадков использованы данные с метеорологических станций, расположенные в провинции Гуандун [11, 12]. Очевидно, что метеорологические станции следовало выбрать таким образом, чтобы они, по возможности, равномерно были распределены по территории провинции. В нашем случае расположение станций для анализа выбиралось исходя из географии провинции и продолжительности периода наблюдений.

Форма провинции Гуандун представляет собой треугольник, самая длинная сторона которого протянулась вдоль побережья Южно-Китайского моря. Естественными границами провинции, как было отмечено выше, являются горные хребты на северо-востоке и северо-западе провинции. В центре провинции расположена низменность. Поэтому было решено выбрать несколько станций на побережье Южно-Китайского моря и в центре провинции, которая расположена в низменности. В горных районах станции не анализировались, так как данные с этих станций не являются репрезентативными (показательными для крупных районов), а отражают только особенности конкретной местности, где эти станции расположены.

На выбор станций повлияла продолжительность периода наблюдений на них. Как показал анализ данных наблюдений, размещенных на сайтах [11, 12], большинство станций имеют период наблюдений с начала прошлого века, некоторые станции – со Всемирного геофизического года (1953 г). На сайте [11] период наблюдений на большинстве станций обрывается в 1990 г. Кроме того, в наблюдениях на всех станциях существует пропуск в период второй

мировой войны с 1943 по 1950 гг. Пропуски в наблюдениях дополнялись данными с сайта «Погода и климат» [12]. Восстановление с помощью регрессионных уравнений по методике, описанной в [13], не применялось из-за отсутствия близкорасположенных станций-аналогов.

Кроме того, отмечена следующая интересная особенность: продолжительность наблюдений за осадками на станциях, как правило, превышает продолжительность наблюдений за температурой.

Исходя из вышесказанного, для анализа было выбрано 5 станций, три из которых расположены на побережье Южно-Китайского моря, а две – в низменной части провинции. Расположение наблюдательных станций показано на рис. 2.1, а названия, координаты и доступные периоды наблюдений – в табл. 2.1.

На побережье выбраны станции (с северо-востока на юго-запад) Шаньтоу, Шаньвэй, Янцзан (суммы осадков), Чжаныцзян (температура).



Рисунок 2.1 – Расположение пунктов наблюдения в провинции Гуандун

Названия и координаты станций в провинции Хубэй

Индекс	Наименование	Продолжительность наблюдений (температура/осадки)	Кол-во лет	Широта, град	Долгота, град
59287	Гуанчжоу	1912-1942, 1947-2023 / 1908-1942, 1947-2023	104 / 107	23,13	113,25
59316	Шаньтоу	1924-1942, 1951-2023 / 1880-1942, 1951-2023	91 / 139	23,40	116,68
59501	Шаньвэй	1953-2023 / 1953-2012, 2018-2023	71 / 66	22,77	115,37
59663	Янцзян	–, / 1951-2023	– /68	21,87	111,96
59658	Чжаныцзян	1920-1940, 1951-2023 / –	93 / –	21,22	110,40
59082	Шаогуань	1946-2023 / 1919-1937, 1951-2023	78 /	24,80	113,58

На юге побережья не удалось найти продолжительный ряд наблюдений после 1990 г по осадкам, поэтому анализ изменения температуры был выполнен для станции Чжаныцзян, а для суммы осадков – для станции Янцзян, которая расположена несколько севернее.

В низменной части провинции для анализа был выбран административный центр провинции Ухань, который расположен в ее центре, и станция Шаогуань, расположенная на севере провинции в долине между двух хребтов.

2.2 Оценивание качества исходных данных

Для статистического моделирования климатических изменений следует оценить качество исходной информации, которая в дальнейшем будет использоваться для расчета климатических характеристик.

Первоначально перед климатической обработкой выполняется оценивание однородности многолетних рядов наблюдений [14]. Под статистической однородностью временных рядов понимается принадлежность всех элементов ряда метеорологических наблюдений и его выборочных статистических параметров (среднего арифметического и дисперсии) к одной генеральной совокупности.

Выделяют два вида однородности [14]:

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

Методика оценивания однородности климатологических рядов включает в себя три этапа [14]:

- проверка однородности эмпирического распределения на экстремумы;
- проверка стационарности дисперсий;
- проверка стационарности средних значений.

Первоначально результаты наблюдений представляются в графическом виде и изучаются методом визуального анализа. При использовании визуального анализа возможно выявить резко выраженные экстремумы, а также ярко выраженную нестационарность климатических рядов. С помощью визуального анализа выявляются пропуски в наблюдениях.

Как было отмечено выше, 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 рассчитываются по формулам:

1) для максимального члена Y_n ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ [13]:

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

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

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

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

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

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

2) для минимального члена Y_1 ранжированной в возрастающем порядке выборки $\{Y_n\}$ [13]:

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

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

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

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

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

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

Критерии однородности Смирнова-Граббса позволяют оценить однородность одного экстремума и является параметрическим, т.к. для его

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 [13]:

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

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

Статистика критерия Смирнова-Граббса для минимального члена Y_1 рассчитывается по формуле [13]:

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

Для оценивания однородности расчетные значения статистик критериев Диксона и Смирнова-Граббса сравниваются с их критическими табличными значениями [13], полученными методом статистических испытаний [16], 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 $\alpha \geq 5 \%$.

Статистические критерии Диксона и Смирнова-Граббса первоначально были разработаны для выборок, которые соответствуют нормальному закону распределения. Особенностью выборок гидрометеорологических данных состоит в том, что их эмпирические распределения часто не являются симметричными. К тому же, их временный ряд не является случайной выборкой из-за циклических колебаний различной периодичности. Критические табличные значения подкорректированы с учетом 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. 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 ($Y_{срj}$, $j = 1, 2$) и дисперсий (σ_j , $j = 1, 2$), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера [13]:

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

где σ_j^2 , σ_{j+1}^2 – соответственно дисперсии двух подвыборок объемом n_1 и n_2 .

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

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

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 [15]:

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

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

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

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

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле [13]:

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

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:

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

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

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 Оценивание однородности и стационарности данных температуры

График внутригодовых изменений температуры на станции Гуанчжоу представлен на рис. 2.2. Из анализа графика следует, что самым прохладным месяцем на станции является январь, а самым жарким – июль.

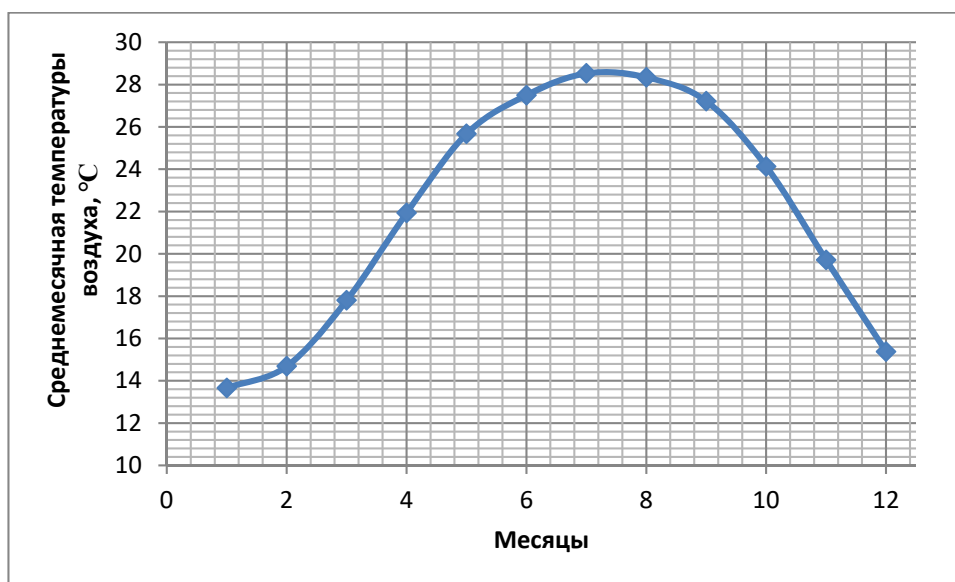


Рисунок 2.2 – График внутригодовых изменений температуры в Гуанчжоу.

Многолетние графики температуры данных месяцев представлены на рис. 2.3.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры января в Гуанчжоу (рис. 2.3 (а), показал, что в 1950 г. имеется резко выраженный максимум (17,2°C), который на 1,2°C превышает следующий максимум, наблюдавшийся в 1954 г (16,0°C). Кроме того, имеется резко выраженный минимум в 1930 г (8,0°C), который на 1,5°C меньше следующего минимума, наблюдавшийся в 2011 г (9,5°C).

По формулам (2.1)-(2.12) произведены расчеты статистик Диксона и Смирнова-Граббса, которые вместе с оценками однородности приведены в табл. 2.2. Из анализа данных табл. 2.2 следует сделать вывод: временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Гуанчжоу по максимальным значениям является однородным. При проверке однородности по минимальным

значениям по всем критериям расчетные статистики оказываются больше табличных критических 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.

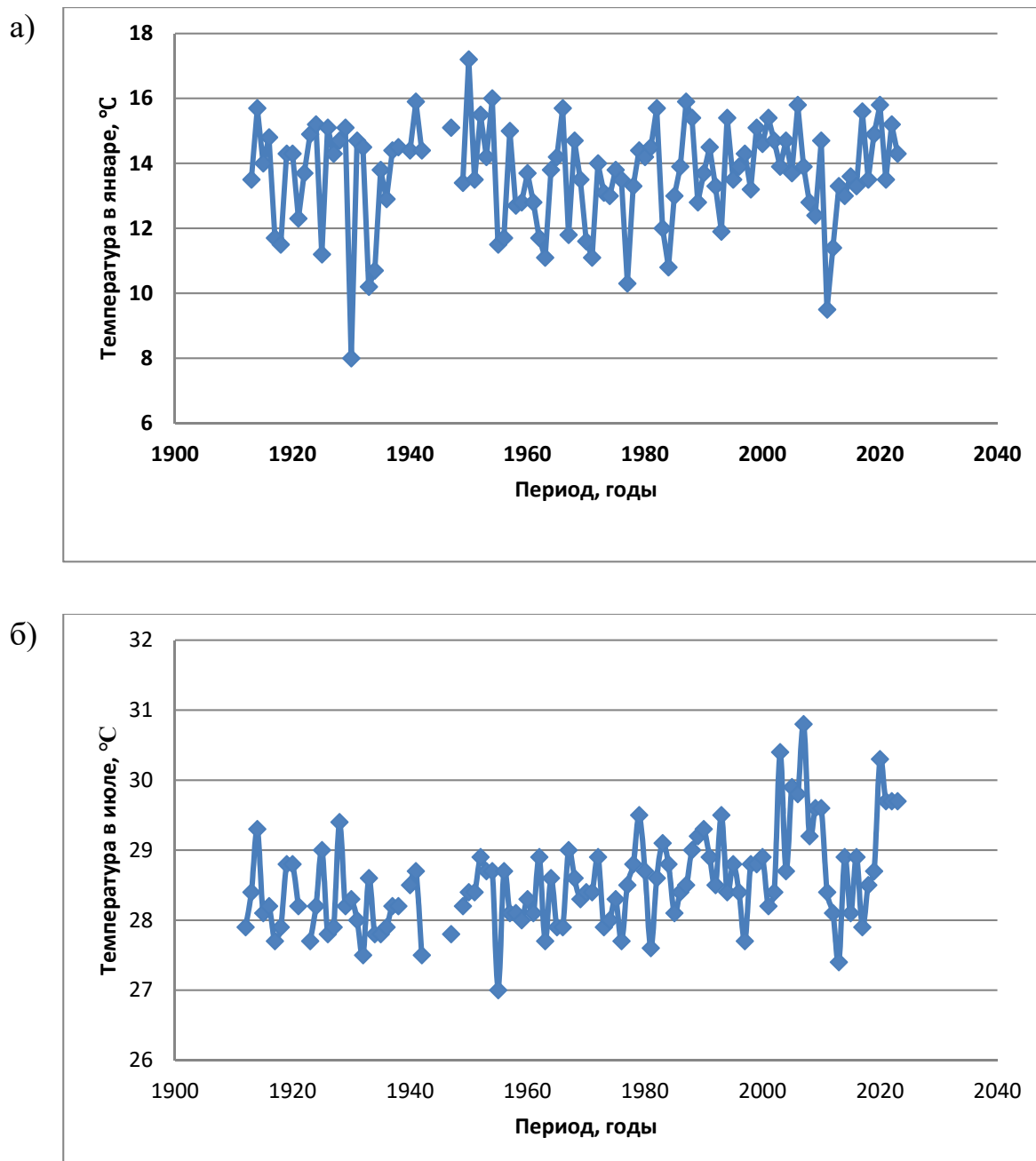


Рисунок 2.3 – Многолетние графики изменения среднемесячной температуры на станции Гуанчжоу: а – в январе, б – в июле.

Таблица 2.2

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Гуанчжоу

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,130435	0,155844	0,168831	0,185714	0,141304	2,23667
Критерий	0,277014	0,290118	0,346651	0,355895	0,342637	4,263951
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	0,163043	0,187500	0,275000	0,278481	0,23913	3,585543
Критерий	0,072216	0,085322	0,109459	0,111503	0,099459	2,099359
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден
Оценки однородности по минимальным значениям после исключения неоднородного минимума						
Статистика	0,090909	0,107692	0,123077	0,125000	0,103896	2,841071
Критерий	0,092810	0,109081	0,14047	0,146586	0,130470	2,369665
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры июля в Гуанчжоу (рис. 2.3 (б)), показал, что резко выраженные максимумы во

временном ряду отсутствуют. Максимальное значение зарегистрировано в 2007 г ($30,8^{\circ}\text{C}$), которое незначительно на $0,4^{\circ}\text{C}$ отличается от следующего максимума в 2003 г ($30,4^{\circ}\text{C}$). Минимальное значение наблюдалось в 1955 г ($27,0^{\circ}\text{C}$), которое также на $0,4^{\circ}\text{C}$ отличалось от следующего минимума ($27,4^{\circ}\text{C}$). Оценки однородности среднемесячных температур июля приведены в табл. 2.3.

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

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,105263	0,117647	0,147059	0,151515	0,131579	3,341432
Критерий	0,258427	0,272920	0,327396	0,334359	0,322294	4,13539
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	0,105263	0,117647	0,147059	0,151515	0,131579	2,262735
Критерий	0,076489	0,087947	0,115961	0,116542	0,105961	2,167757
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден
Оценки однородности по минимальным значениям после исключения неоднородного минимума						
Статистика	0,029412	0,033333	0,033333	0,034483	0,029412	1,729954
Критерий	0,068404	0,079028	0,103440	0,103067	0,09344	2,054479
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных табл. 2.3 следует, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Гуанчжоу по максимумам является однородным. 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.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Гуанчжоу был разбит на две неравные подвыборки: с 1911 по 1942 гг. и с 1947 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Период пропуска в ряду наблюдений совпадает с периодом второй мировой войны. Можно предположить, что, в это время метеостанция была разрушена и перенесена в другое место.

Таблица 2.4

Оценки стационарности эмпирического распределения температуры
для станции Гуанчжоу

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,049326	1,740840	стационарен
Стьюдент	0,371972	2,201796	стационарен
Июль			
Фишер	1,876367	1,938568	стационарен
Стьюдент	3,214415	2,856384	не стационарен

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

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе на станции Гуанчжоу меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего. Для июля расчетное значение статистики Фишера меньше критического, что говорит о стационарности временного ряда по дисперсии, но расчетное значение статистики Стьюдента больше критического, что говорит о нестационарности временного ряда по среднему. Визуальный анализ временного ряда, представленного на рис. 2.3 (б) показывает, что после 1946 г среднее несколько увеличилось, кроме того, после 1980 г. наблюдается рост значений температуры, что может быть обусловлено изменением климата.

График внутригодовых изменений температуры на станции Шаньтоу представлен на рис. 2.4. Как следует из анализа данного графика, самым прохладным месяцем на станции является январь, самым жарким – июль.

