

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**Омар Абдулхаки́м Али Шукри**

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
НА АРАВИЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ**

Специальность: 25.00.30 — Метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата географических наук



Санкт-Петербург  
2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

*Научный руководитель:*

- доктор технических наук Лобанов Владимир Алексеевич.

*Официальные оппоненты:*

- доктор географических наук, старший научный сотрудник Викторов Сергей Васильевич, СПб НИЦЭБ РАН;
- кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горошкова Наталья Ивановна, Государственный гидрологический институт.

*Ведущая организация:*

- Главная геофизическая обсерватория г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «28» мая 2015 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д. 212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «24» апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д. 212.197.01  
кандидат физико-математических наук, доцент

Л.В. Кашлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Аравийский полуостров (от древнееврейского «араба» - пустыня) является самым большим в мире и одним из самых жарких и засушливых регионов нашей планеты, а его климат даже в современных условиях - одним из наиболее неблагоприятных для человека: континентальный жаркий сухой, на севере - субтропический, на юге – тропический. Ограниченное увлажнение, экстремально высокие температуры летнего периода и высокая испаряемость делают этот район наиболее непригодным для жизни человека, животных и растительности.

Вместе с тем Аравийский полуостров является в экономическом отношении одним из важнейших сырьевых регионов мира, Нефть и природный газ - главное богатство Аравийского полуострова, добыча которого вдохнула жизнь во многие его города. Целые страны, такие как Саудовская Аравия, Оман, Катар, ОАЭ живут доходами от продажи "чёрного золота" и имеют возможности регулирования мировых цен на нефть. Самые крупные месторождения нефти сосредоточены на побережье Персидского залива и на территории Саудовской Аравии ее запасы оцениваются в 264 млрд. баррелей или 24% от всех разведанных запасов на Земле. Согласно BP Statistical review of world energy в 2012 году Саудовская Аравия была на первом месте в мире по добыче нефти, составившем 3.6 млн. баррелей, что дало 45% валового внутреннего продукта государства при ВВП на душу населения в 24 200 \$.

Современное потепление климата может привести к еще более неблагоприятным условиям на Аравийском полуострове, что скажется как на жизнедеятельности населения, так и на экономике и как следствие - на политической стабильности. Поэтому оценка современных тенденций климатических изменений на Аравийском полуострове актуальна и имеет первостепенное значение для современной и будущей социально-экономической стратегии его развития. Главными климатическими характеристиками, которые подлежат исследованию, являются температуры воздуха и осадки, причем осадки уже сейчас являются одними из самых малых на планете, а температуры – одними из самых высоких. Еще одним доводом актуальности данного исследования является необходимость оценки стабильности расчетных климатических характеристик, которые используются при проектировании существующих и при эксплуатации действующих строительных объектов и сооружений.

**Целью настоящей работы** является выявление, анализ и моделирование современных климатических изменений температуры воздуха и осадков на территории Аравийского полуострова, а также оценка возможных их будущих изменений до конца 21 века на основе климатических сценариев.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи:

1. Формирование региональной базы данных многолетних рядов среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков на Аравийском полуострове и его сопредельных территориях и анализ качества и однородности информации с восстановлением пропусков наблюдений и приведением непродолжительных рядов к одинаковому многолетнему периоду для целей дальнейшего эффективного моделирования.

2. Аппроксимация многолетних временных рядов стационарной и нестационарными моделями и выбор наиболее эффективной модели для каждой климатической характеристики и метеостанции.

3. Пространственное обобщение показателей эффективности нестационарных моделей по территории Аравийского полуострова и выявление районов, где имеют место нестационарные модели.

4. Определение климатических норм и стандартных отклонений за разные интервалы времени с оценкой их статистической устойчивости и обобщение по территории Аравийского полуострова.
5. Определение климатических характеристик температур воздуха и осадков редкой повторяемости (1 раз в 100 и 200 лет) и построение региональных зависимостей, связывающих климатические нормы с расчетными характеристиками.
6. Построение пространственных статистических моделей климатических характеристик для Аравийского полуострова и анализ изменений временных рядов их параметров.
7. Оценка будущих изменений температур воздуха на Аравийском полуострове до конца 21 века на основе климатических сценариев с оценкой соответствия модельных данных и данных наблюдений.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты обработки рядов наблюдений за температурой воздуха и осадками на Аравийском полуострове и сопредельных территориях, включая анализ их качества, оценку однородности, восстановление пропусков и приведение к единому продолжительному периоду для статистического моделирования.
2. Результаты моделирования многолетних временных рядов температур воздуха и осадков с пространственным обобщением показателей эффективных нестационарных моделей по территории Аравийского полуострова.
3. Результаты расчета климатических норм и стандартных отклонений температур воздуха и осадков и их обобщение по территории Аравийского полуострова.
4. Полученные региональные зависимости, связывающие нормы температур воздуха и осадков с их расчетными климатическими значениями повторяемостью 1 раз в 100 и 200 лет для территории Аравийского полуострова.
5. Результаты пространственного статистического моделирования в виде многолетних рядов параметров модели с оценкой их климатических изменений.
6. Будущие оценки изменения температур воздуха на Аравийском полуострове до конца 21 века, полученные по климатическим сценариям с оценкой их надежности.