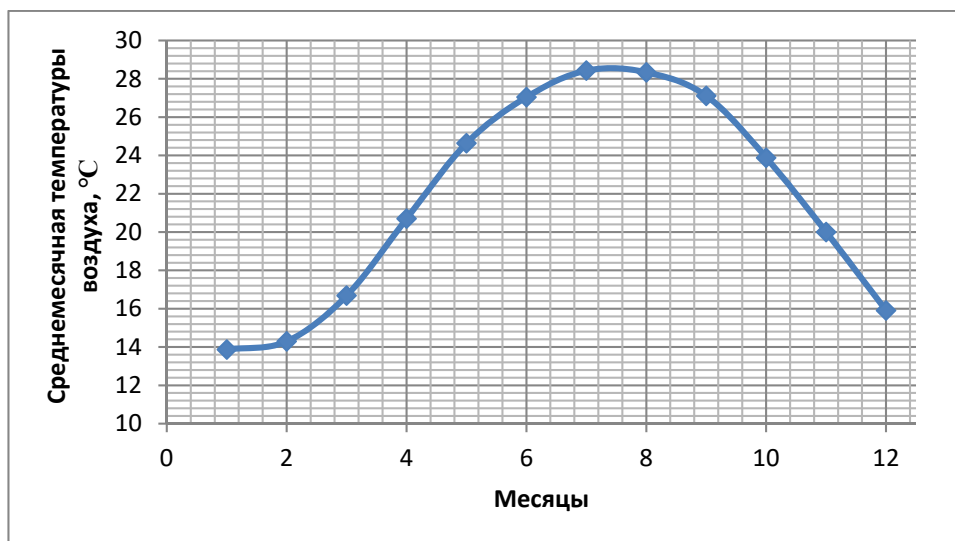
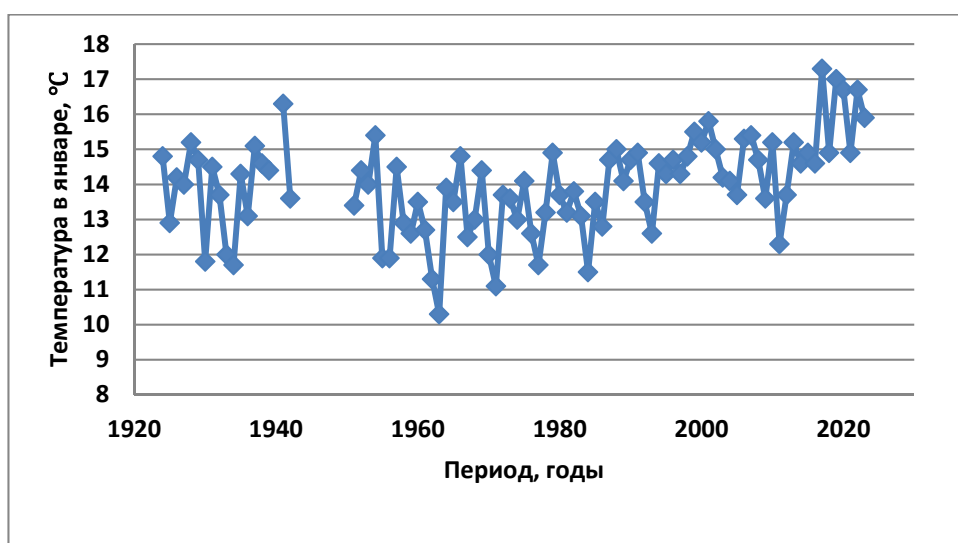


Рисунок 2.4 – График внутригодовых изменений температуры в Шаньтоу.

Многолетние графики температуры данных месяцев представлены на рис. 2.5.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры января в Шаньтоу (рис. 2.5 (а), показал, что максимальное значение наблюдалось в 2017 г. ($17,3^{\circ}\text{C}$), однако данный максимум не является резко выраженным, т.к. всего на $0,3^{\circ}\text{C}$ превышает следующий максимум, наблюдавшийся в 2019 г ($17,0^{\circ}\text{C}$). Кроме того, имеется резко выраженный минимум в 1963 г ($10,3^{\circ}\text{C}$), который на $0,8^{\circ}\text{C}$ меньше следующего минимума, наблюдавшегося в 1971 г ($11,1^{\circ}\text{C}$).

а)



б)

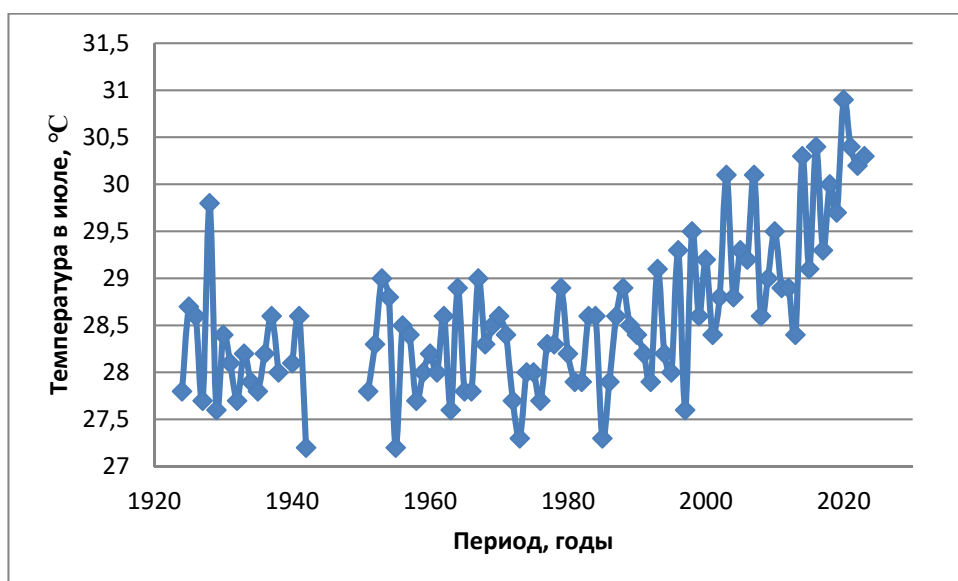


Рисунок 2.5 – Многолетние графики изменения среднемесячной температуры на станции Шаньтоу: а – в январе, б – в июле.

В табл. 2.5 представлены оценки однородности среднемесячной температуры в январе на станции Шаньтоу. Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд является однородным.

Таблица 2.5

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Шаньтоу

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,042857	0,048387	0,096774	0,100000	0,085714	2,444632
Критерий	0,199608	0,215349	0,258027	0,268027	0,254337	3,343842
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	0,114286	0,119403	0,149254	0,15625	0,142857	2,70494
Критерий	0,139284	0,149592	0,191646	0,198996	0,180853	2,869811
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры июля в Шаньтоу (рис. 2.5 (б)), показал, что максимальное значение наблюдалось в 2020 г. (30,9°C), однако данный максимум не является резко выраженным, т.к. всего на 0,5°C превышает следующий максимум, который наблюдался в 2014 и в 2021 гг (30,4°C). Резко выраженные минимумы во временном ряду на рис. 2.5 (б) отсутствуют. Оценки однородности среднемесячных температур июля приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на станции Шаньтоу

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,135135	0,135135	0,135135	0,138889	0,135135	2,887745
Критерий	0,270014	0,284357	0,344198	0,347692	0,3386	4,074435
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	0,0	0,0	0,03125	0,03125	0,027027	1,692112
Критерий	0,080907	0,091500	0,119236	0,12158	0,109236	2,135792
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

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

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений временной ряд среднемесячной температуры на станции Шаньтоу был разбит на две неравные подвыборки: с 1924 по 1942 гг. и с 1951 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Оценки стационарности представлены в табл. 2.7.

Проверка стационарности по дисперсии и среднему временного ряда температуры в Шантоу показывает, что ряд является стационарным, за исключением ряда июля, который оказался не стационарен по среднему.

Таблица 2.7

Оценки стационарности эмпирического распределения температуры
для станции Шаньтоу

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,256430	1,960121	стационарен
Стьюдент	0,130451	2,085510	стационарен
Июль			
Фишер	2,072435	2,152607	стационарен
Стьюдент	2,387372	2,860128	не стационарен

График внутригодовых изменений температуры на станции Шаньвэй представлен на рис. 2.6. Как следует из анализа данного графика, самым прохладным месяцем на станции является январь, самым жарким – июль.

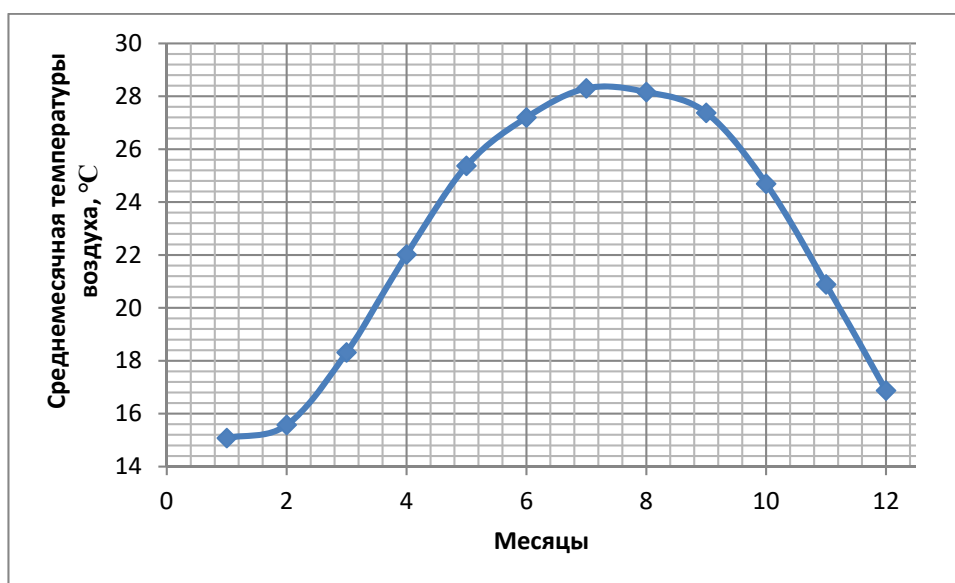
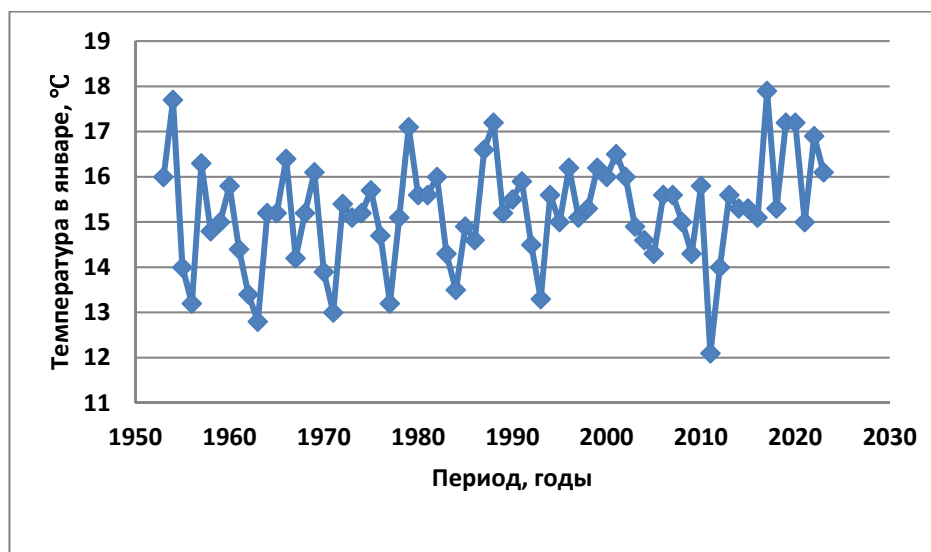


Рисунок 2.6 – График внутригодовых изменений температуры в Шаньвэй.

Многолетние графики температуры этих месяцев представлены на рис. 2.7.

а)



б)

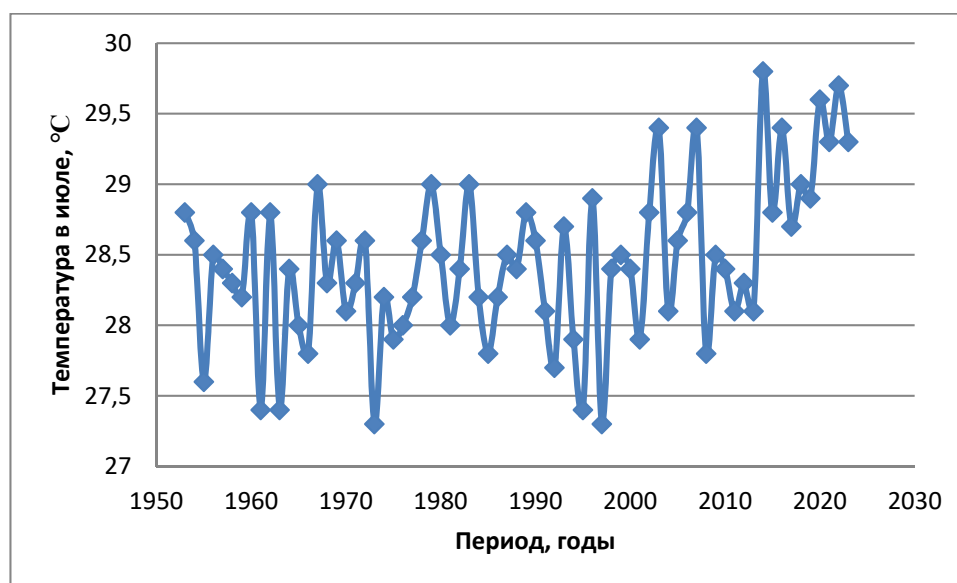


Рисунок 2.7 – Многолетние графики изменения среднемесячной температуры на станции Шаньвэй: а – в январе, б – в июле.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры января для станции Шаньвэй (рис. 2.7 (а), показал, что резко выраженные максимумы отсутствуют, однако имеется резко выраженный минимум в 2011 г

(12,1°C), который на 0,7°C меньше следующего минимума, наблюдавшийся в 1963 г (12,8°C).

Оценки однородности среднемесячных температур января приведены в табл. 2.8. Из ее анализа следует вывод, временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Шаньвэй является однородным.

Таблица 2.8

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Шаньвэй

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,034483	0,039216	0,137255	0,142857	0,12069	2,278990
Критерий	0,220695	0,242981	0,290661	0,300661	0,278980	3,321696
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	0,125000	0,160714	0,176471	0,155172	2,683929
Критерий	0,155198	0,1643576	0,207505	0,219261	0,197388	2,788780
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры июля на станции Шаньвэй (рис. 2.7 (б), показал, что резко выраженные максимумы и минимумы во временном ряду отсутствуют. Оценки однородности среднемесячных температур июля приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в июле на станции Шаньвэй

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,040000	0,040000	0,080000	0,083333	0,080000	2,384176
Критерий	0,214763	0,236631	0,284597	0,294597	0,270766	3,261296
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	0,0	0,0	0,041667	0,043478	0,04	2,010333
Критерий	0,163792	0,171185	0,215894	0,229791	0,205729	2,871981
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Из анализа данных табл. 2.9 следует вывод: временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Шаньвэй является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений временной ряд среднемесячной температуры на станции Шаньвэй был разбит на две неравные подвыборки: с 1953 по 1990 гг. и с 1991 по 2023 гг. За момент нарушения стационарности ряда выбран год прекращения публикации на сайте [11] среднемесячных значений температуры. Оценки стационарности представлены в табл. 2.10.

Оценки стационарности эмпирического распределения температуры
для станции Шаньвэй

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,09498	1,85685	стационарен
Стьюдент	1,18637	2,08971	стационарен
Июль			
Фишер	2,26350	1,83169	не стационарен
Стьюдент	2,28443	2,08971	не стационарен

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе на станции Шаньвэй меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего. Для июля расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента больше критических, что говорит о нестационарности временного ряда по дисперсии и по среднему. Визуальный анализ временного ряда, представленного на рис. 2.7 (б) показывает, что после 1990 г наблюдается рост средних значений температуры, что может быть обусловлено изменением климата.

График внутригодовых изменений температуры на станции Чжаньцзян представлен на рис. 2.8. Как следует из анализа данного графика, самым прохладным месяцем на станции является январь, самым жарким – июль.

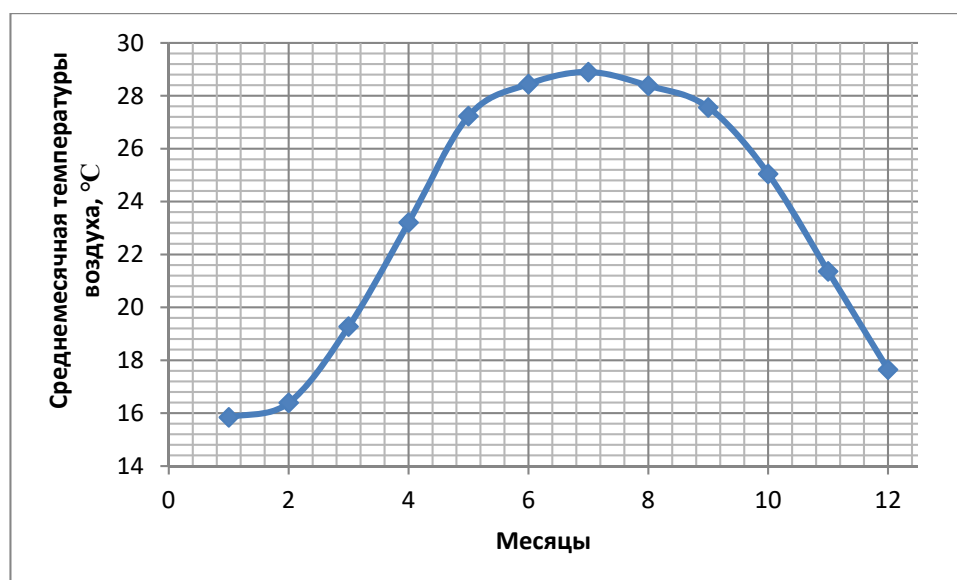


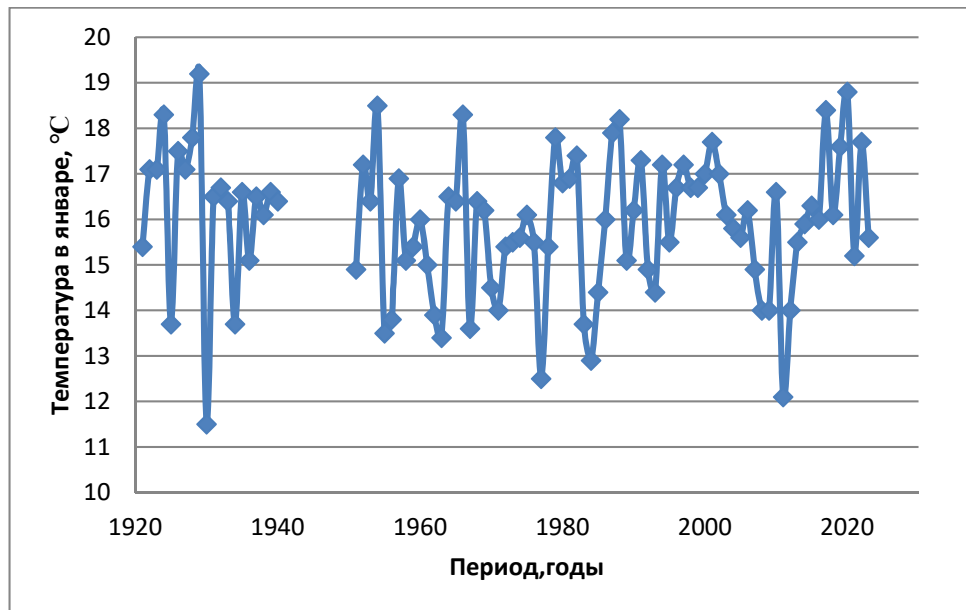
Рисунок 2.8 – График внутригодовых изменений температуры на станции Чжаныцзян.

Многолетние графики температуры этих месяцев представлены на рис. 2.9.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры января в Чжаныцзян (рис. 2.9 (а), показал, что в 1929 г. имеется максимум (19,2°C), который на 0,4°C превышает следующий максимум, наблюдавшийся в 2020 г (18,8°C). Кроме того, имеется минимум в 1930 г (11,5°C), который на 0,4°C меньше следующего минимума, наблюдавшийся в 2011 г (12,1°C).

Оценки однородности среднемесячных температур января приведены в табл. 2.11. Проверка однородности по критерию Смирнова-Граббса по минимальным значениям дает неоднородность, однако при проверке данного экстремума по критериям Диксона, расчетные статистики оказываются меньше табличных значений, из чего следует сделать вывод, что минимум является однородным по критерию Диксона. Таким образом, из анализа оценок однородности среднемесячных температур января принимается, что временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Чжаныцзян является однородным.

а)



б)

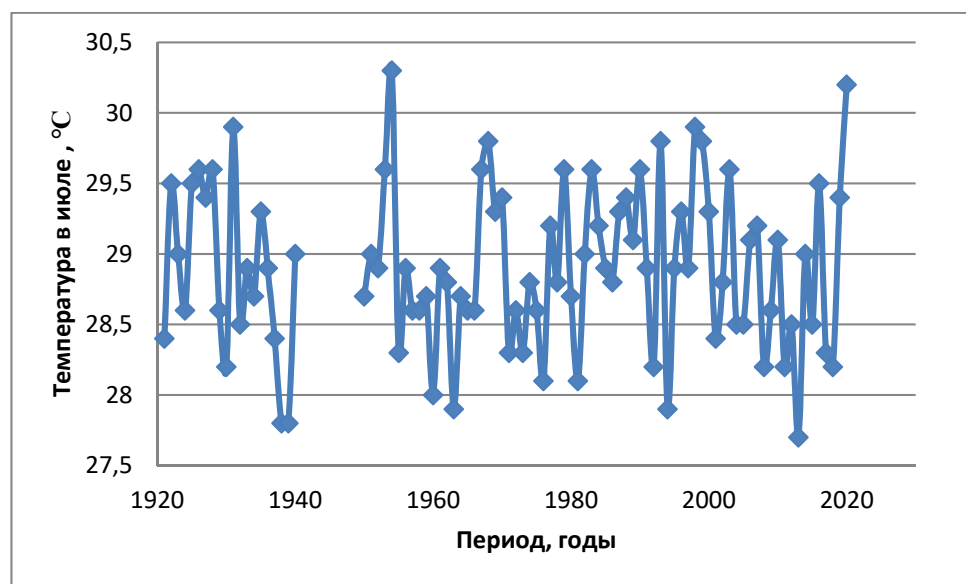


Рисунок 2.9 – Многолетние графики изменения среднемесячной температуры на станции Чжаныцзян: а – в январе, б – в июле.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры июля для станции Чжаныцзян (рис. 2.9 (б)), показал, что во временном ряду наблюдаются два резко выраженных максимума в 1953 г ($30,3^{\circ}\text{C}$) и в 2020 г ($30,3^{\circ}\text{C}$). Резко выраженные минимумы во временном ряду отсутствуют.

Таблица 2.11

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Чжаныцзян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,051948	0,056338	0,098592	0,104478	0,090909	2,108768
Критерий	0,238082	0,259232	0,30782	0,31782	0,299432	3,747111
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	0,077922	0,082192	0,136986	0,142857	0,12987	2,852102
Критерий	0,109462	0,126857	0,159997	0,168496	0,149496	2,476913
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	не однороден

Оценки однородности среднемесячных температур июля приведены в табл. 2.12. Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд среднемесячной температуры в июле на станции Чжаныцзян является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Чжаныцзян был разбит на две неравные подвыборки: с 1921 по 1940 гг. и с 1950 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Период пропуска в ряду наблюдений совпадает с периодом второй мировой войны и последующие годы. Оценки стационарности представлены в табл. 2.13.

Таблица 2.12 – Оценки однородности эмпирического распределения
среднемесячной температуры в июле на станции Чжаныцзян

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,038462	0,040000	0,160000	0,160000	0,153846	2,421549
Критерий	0,190612	0,204132	0,251121	0,261121	0,242557	3,268972
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	0,038462	0,040000	0,040000	0,045455	0,038462	2,106581
Критерий	0,152823	0,162785	0,207962	0,218612	0,193345	3,046886
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Проверка стационарности по дисперсии и среднему временного ряда температуры в Чжаныцзян показывает, что ряд является стационарным, за исключением ряда июля, который оказался не стационарен по среднему.

Таблица 2.13 – Оценки стационарности эмпирического распределения
температуры для станции Чжаныцзян

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,344623	1,818084	стационарен
Стьюдент	1,087859	2,085090	стационарен

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Июль			
Фишер	1,119250	1,757589	стационарен
Стьюдент	0,203993	2,084880	не стационарен

График внутригодовых изменений температуры на станции Шаогуань представлен на рис. 2.10. Как следует из анализа данного графика, самым прохладным месяцем на станции является январь, самым жарким – июль.

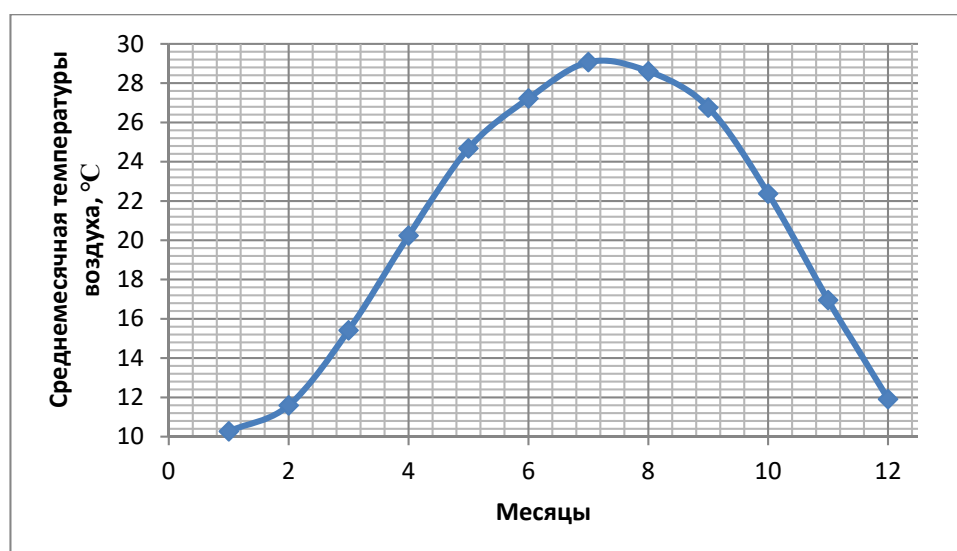
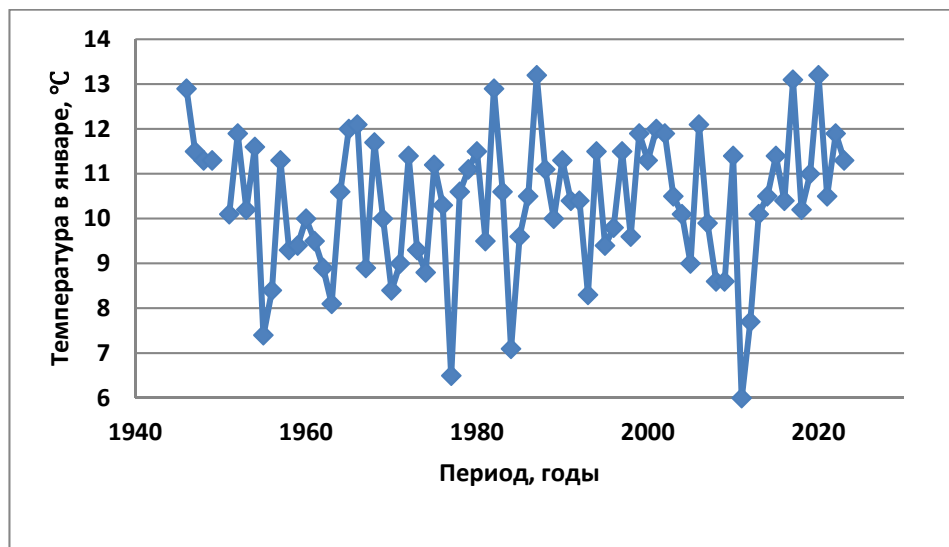


Рисунок 2.10 – График внутригодовых изменений температуры в Шаогуань.

Многолетние графики температуры этих месяцев представлены на рис. 2.11.

Визуальный анализ данных наблюдений среднемесячной температуры января в Шаогуань (рис. 2.11 (а), показал, что имеется сразу несколько максимумов (в 1946 г. и в 1982 г. – 12,9°C, в 1987 г. и в 2020 г. – 13,2°C, в 2017 г. – 13,1°C). Кроме того, имеется резко выраженный минимум в 2011 г (6,0°C), который на 0,5°C меньше следующего минимума, наблюдавшегося в 1977 г (6,5°C).

а)



б)

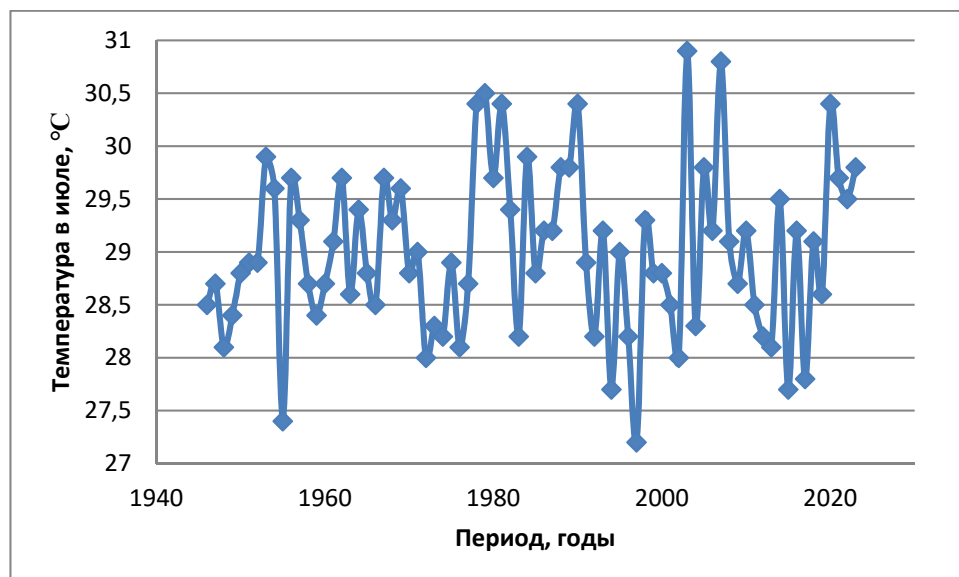


Рисунок 2.11 – Многолетние графики изменения среднемесячной температуры на станции Шаогуань: а – в январе, б – в июле.

Из анализа данных табл. 2.14 следует сделать вывод: временной ряд среднемесячной температуры в январе на станции Шаогуань является однородным. Проверка однородности по критерию Смирнова-Грabbса по минимальным значениям дает неоднородность, однако при проверке данного экстремума по критериям Диксона, позволяет сделать вывод, что ряд является однородным.

Таблица 2.14

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Шаогуань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,0	0,0	0,014925	0,016393	0,013889	1,850364
Критерий	0,254034	0,279993	0,329659	0,339624	0,321739	3,716281
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	0,069444	0,069444	0,152778	0,154930	0,152778	2,842417
Критерий	0,114866	0,132767	0,164670	0,172646	0,154670	2,396268
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	не однороден

Визуальный анализ данных среднемесячной температуры июля на станции Шаогуань (рис. 2.11 (б), показал, что резко выраженные максимумы и минимумы отсутствуют. Оценки однородности среднемесячных температур июля приведены в табл. 2.15, из анализа данных которой следует вывод, что временной ряд является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Шаогуань был разбит на две неравные подвыборки: с 1911 по 1942 гг. и с 1947 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности.

Таблица 2.15 – Оценки однородности эмпирического распределения
среднемесячной температуры в июле на станции Шаогуань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,027027	0,028571	0,114286	0,125	0,108108	2,41042
Критерий	0,211143	0,246134	0,287851	0,299691	0,276189	3,39353
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	0,054054	0,055556	0,138889	0,151515	0,135135	2,293077
Критерий	0,141457	0,164181	0,202777	0,21135	0,192777	2,677959
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Таблица 2.16 – Оценки стационарности эмпирического распределения
температуры для станции Шаогуань

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Январь			
Фишер	1,240233	1,842701	стационарен
Стьюдент	0,740949	2,207790	стационарен
Июль			
Фишер	2,099031	1,773612	не стационарен
Стьюдент	1,141253	2,863872	стационарен

Анализ данных табл. 2.16 свидетельствует, что расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для температуры в январе на станции Шаогуань меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности дисперсии и среднего. Для июля расчетное значение статистики Фишера больше критического, что говорит о нестационарности временного ряда по дисперсии, но расчетное значение статистики Стьюдента меньше критического, что говорит о стационарности временного ряда по среднему.

2.4 Оценки однородности и стационарности данных сумм осадков

График внутригодовых изменений количества осадков на станции Гуанчжоу представлен на рис. 2.12. Как следует из анализа данного графика, дождливым в Гуанчжоу является период с апреля по сентябрь, когда выпадает более 100 мм осадков в месяц. Многолетние графики количества осадков представлены на рис. 2.13.

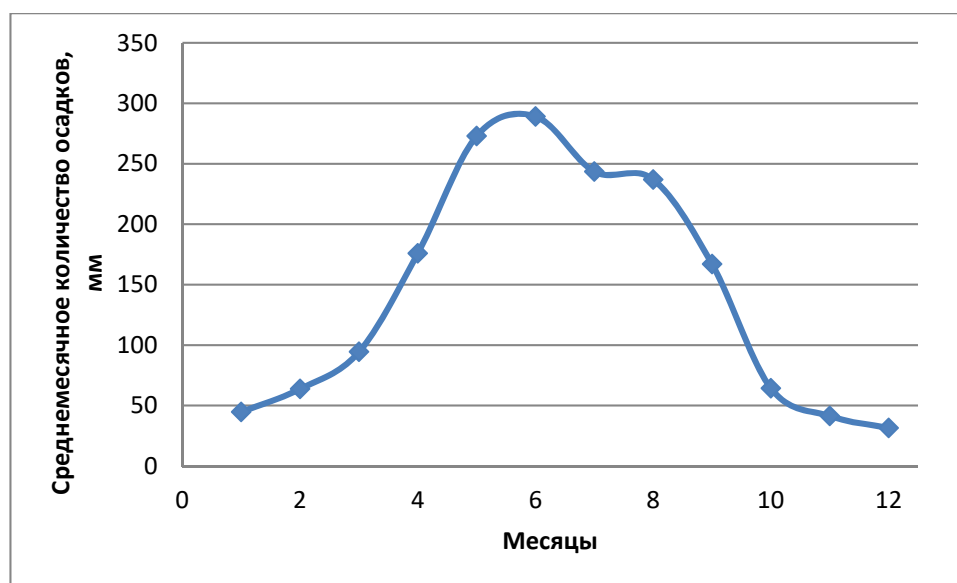


Рисунок 2.12 – График внутригодовых изменений количества осадков на станции Гуанчжоу

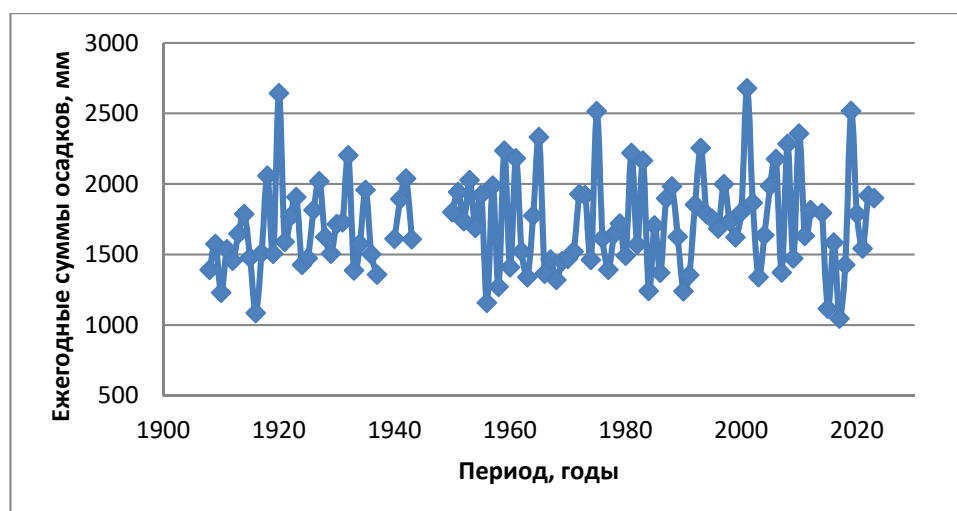


Рисунок 2.13 – Многолетний график годовых сумм осадков в Гуанчжоу

Визуальный анализ данных наблюдений количества осадков на станции Гуанчжоу (рис. 2.13), показывает, что зарегистрированы два резко выраженных максимума в 1920 г (2643,2 мм) и в 2001 г (2679,0 мм), которые более чем на 100 мм превосходят следующие два максимума, наблюдавшиеся в 1975 г (2516,7 мм) и в 2019 г (2517,0 мм). Кроме того, наблюдается сразу четыре приблизительно одинаковых минимумов в 1916 г (1086,3 мм), 1956 г (1158,5 мм), 2015 г (1116,0 мм) и в 2017 г (1046,0 мм).

Оценки однородности временных рядов количества осадков на станции Гуанчжоу приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17 – Оценки однородности эмпирического распределения количества осадков на станции Гуанчжоу

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,021923	0,022478	0,101714	0,103647	0,099204	2,848559
Критерий	0,251406	0,270600	0,323871	0,333871	0,310801	4,059880
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	0,024679	0,025232	0,043827	0,047587	0,042866	1,970881
Критерий	0,081891	0,106603	0,128269	0,142046	0,121757	2,235254
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Проверка однородности по критериям Диксона и Смирнова-Граббса показывает, что временной ряд является однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд сумм осадков на станции Гуанчжоу был разбит на две неравные подвыборки: с 1908 по 1942 гг. и с 1950 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Результаты оценивания стационарности представлены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

Оценки стационарности эмпирического распределения сумм осадков для станции Гуанчжоу

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,379127	1,707056	стационарен
Стьюдент	0,999205	2,082150	стационарен

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

График внутригодовых изменений количества осадков на станции Шаньтоу представлен на рис. 2.14. Как следует из анализа этого графика, дождливым на станции является период с апреля по сентябрь.

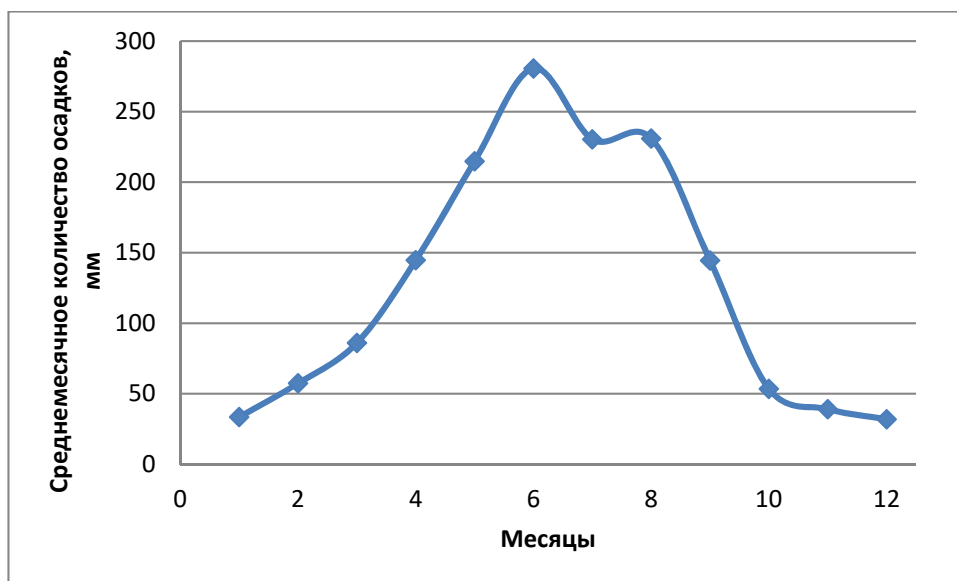


Рисунок 2.14 – График внутригодовых изменений осадков в Шаньтоу.

Многолетние графики количества осадков представлены на рис. 2.15.

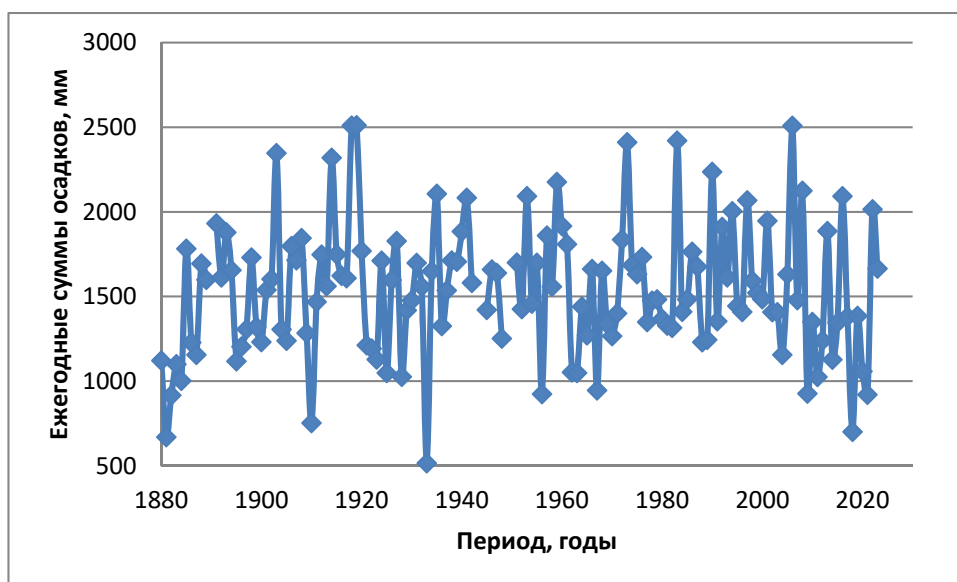


Рисунок 2.15 – Многолетние графики изменения количества осадков в Шаньтоу.

Анализ рис. 2,15 показал, что резко выраженные максимумы количества осадков отсутствуют. Имеется резко выраженный минимум 1933 г (516,1 мм), который более чем на 150 мм отличается от следующих минимумов 1881 г (670,4 мм), 1910 г (753,3 мм) и 2018 г (701,0 мм).

В табл. 2.19 представлены оценки однородности количества осадков на станции Шаньтоу. Из ее анализа следует вывод: временной ряд однороден.

Таблица 2.19

Оценки однородности эмпирического распределения количества осадков
на станции Шаньтоу

Оценки однородности по максимальным значениям						
	D1 _n	D2 _n	D3 _n	D4 _n	D5 _n	G _n
Статистика	0,001102	0,001195	0,001629	0,001657	0,001503	2,507733
Критерий	0,180294	0,183907	0,229344	0,239344	0,228839	3,675961
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	0,077308	0,077394	0,092742	0,092779	0,09264	2,623256
Критерий	0,098643	0,116957	0,1553	0,159121	0,136769	2,917326
Оценка	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден	однороден

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений многолетний ряд количества осадков на станции Шаньтоу был разбит на две неравные подвыборки: с 1880 г по 1942 гг. и с 1951 по 2023 гг. Оценки стационарности представлены в табл. 2.20.

Таблица 2.20

Оценки стационарности эмпирического распределения количества осадков
для станции Шаньтоу

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,146430	1,535345	стационарен
Стьюдент	0,326768	2,075430	стационарен

Проверка стационарности по дисперсии и среднему временного ряда количества осадков для станции Шаньтоу показывает, что ряд является стационарным.

График внутригодовых изменений количества осадков на станции Шаньвэй представлен на рис. 2.16. Как следует из анализа этого графика, дождливым является период с апреля по сентябрь. Многолетний график количества осадков представлены на рис. 2.17.

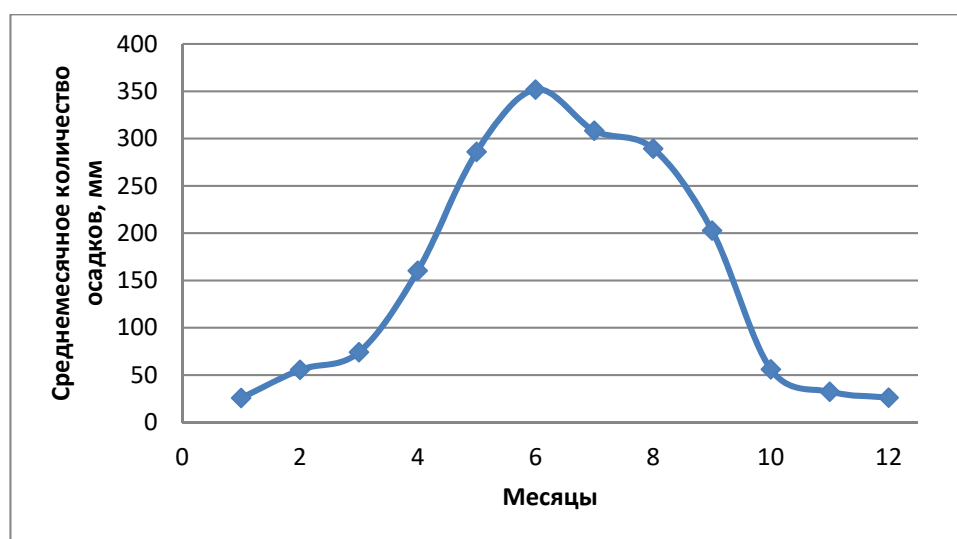


Рисунок 2.16 – График внутригодовых изменений количества осадков
на станции Шаньвэй.

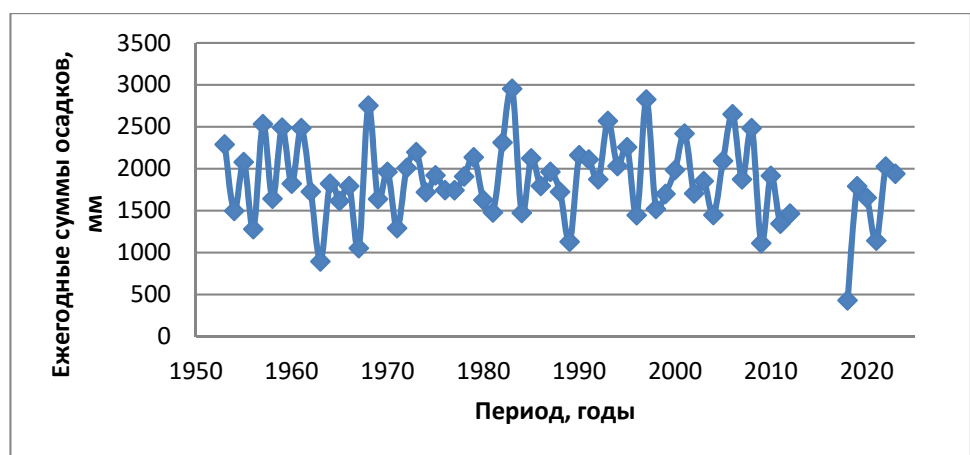


Рисунок 2.17 – Многолетний график изменения сумм осадков в Шаньвэй

Визуальный анализ данных наблюдений количества осадков для станции Шаньвэй (рис. 2.17), показал, что резко выраженные максимумы отсутствуют, однако имеется резко выраженный минимум в 2018 г (430 мм), который на 460 мм меньше следующего минимума, наблюдавшийся в 1963 г (894,7 мм).

Оценки однородности временного ряда количества осадков по минимальным значениям приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21 – Оценки однородности по минимальным значениям эмпирического распределения количества осадков на станции Шаньвэй

Оценки однородности по минимальным значениям						
	$D1_1$	$D2_1$	$D3_1$	$D4_1$	$D5_1$	G_1
Статистика	0,184120	0,194029	0,259624	0,267740	0,246365	2,987610
Критерий	0,181354	0,183421	0,226308	0,249402	0,217706	2,918222
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден

Из ее анализа следует вывод, временной ряд количества осадков на станции Шаньвэй по минимальным значениям является неоднородным. После исключения неоднородного экстремума 2018 г ряд становится однородным.

Для оценивания стационарности дисперсий и средних значений хронологический ряд среднемесячной температуры на станции Шаньвэй был разбит на две неравные подвыборки: с 1953 по 1990 гг. и с 1991 по 2023 гг. Оценки стационарности представлены в табл. 2.22.

Расчетные значения статистик Фишера и Стьюдента для сумм осадков на станции Шаньвэй меньше критических, поэтому делается вывод о стационарности временного ряда по дисперсии и среднему.

Таблица 2.22

Оценки стационарности эмпирического распределения количества осадков для станции Шаньвэй

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,302417	1,927426	стационарен
Стьюдент	0,146768	2,090760	стационарен

График внутригодовых колебаний количества на станции Янцзян представлен на рис. 2.18. Как следует из анализа данного графика, дождливым является период с апреля по сентябрь. Многолетний график количества осадков представлен на рис. 2.19.

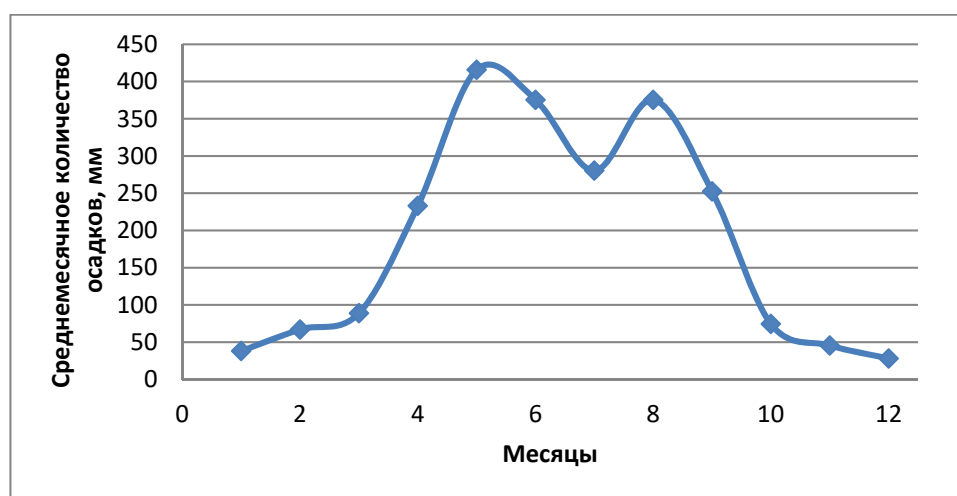


Рисунок 2.18 – График внутригодовых изменений сумм осадков в Янцзян

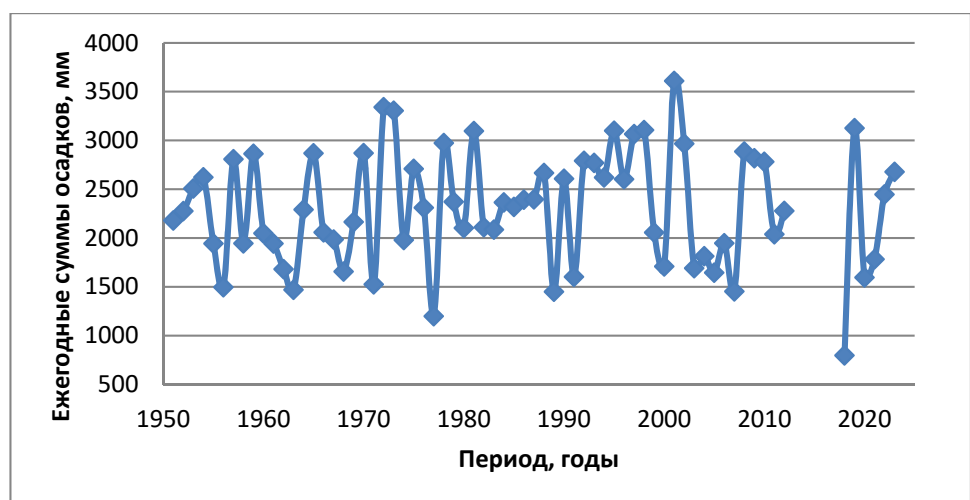


Рисунок 2.19 – Многолетний график изменения сумм осадков в Янцзян

Визуальный анализ данных наблюдений количества осадков в Янцзян (рис. 2.19), показал, что в 2001 г. имеется максимум (3611 мм), который более чем на 250 мм превышает следующие максимумы, наблюдавшиеся в 1972 г (3342 мм) и в 1973 г (3306 мм). Кроме того, имеется минимум в 2018 г (798 мм), который на 400 мм меньше следующего минимума, наблюдавшийся в 1977 г (1200 мм).

Оценки однородности количества осадков в Янцзяне приведены в табл. 2.23.

Таблица 2.23

Оценки однородности количества осадков в Янцзяне

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,095627	0,111572	0,126504	0,141138	0,108425	2,239181
Критерий	0,213488	0,236214	0,287330	0,297330	0,267199	3,209190
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	0,142908	0,158019	0,256289	0,259968	0,231781	2,587770
Критерий	0,181650	0,183735	0,229820	0,250027	0,220443	2,974843
Оценка	однороден	однороден	не однороден	не однороден	не однороден	однороден

Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд количества осадков по максимумам однороден. Три табличных критерия D3₁, D4₁ и D5₁ оказываются меньше расчетных значений. После исключения минимума 2018 г временной ряд оказывается однородным и по минимумам.

Для оценивания стационарности временной ряд количества осадков был разбит на две неравные подвыборки: с 1951 по 1981 гг. и с 1982 по 2023 гг – по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Оценки стационарности представлены в табл. 2.24.

Таблица 2.24

Оценки стационарности эмпирического распределения количества осадков для станции Янцзянь

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	1,172859	1,792314	стационарен
Стьюдент	0,356747	2,090340	стационарен

Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд количества осадков является стационарным до дисперсии и среднему.

График внутригодовых изменений количества осадков на станции Шаогуань представлен на рис. 2.20. Как следует из анализа данного графика, дождливым является период с апреля по сентябрь.

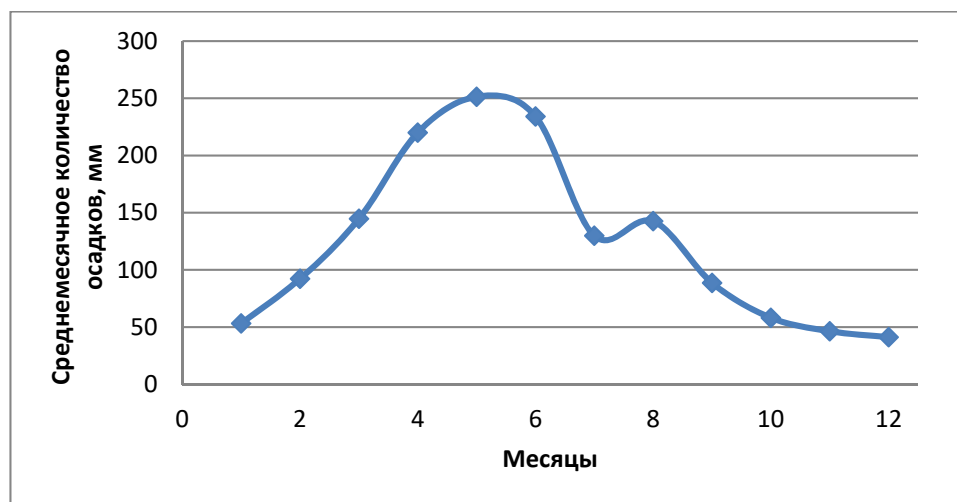


Рисунок 2.20 – График внутригодовых изменений сумм осадков в Шаогуань

Визуальный анализ данных наблюдений количества осадков в Шаогуань (рис. 2.21), показал, что имеется резко выраженный максимум в 2022 г. (2393 мм), который более чем на 250 мм больше следующего максимума в 1994 г (2132 мм). Кроме того, имеется резко выраженный минимум в 2018 г (517 мм), который почти в 2 раза меньше следующего минимума, наблюдавшегося в 1963 г (1006 мм).

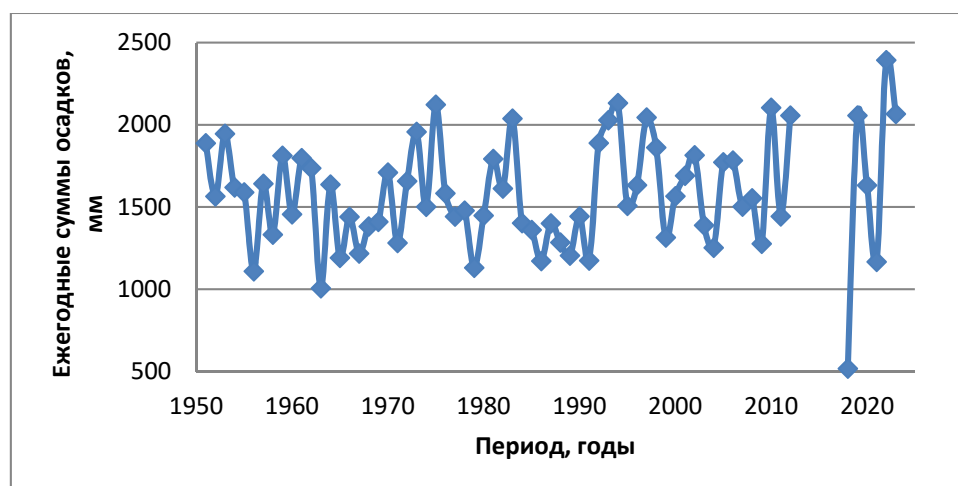


Рисунок 2.21 – Многолетний график изменения сумм осадков в Шаогуань

Оценки однородности количества осадков в Шаогуань приведены в табл. 2.25.

Таблица 2.25

Оценки однородности эмпирического распределения среднемесячной температуры в январе на станции Шаогуань

Оценки однородности по максимальным значениям						
	$D1_n$	$D2_n$	$D3_n$	$D4_n$	$D5_n$	G_n
Статистика	0,121375	0,147340	0,168888	0,188176	0,139126	2,557128
Критерий	0,198535	0,213943	0,262998	0,272998	0,251398	3,299976
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	0,176226	0,200570	0,296669	0,302786	0,260661	3,246082
Критерий	0,155334	0,164912	0,210303	0,222436	0,1956	3,00452
Оценка	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден	не однороден

Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд количества осадков по максимумам однороден а по минимумам неоднороден. После исключения минимума 2018 г временной ряд количества осадков на метеостанции Шаогуань оказывается однородным и по минимумам.

Для оценивания стационарности временной ряд количества осадков был разбит на две неравные подвыборки: с 1919 по 1990 гг. и с 1991 по 2023 гг – по

моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. Оценки стационарности представлены в табл. 2.24.

Таблица 2.26

Оценки стационарности эмпирического распределения количества осадков для станции Шаогуань

Критерий	Расчетн. знач.	Критич. знач.	Вывод
Фишер	2,086149	1,804484	стационарен
Стьюдент	1,946952	2,085720	стационарен

Из ее анализа следует сделать вывод, временной ряд количества осадков на станции Шаогуань является стационарным по среднему, но не стационарным по дисперсии.

2.5 Выводы по главе 2

В результате работы над главой 2 сформирована база данных по температуре и суммам осадков из результатов наблюдений 5 метеорологических станций в провинции Гуандун. Наблюдательные станции имеют различный период наблюдений, некоторые станции имеет перерывы в измерениях. Наибольший период наблюдений имеют станции Шантоу для количества осадков, расположенная на северо-восточном побережье провинции, и Гуанчжоу для температуры (административный центр провинции).

Проведено оценивание однородности и стационарности временных рядов температуры и количества осадков. Из рассмотрения исключены неоднородные

экстремумы: на станции Гуаньчжоу по температуре (минимумы 1930 г для января-месяца и 1935 г для июля), на станциях Шаньвэй, Янцзян и Шаогуань минимумы 2018 г по количеству осадков.

Анализ стационарности временных рядов не выявил нестационарности рядов для количества осадков, однако для всех станций выявлена нестационарность для июля по температуре (на станциях Гуаньчжоу, Шантоу, Чжаньцзян временные ряды оказались нестационарными по среднему; на станции Шаогуань – по дисперсии; на станции Шаньвэй – и по среднему и по дисперсии).

Генетический анализ не позволил выявить методических причин нарушения стационарности (перенос станций в другое место или изменений методики производства измерений), поэтому следует прийти к выводу о естественных причинах нарушения стационарности в теплое время года – изменении климата. Визуальный анализ показывает, что временные ряды, являющиеся не стационарными по среднему, имеют тенденцию к росту температуры с 80-х гг прошлого века.

3 Моделирование климатических изменений температуры и количества осадков в провинции Гуандун

3.1 Статистические модели климатических изменений

Климатическая система Земли постоянно меняется и формирует целый спектр колебаний климатических характеристик на различных временных интервалах. Изменчивость климатической системы оценивается на основе анализа большого числа показателей, к которым относятся, в первую очередь, температура воздуха и количество осадков. В данном исследовании будут построены и произведено оценивание качества моделей, описывающих данные метеорологические величины.

Изменение климатической системы может быть представлено с помощью двух основных видов моделей [14]:

- стационарного вида моделей;
- нестационарного вида моделей.

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 неизменными (стационарными) во времени [18]:

$$Y_{cp}(t) = const, \quad (3.1)$$

$$\sigma(t) = const. \quad (3.2)$$

Кроме случайных флуктуаций имеют место нестационарные составляющие, обусловленные влиянием факторов климатической системы с большими периодами. Если предположить, что нестационарные составляющие являются реакцией климатической системы на внешние воздействия, то проявления этих воздействий могут быть двух основных видов: монотонные (тренд или циклические колебания) и ступенчатые изменения.

Механизм монотонных изменений имеет место в равновесной системе, которая практически сразу же откликается на направленные внешние воздействия. В настоящее время наибольшее распространение получила модель линейного тренда, которая может быть описана с помощью регрессионного уравнения вида:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \quad (3.3)$$

где b_1, b_0 – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты b_1 и b_0 определяются с помощью метода наименьших квадратов по формулам [20]:

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

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp}, \quad (3.5)$$

где Y_{cp}, t_{cp} – 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 [18]:

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

Статистическая значимость модели линейного тренда определяется из условия:

$$R \geq R^*, \quad (3.7)$$

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 .

Механизм ступенчатых изменений 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 [18]:

$$Y_{\text{ср},j}(t_j) = \text{const}1_j, \quad j = 1, (1), m, \quad (3.8)$$

$$\sigma_j(t_j) = \text{const}2_j, \quad j = 1, (1), m, \quad (3.9)$$

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 [18]:

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

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 : $\sigma_\varepsilon = \sigma_Y$

$$\varepsilon_i = \sigma_Y. \quad (3.11)$$

Условие (3.11) выполняется в случае, если закономерности во временном ряду полностью отсутствуют.

Для модели линейного тренда стандартизированный остаток рассчитывается по формуле [20]:

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

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

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

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

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:

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

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

$$\Delta \geq 10 \%. \quad (3.15)$$

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:

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

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

Сформированная база климатологических данных была использована для оценивания климатических изменений температуры и суммы осадков.

3.2 Моделирование климатических изменений температуры для января

В табл. 3.1 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры января для провинции Гуандун.

На рис. 3.1 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур для января. В табл. 3.2 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры января для провинции Гуандун.

Для проверки статистической значимости модели линейного тренда выполняется проверка условия (3.7). Для всех станций, за исключением, станции Шаньтоу, линейная модель не является статистически значимой.

Таблица 3.1

Основные параметры стационарных моделей станций провинции Гуандун

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Гуанчжоу	13,72	1,485
Шантоу	13,98	1,359
Шаньвэй	15,24	1,169
Чжаныцзян	15,93	1,552
Шаогуань	10,36	1,534

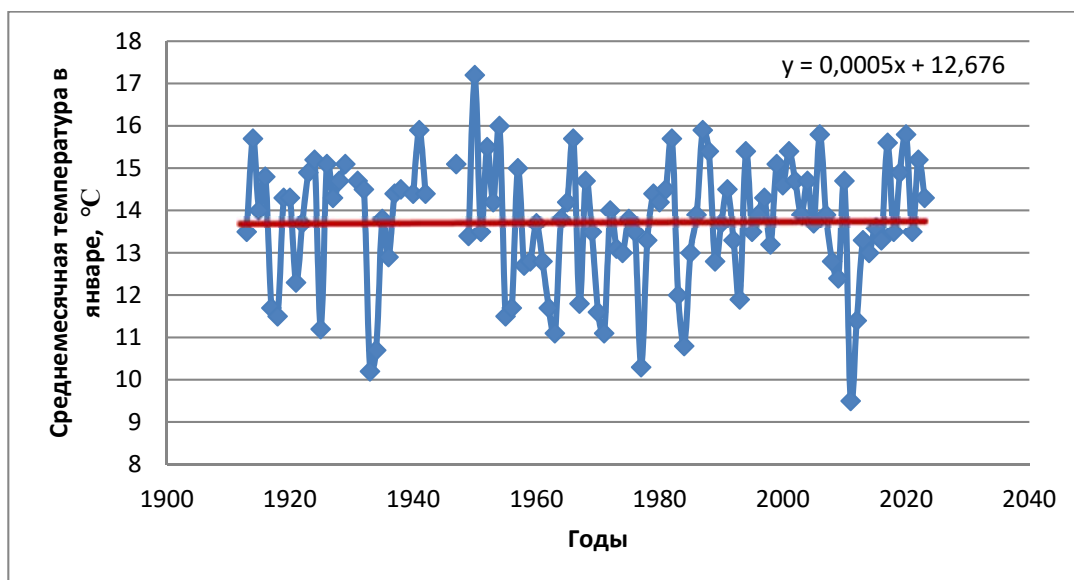
Таблица 3.2

Основные параметры линейной модели станций провинции Гуандун

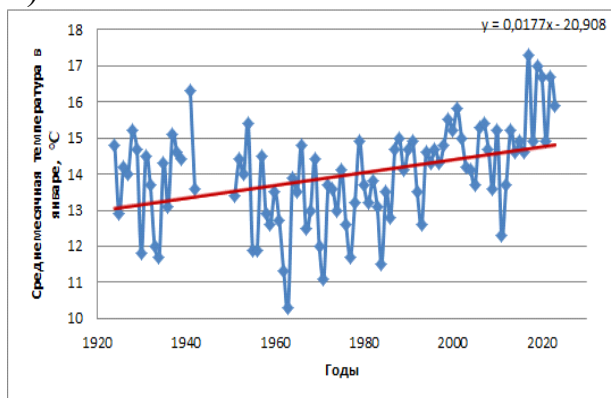
Название метеостанции	b_o	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Гуанчжоу	12,676	0,0005	0,012	0,192	Незначима	1,485
Шантоу	-20,908	0,018	0,376	0,203	Значима	1,259
Шаньвэй	-8,457	0,012	0,210	0,220	Незначима	1,142
Чжаныцзян	17,200	0,0006	0,012	0,201	Незначима	1,552
Шаогуань	1,059	0,0047	0,069	0,215	Незначима	1,530657

На рисунке 3.2 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с многолетними графиками среднемесячных температур для января. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.3.

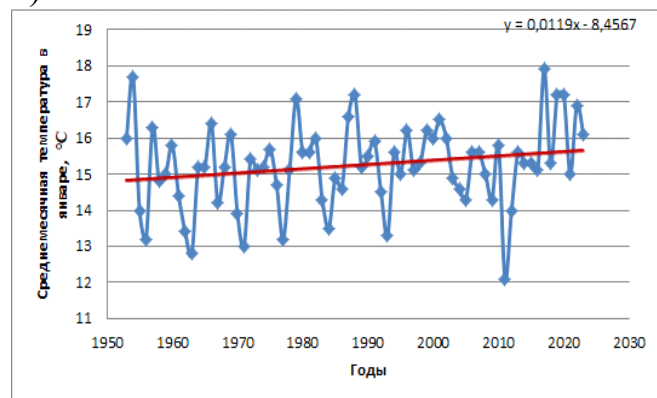
а)



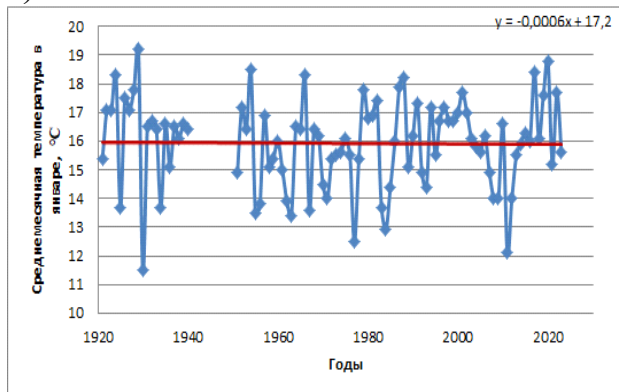
б)



в)



г)



д)

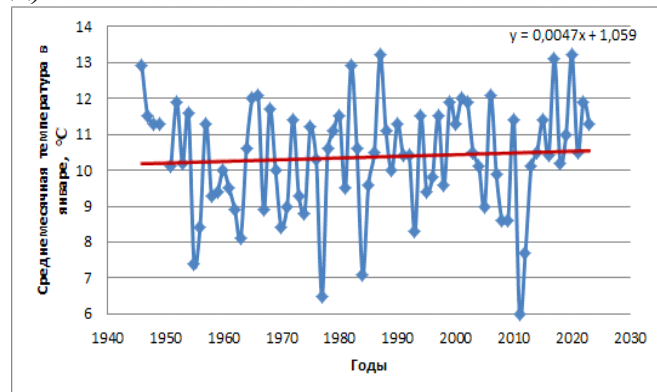
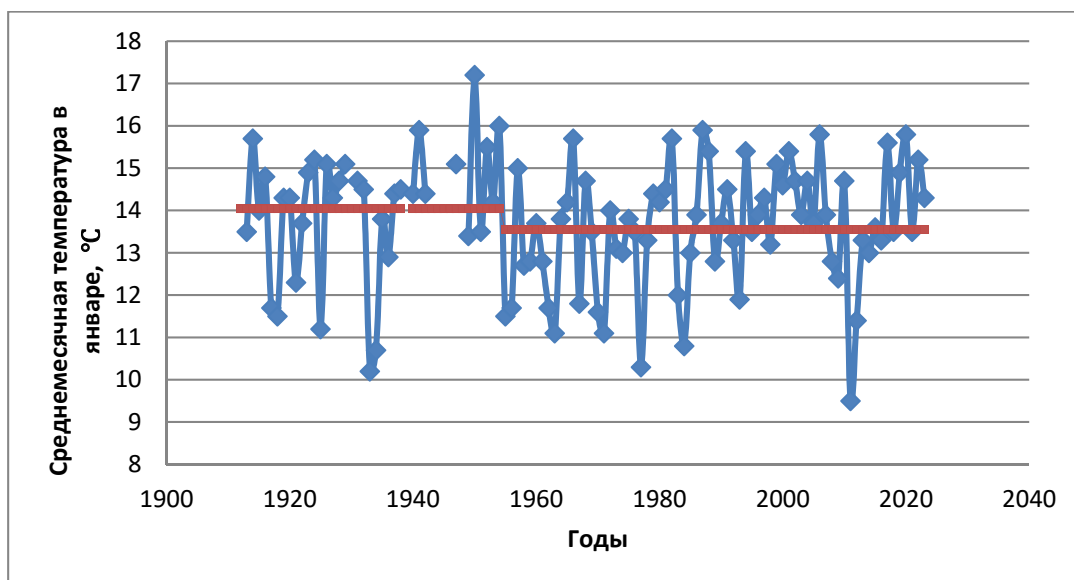
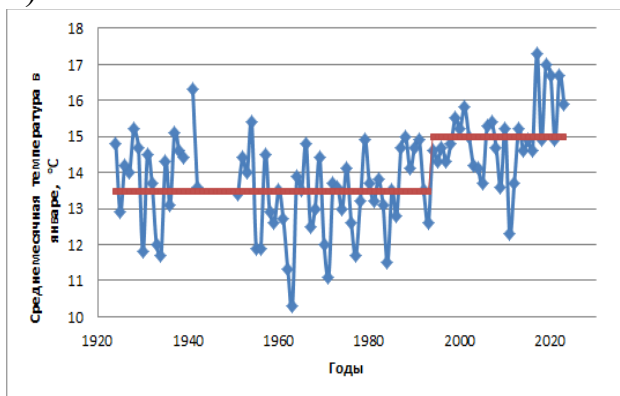


Рисунок 3.1 – Линейная модель среднемесячных температур в январе для станций провинции Гуандун: а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй; г – Чжаньцзян; д – Шаогуань

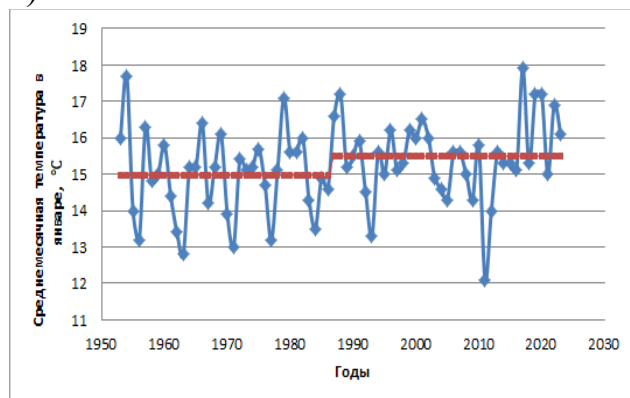
а)



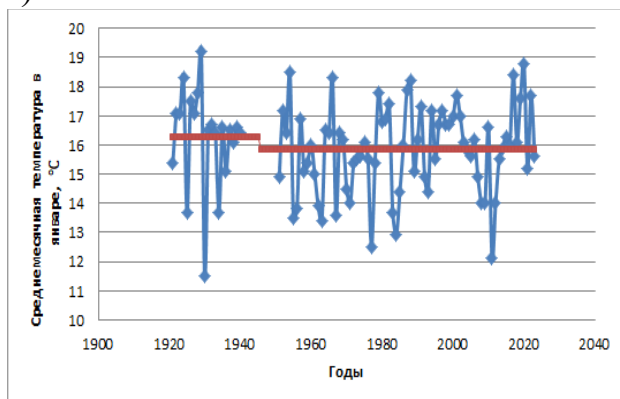
б)



в)



г)



д)

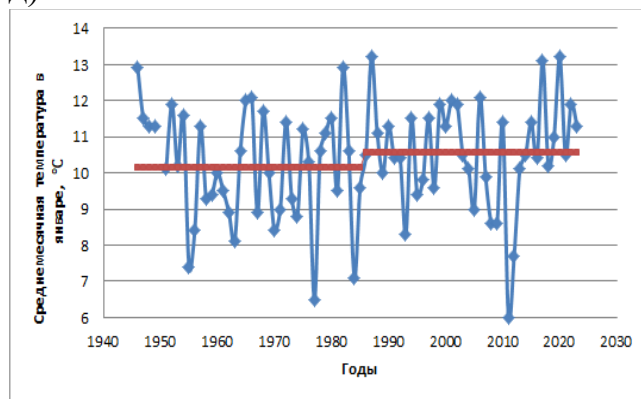


Рисунок 3.2 – Модели ступенчатых изменений среднемесячных температур в январе для станций провинции Гуандун:
а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй;
г – Чжаньцзян; д – Шаогуань

Таблица 3.3

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Гуанчжоу	1	35	14,046	1,548	1,482
	2	69	13,555	1,436	
Шаньтоу	1	61	13,489	1,220	1,178
	2	30	14,970	1,065	
Шаньвэй	1	34	14,959	1,165	1,154
	2	37	15,492	1,127	
Чжаныцзян	1	20	16,265	1,736	1,560
	2	73	15,834	1,497	
Шаогуань	1	39	10,159	1,554	1,541
	2	38	10,568	1,506	

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

Таблица 3.4

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Гуанчжоу	1,485	1,485	1,482	0,01	0,25	1,000	1,005
Шантоу	1,359	1,259	1,178	7,36	13,38	1,17	1,33
Шаньвэй	1,169	1,142	1,154	2,24	1,27	1,046	1,03
Чжаныцзян	1,552	1,552	1,560	0,01	–0,53	1,000	0,99
Шаогуань	1,534	1,531	1,541	0,24	–0,41	1,005	0,99

Анализ данных таблицы 3.4 показывает, что нестационарные модели не являются эффективными (за исключением, станции Шантоу для модели ступенчатых изменений) и статистически значимыми.

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

3.3 Моделирование климатических изменений температуры для июля

В таблице 3.5 приведены параметры стационарной модели среднемесячной температуры июля для провинции Гуандун. На рисунке 3.3 представлены графические изображения моделей линейного тренда совместно с хронологическими графиками среднемесячных температур для июля.

Таблица 3.5

Основные параметры стационарных моделей станций провинции Гуандун

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Гуанчжоу	28,55	0,66
Шантоу	28,57	0,81
Шаньвэй	28,44	0,57
Чжаньцзян	28,91	0,57
Шаогуань	29,00	0,79

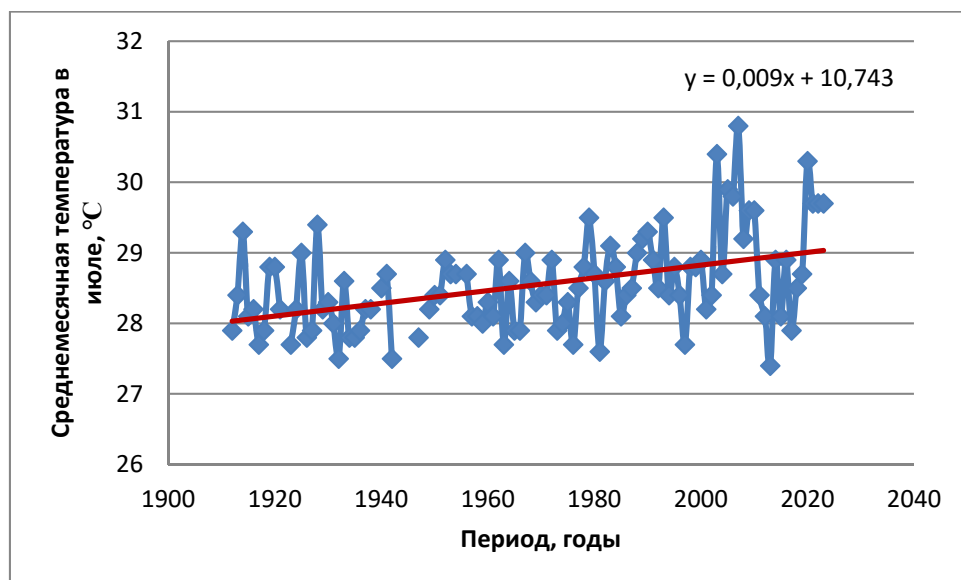
В таблице 3.6 приведены основные параметры линейной модели среднемесячной температуры июля для провинции Гуандун. Как следует из ее анализа, для всех станций линейная модель не является статистически значимой.

Таблица 3.6

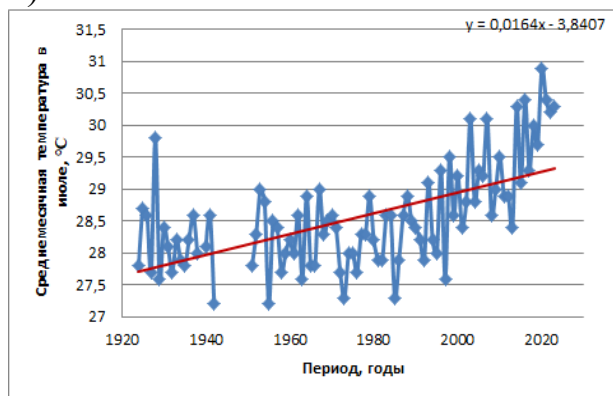
Основные параметры линейной модели станций провинции Гуандун

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Гуанчжоу	10,743	0,009	0,447	0,192	Значима	0,594
Шантоу	-3,841	0,016	0,588	0,203	Значима	0,653
Шаньвэй	5,910	0,011	0,411	0,220	Значима	0,519
Чжаньцзян	27,223	0,001	0,045	0,200	Незначима	0,574
Шаогуань	23,792	0,003	0,076	0,214	Незначима	0,784

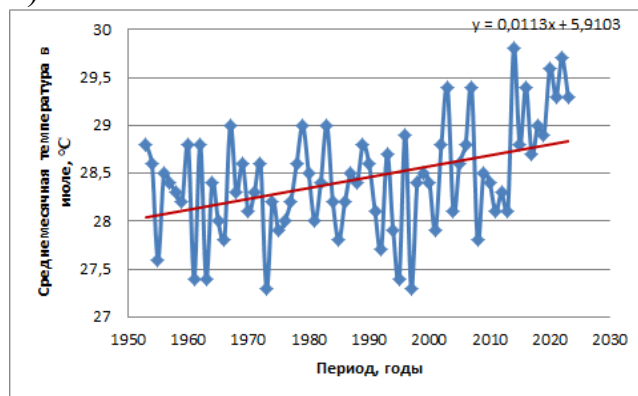
а)



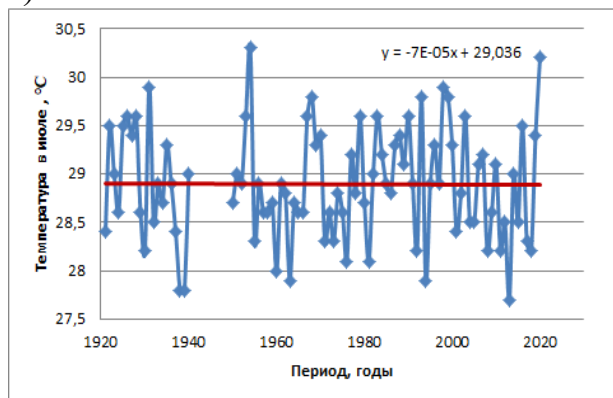
б)



в)



г)



д)

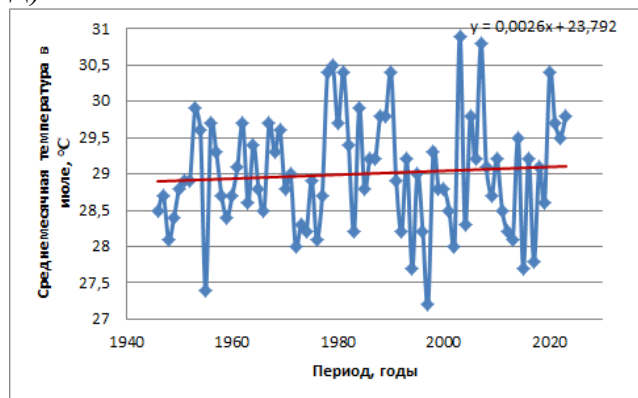
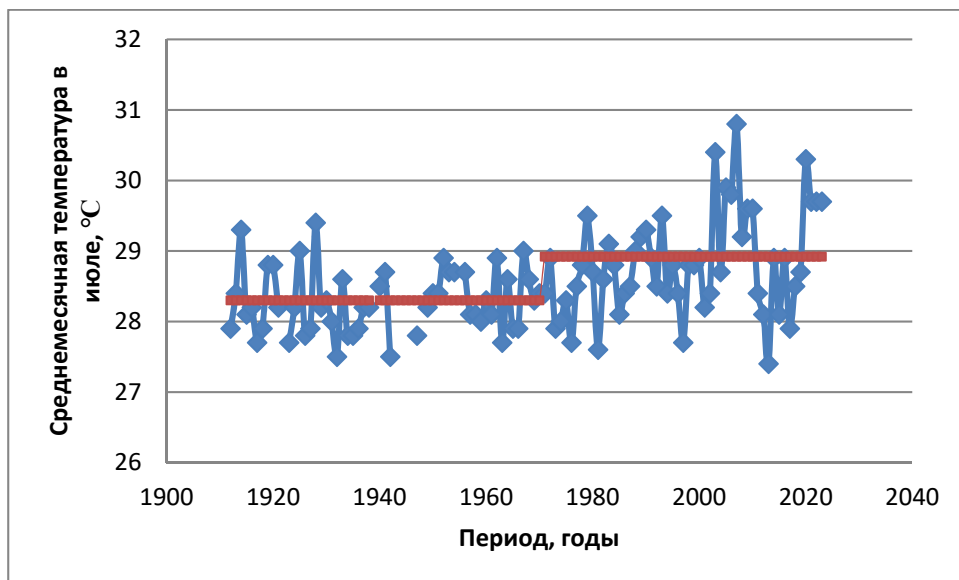


Рисунок 3.3 – Линейная модель среднемесячных температур в июле для станций провинции Гуандун: а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй; г – Чжаныцзян; д – Шаогуань

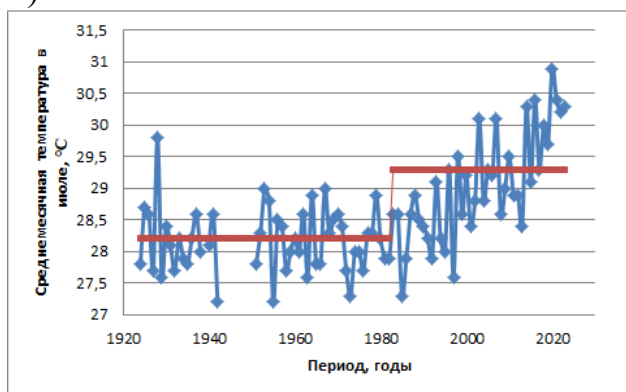
На рисунке 3.4 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с многолетними графиками среднемесячных

температур для июля. Основные параметры модели ступенчатых изменений представлены в таблице 3.4.

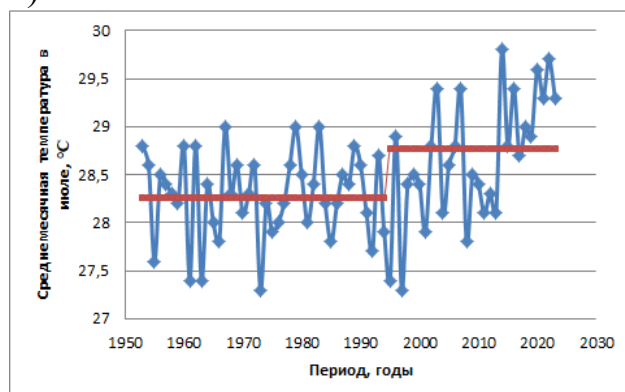
а)



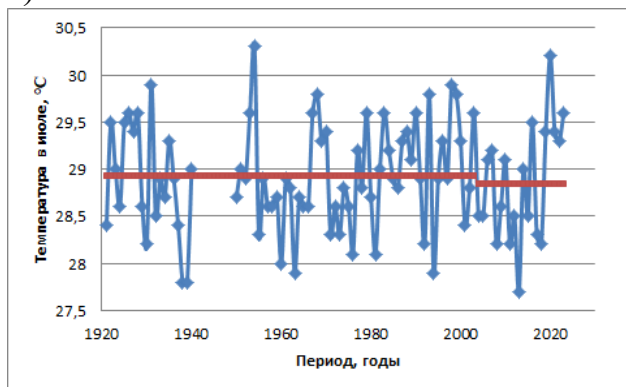
б)



в)



г)



д)

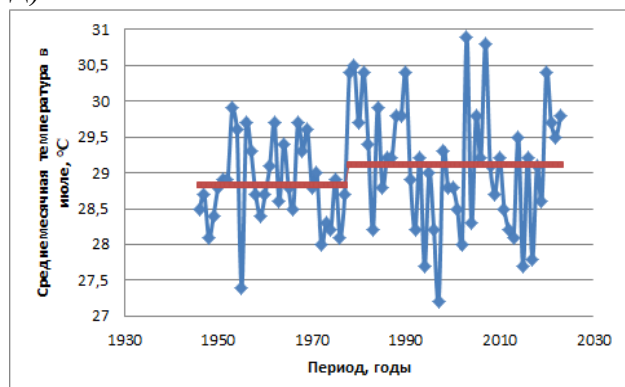


Рисунок 3.4 – Модель ступенчатых изменений среднемесячных температур в июле для станций провинции Гуандун: а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй; г – Чжаныцзян; д – Шаогуань

Таблица 3.7

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Гуанчжоу	1	62	28,298	0,470	0,596
	2	42	28,919	0,738	
Шаньтоу	1	61	28,207	0,509	0,629
	2	30	29,300	0,813	
Шаньвэй	1	45	28,256	0,477	0,519
	2	26	28,769	0,576	
Чжаныцзян	1	74	28,926	0,564	0,569
	2	20	28,850	0,570	
Шаогуань	1	32	28,834	0,587	0,783
	2	46	29,122	0,887	

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:

- для станции Шантоу нестационарные модели являются эффективными и статистически значимыми;
- для станции Гуанчжоу нестационарные модели являются эффективными, но не являются статистически значимыми;

Таблица 3.8

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Гуанчжоу	0,664	0,594	0,596	10,56	10,30	1,249	1,243
Шантоу	0,808	0,653	0,629	19,127	22,132	1,529	1,649
Шаньвэй	0,569	0,519	0,519	8,847	8,744	1,204	1,201
Чжаньцзян	0,574	0,574	0,569	0,100	0,985	1,002	1,020
Шаогуань	0,787	0,784	0,7836	0,29	0,45	1,006	1,009

Для остальных нестационарные модели не являются эффективными и статистически значимыми (следует отметить, что не смотря на то, что нестационарные модели на станции Шаньвэй не являются эффективными, но достаточно близко подошли к выполнению условия (3.15).

3.4 Моделирование климатических изменений количества осадков

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

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

Таблица 3.9

Основные параметры стационарных моделей станций провинции Хубэй

Название метеостанции	Среднее $Y_{cp}(t)$, мм	СКО $\sigma(t)$, мм
Гуанчжоу	1713,8	338,8
Шантоу	1536,5	389,0
Шаньвэй	1855,1	477,0
Янцзян	2306,1	582,8
Шаогуань	1566,4	323,3

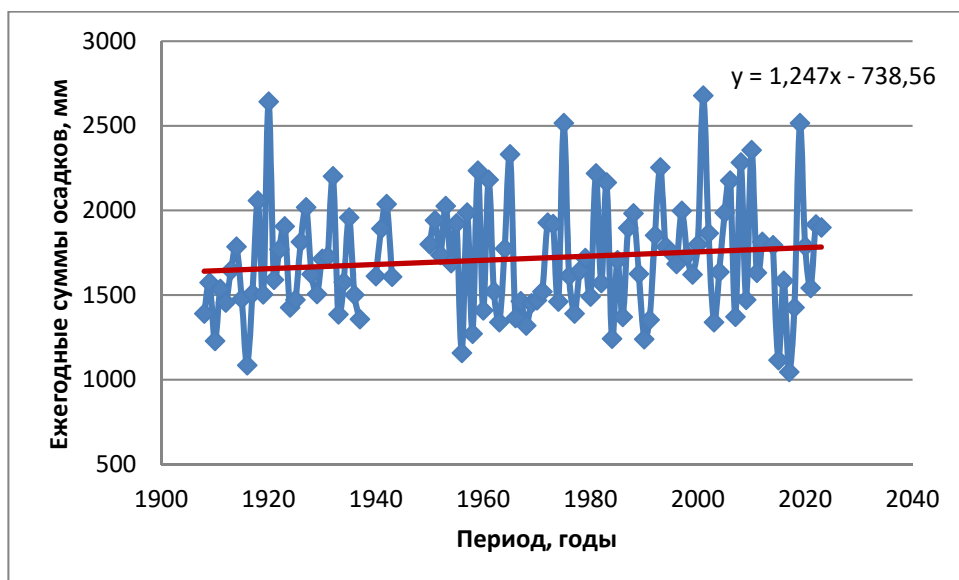
В таблице 3.10 приведены основные параметры линейной модели. Как следует из ее анализа, для всех станций линейная модель не является статистически значимой.

Таблица 3.10

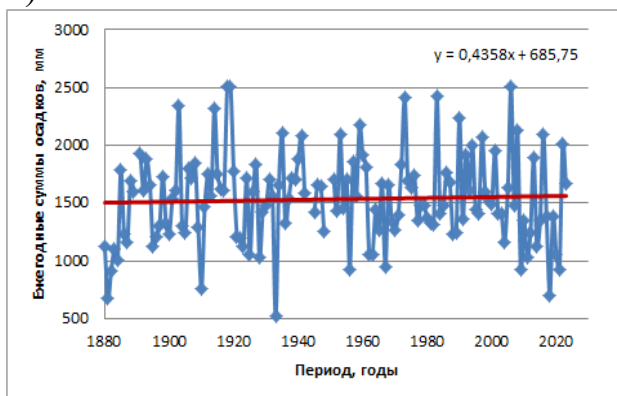
Основные параметры линейной модели станций провинции Хубэй

Название метеостанции	b_0	b_1	R	R^*	Вывод	σ_ε
Гуанчжоу	-738,555	1,247	0,126	0,189	Незначима	336,1
Шантоу	685,746	0,436	0,047	0,162	Незначима	388,6
Шаньвэй	6969,773	-2,575	-0,108	0,224	Незначима	474,2
Янцзян	645,726	0,836	0,029	0,222	Незначима	582,5
Шаогуань	-1454,283	1,532	0,141	0,204	Незначима	320,0

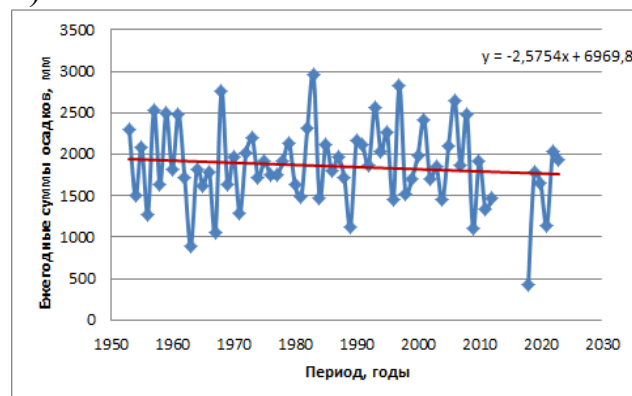
а)



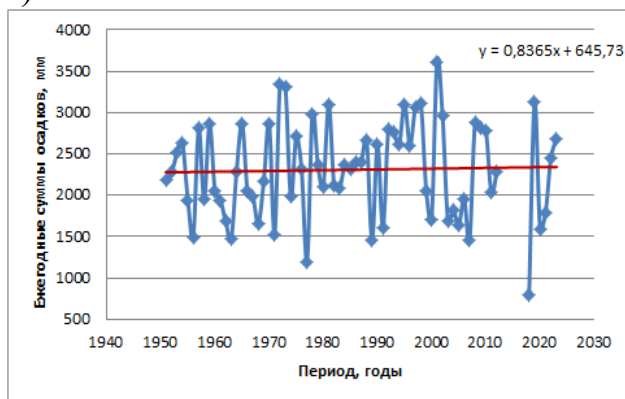
б)



в)



г)



д)

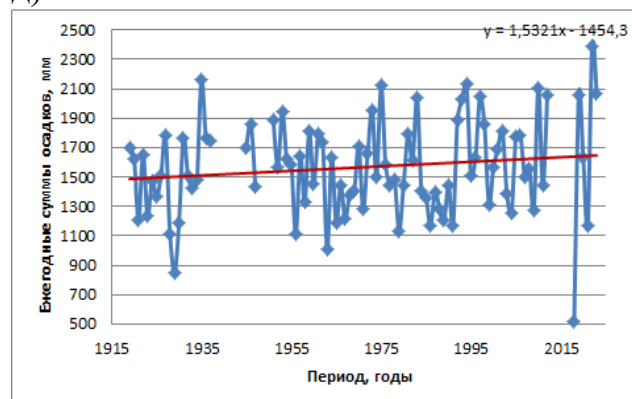


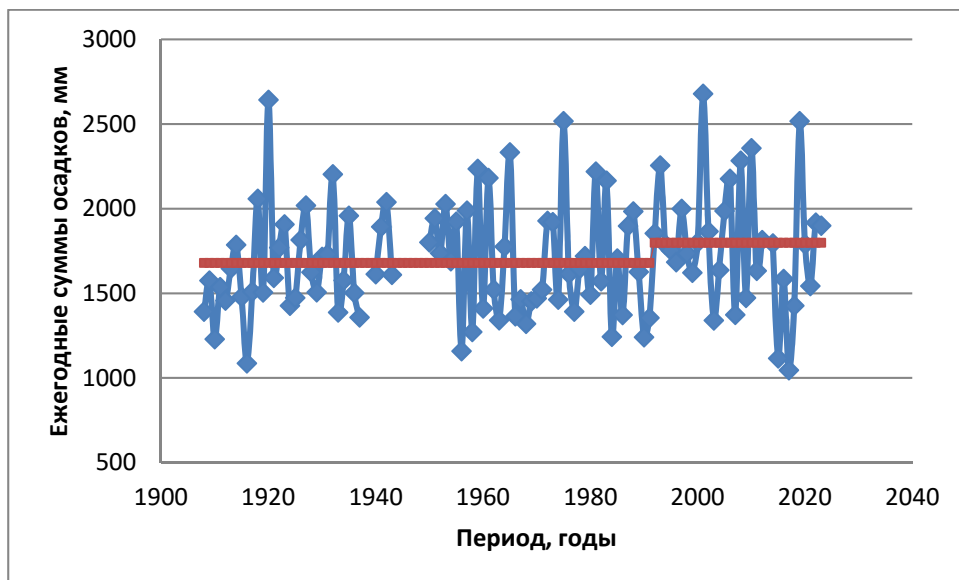
Рисунок 3.5 – Линейная модель количества осадков для провинции Гуандун:

а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй; г – Янцзян; д – Шаогуань

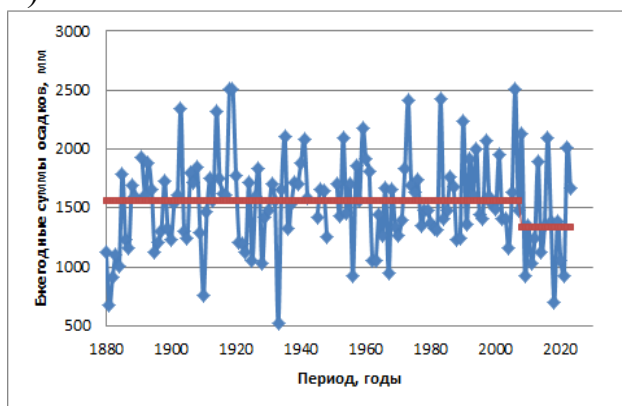
На рисунке 3.6 представлены графические изображения моделей ступенчатых изменений совместно с многолетними графиками количества

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

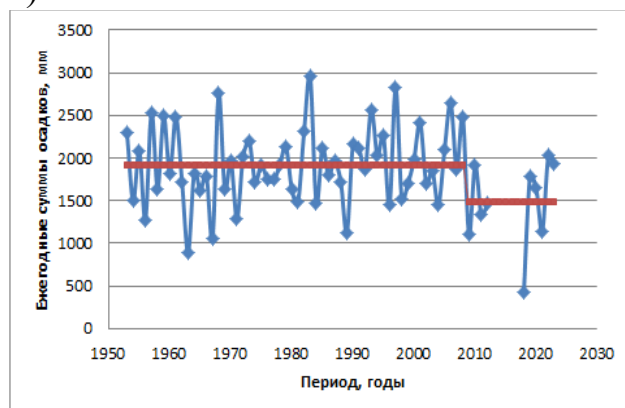
а)



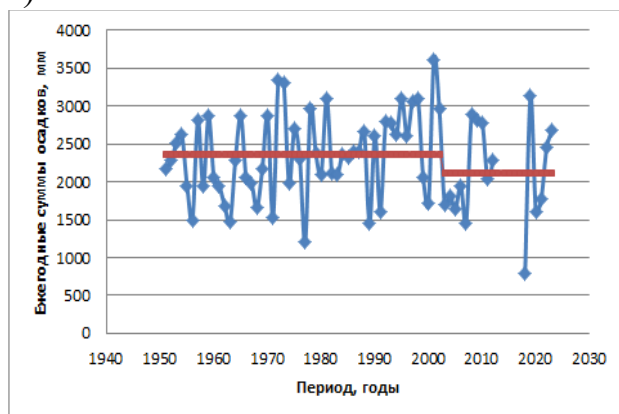
б)



в)



г)



д)

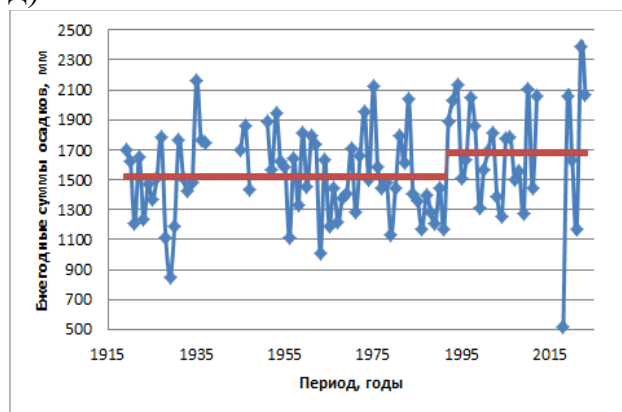


Рисунок 3.6 – Модели ступенчатых изменений количества осадков для провинции Гуандун: а – Гуанчжоу; б – Шаньтоу; в – Шаньвэй; г – Янцзян; д – Шаогуань

Таблица 3.11

Основные параметры ступенчатой модели для выбранных станций

Название метеостанции	Степень	n	$Y_{cp,j}$, мм	σ_j	σ_{cm}
Гуанчжоу	1	76	1679,3	319,9	337,9
	2	31	1798,3	373,3	
Шаньтоу	1	77	1548,0	394,5	391,6
	2	62	1522,3	384,7	
Шаньвэй	1	56	1921,7	446,2	457,3
	2	10	1481,9	493,9	
Янцзян	1	52	2365,8	557,9	581,9
	2	16	2111,9	637,2	
Шаогуань	1	63	1516,4	276,8	318,1
	2	27	1683,0	393,5	

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

Анализ данных табл. 3.12 показывает, что нестационарные модели не являются статистически значимыми для описания изменения количества осадков в провинции Гуандун, т.к. критическое значение статистики Фишера F^* всегда больше расчетного значения. Кроме того, данные модели не являются и статистически значимыми.

Таблица 3.12

Оценки эффективности и статистической значимости моделей

Название метеостанции	σ_Y	$\sigma_{тр}$	$\sigma_{ст}$	$\Delta_{тр}$, %	$\Delta_{ст}$, %	$F_{тр}$	$F_{ст}$
Гуанчжоу	338,8	336,1	337,9	0,796	0,288	1,016	1,006
Шантоу	389,0	388,6	391,6	0,111	0,671	1,002	0,987
Шаньвэй	477,0	474,2	457,3	0,582	4,137	1,012	1,088
Янцзян	582,8	582,5	581,9	0,043	0,158	1,001	1,003
Шаогуань	323,3	320,0	318,1	1,001	1,588	1,020	1,033

3.5 Выводы по главе 3

В результате выполнения работы получены актуальные параметры наиболее используемых стационарной и нестационарной моделей климатических изменений температуры января и июля и количества осадков для провинции Гуандун. Рассматриваемый район интересен в настоящее время, так как там активно развивается промышленность и инфраструктура, включая порты и транспортные сети.

На основе анализа качественных показателей разработанных моделей сделан вывод, что для описания климатических изменений в провинции Гуандун стационарная модель является наилучшей, так как модели линейного тренда и ступенчатых изменений в основном не являются эффективными и статистически значимыми. Исключение составляют временные ряды

температуры для июля для станций Гуанчжоу, Шантоу и Шаньвэй. Для этих станций линейная модель является эффективной, но не статистически значимой. Кроме того, для станции Шантоу, расположенной на северо-восточном побережье провинции, модели линейного тренда и ступенчатых изменений являются эффективными, а модель ступенчатых изменений еще и статистически значимой для описания температуры в январе.

Изменения температуры в январе на всех станциях имеет колебательный характер различной периодичности, вследствие чего линейная и ступенчатые модели не являются эффективными для их описания. Исключение составляет станция Шантоу, у которой наблюдается тенденция к росту температуры, начиная с 80-х гг прошлого столетия.

Изменения температуры в июле на вышеперечисленных станциях провинции имеют тенденцию к росту температуры, начиная с 80-х гг прошлого столетия, вследствие чего линейные модели для их описания являются эффективными, но пока не статистически значимыми.

Как показал анализ, изменения количества осадков на станциях в провинции Гуандун носит колебательный характер с периодом в несколько десятков лет, поэтому линейная и ступенчатая модели не являются эффективными для их описания.

Заключение

В ходе работы проанализировано влияние основных физико-географических факторов на климат провинции Гуандун. Географическое положение провинции определяет принадлежность климата к тропическому муссонному климату. Ориентация горного хребта Наньлин с юго-запада на северо-восток обеспечивает защиту от проникновения холодного воздуха с запада и севера, и открытость для воздушных масс и тропических циклонов с востока и юга. Близость Южно-Китайского моря, наличие многочисленных рек, озер и болот, преобладание выпавших осадков над испарением обуславливает наличие большого количества влаги в провинции. Провинция Гуандун является самой многочисленной в Китае, что обуславливает необходимость учета антропогенного фактора на климат.

Сформирована база данных по температуре и суммам осадков из результатов наблюдений 5 метеорологических станций в провинции Гуандун. Наблюдательные станции имеют различный период наблюдений. Период наблюдений за суммами осадков в провинции, как правило, больше, чем за температурой. Некоторые станции имеют перерывы в измерениях в период Второй мировой войны. Наибольший период наблюдений имеют станции Шантоу для количества осадков, расположенная на северо-восточном побережье провинции, и Гуанчжоу для температуры (административный центр провинции).

Проведено оценивание однородности и стационарности временных рядов температуры для самого прохладного и жаркого месяцев в году (января и июля) и количества осадков. Из рассмотрения исключены неоднородные экстремумы. Анализ стационарности временных рядов не выявил нестационарности рядов для количества осадков, однако для всех станций выявлена нестационарность для июля по температуре.

Генетический анализ не позволил выявить методических причин нарушения стационарности, поэтому следует прийти к выводу о естественных причинах нарушения стационарности в теплое время года – изменении климата.

Для временных рядов метеорологических станций разработаны стационарная и нестационарные модели (модель линейного тренда и модель ступенчатых изменений). Как показала проверка качества этих моделей, наилучшей оказалась стационарная модель. Нестационарные модели, как правило, не являются эффективными и статистически значимыми. Исключение составляют временные ряды температуры для июля для станций Гуанчжоу, Шантоу и Шаньвэй, для которых линейная модель является эффективной, но не статистически значимой. Для станции Шантоу, расположенной на северо-восточном побережье провинции, модели линейного тренда и ступенчатых изменений являются эффективными, а модель ступенчатых изменений еще и статистически значимой для описания температуры в январе.

Анализ показал, что временные ряды имеют колебательный характер различной продолжительности и для их описания необходимо использование более сложных нестационарных моделей, например, гармонической модели с несколькими гармониками.

Построена модель внутригодовых изменений количества осадков, которая имеет один-два максимума в летние месяцы и один минимум в зимние, которые можно объяснить особенностями циркуляции атмосферы в данном районе.

Новизна работы заключается в том, что актуализированы с учетом измерений последних лет статистические параметры климатических моделей провинции Гуандун.

Практическая значимость работы в том, что результаты работы могут быть использованы для адаптации существующей инфраструктуры и управленческих стратегий к изменениям климата (рост температуры в жаркое время года и периодические колебания количества выпадающих осадков), в первую очередь, для развития сельского хозяйства, промышленности и управления водными ресурсами в провинции Гуандун.

Список использованной литературы

1. National assessment of climate change Writing committee. The second national assessment of climate change // Beijing: Science Press, 2011. – P. 38.
2. Nyunt C, Koike T, Yamamoto A. et al. Bias-correction and Spatial Disaggregation for Climate Change Impact Assessments at a basin scale // EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013. – P. 480.
3. Ahmed K., Wang G., Silander J. et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast // Global & Planetary Change. – 2013. – № 100 (1). – p. 320-332.
4. Polsky C. Putting Space and Time in Ricardian Climate Change Impact Studies: Agriculture in the U.S. Great Plains, 1969-1992 // Annals of the Association of American Geographers. – 2015. – № 94(3). – p. 549-564.
5. Ян С., Чжао С., Сюн Ю. и др. Ход исследований по сокращению масштабов региональной статистики изменения климата // Журнал экологии. – 2011. – № 31(9). – p. 2602-2609.
6. Angrist J. Krueger A. Instrumental variables and the search for identification: From supply and demand to natural experiments // Journal of Economic Perspectives. – 2001. – № 15 (4). – p. 69-85.
7. Ivits E., Cherlet M., Tóth G. et al. Combining satellite derived phenology with climate data for climate change impact assessment // Global & Planetary Change. – 2012. – № 89(2). – p. 85-97.
8. Nanping W., Lei X. et al. Determination of Radioactivity Level of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in Surface Medium in Zhuhai City by in-situ Gamma-ray Spectrometry // Journal of Nuclear Science and Technology, 2005, 42:10. – p. 888-896.
9. Петухов Б.В. География Китая: уч. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2021. – 236 с.

10. Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Ч.1. – 2005. – 523 с.
11. Climate explorer [Электронный ресурс]: WMO KNMI: [сайт]. – Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>
12. Летопись погоды [Электронный ресурс]: Погода и климат: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru>
13. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 1. Общая климатология: Книга 1. – СПб, РГГМУ, 2019. – 378 с.
14. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата: Книга 1. – СПб, РГГМУ, 2016. – 332 с.
15. 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
16. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 78 с.
17. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – М.: Изд-во МГУ, 2006. – 528 с.
18. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата: Книга 2. – СПб, РГГМУ, 2018. – 377 с.