**Научная новизна** определяется:

1. Сформированными многолетними и однородными рядами температур воздуха и осадков на метеостанциях Аравийском полуострове и сопредельных территорий, полученных на основе обработки и анализа наблюдений и представляющих собой региональную базу данных для статистического моделирования.
2. Разработкой методики по пространственно-временному моделированию и эффективной оценке значимости проявления современных климатических изменений.
3. Полученными результатами по определению районов на территории Аравийского полуострова с нестационарными моделями для различных климатических характеристик температур воздуха и осадков и установленному эмпирическому факту, что нестационарная модель ступенчатых изменений более эффективна, чем рассматриваемая в настоящее время модель линейного тренда.
4. Полученными пространственными закономерностями климатических норм и стандартных отклонений и установленными региональными зависимостями между нормами и расчетными климатическими характеристиками для территории Аравийского полуострова.
5. Выявленными закономерностями во временных рядах параметров построенных пространственных статистических моделей для различных климатических характеристик температур воздуха и осадков на Аравийском полуострове.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования** заключается в разработке и апробации методики по выявлению климатических изменений в рядах температуры воздуха и осадков на региональном уровне на примере Аравийского полуострова. Методика включает в себя выбор наиболее эффективной модели из трех конкурирующих: модели случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений

и пространственное обобщение показателей отклонения от стационарной модели. Кроме того, оценивается стабильность климатических норм и выявляются их региональные взаимосвязи с климатическими характеристиками редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет. Для стабильных и однородных условий применена методика построения пространственной статистической модели, параметры которой характеризуют региональный градиент и средние региональные условия и анализируются на наличие в них климатических изменений.

**Практическая значимость** заключается:

- в создании наиболее полной, проверенной и проанализированной региональной базы данных, откорректированной для выполнения любых климатических исследований на Аравийском полуострове и сопредельных территориях;
- в определении областей на территории Аравийского полуострова, в которых в настоящее время уже имеют преимущества нестационарные модели, связанные с проявлением изменения климата;
- в получении пространственных распределений климатических норм и стандартных отклонений различных климатических характеристик за различные периоды времени (весь период наблюдений, период, рекомендуемый ВМО) для целей их расчета в любой точке полуострова, где наблюдения отсутствуют;
- в построенных региональных зависимостях, связывающих климатические нормы температур и осадков с расчетными климатическими характеристиками редкой повторяемости для целей строительного проектирования в любой точке полуострова, где метеорологические наблюдения отсутствуют.

**Методы исследования.** В основе диссертационного исследования лежит применение объективных статистических методов, как для анализа данных, так и для моделирования. Так для оценки качества и однородности сформированной региональной базы данных применялись статистические критерии Диксона, Смирнова-Граббса, Фишера, Стьюдента. Для восстановления пропусков наблюдений и приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду применялись методы регрессионного анализа на основе простого и множественного уравнения связи с продолжительными рядами-аналогами с оценкой его эффективности и статистической значимости коэффициентов. Для моделирования временных рядов применялись статистические модели случайной выборки, тренда и ступенчатых изменений. Эффективность и статистическая значимость преимуществ нестационарных моделей оценивались по сравнению остаточных дисперсий моделей на основе критерия Фишера. Методы пространственной интерполяции использованы при картировании показателей отличия нестационарных моделей от стационарных, климатических норм и стандартных отклонений. Методы регрессионного анализа были применены также и для построения региональных зависимостей, связывающих климатические нормы и расчетные климатические характеристики редкой повторяемости и при построении пространственных статистических моделей.

**Научная обоснованность и достоверность** положений и выводов подтверждается, прежде всего, проверенной и качественной информацией, заложенной в анализ и моделирование, а также применением объективных и эффективных статистических методов и большим количеством выполненных расчетов для разных климатических характеристик с последующей согласованностью полученных результатов.

**Личный вклад автора** выражен в том, что им самостоятельно была подготовлена региональная база данных, осуществлена проверка ее качества и однородности и подготовлена информация для последующего анализа и моделирования. Также автором самостоятельно выполнены все расчеты и анализ результатов моделирования, что представлено в отдельных личных статьях автора, а там, где работы опубликованы в соавторстве, автору диссертации принадлежит участие в постановке и реализации задачи.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях Итоговой секции Ученого Совета РГГМУ в 2012-2015 гг. и семинарах кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы РГГМУ. Также результаты работы были представлены в виде доклада на международной конференции 11<sup>th</sup> International Precipitation Conference (Нидерланды, Вагенингем, 2013) и международном семинаре STANU 2014 (ОАЭ, Абу-Даби, 2014). Результаты диссертации непосредственно использовались при выполнении международного проекта «Climate Change Modeling and Capacity Building» Р 103922 (САМА/YMS - Agro biodiversity and Climate Change Adaptation Project (АСАР) и проведении курсов повышения квалификации в республике Йемен (г. Санаа, январь 2015). В настоящее время в соавторстве подготовлены Методические указания «Сценарные оценки будущего климата на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана и данных проекта СМIP5» для выполнения лабораторных работ при обучении в магистратуре по направлению подготовки 280200 «Прикладная гидрометеорология».

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, из них 5 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4х глав и заключения. Объем работы составляет 155 страниц и включает 39 рисунков и 36 таблиц. Список литературы состоит из 141 наименования в основном зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования; сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту; изложены научная новизна, теоретическая и научная значимость диссертации; приведены основные методы исследования; показана научная обоснованность и достоверность положений и выводов и показан личный вклад автора в выполнение работы.

**Первая глава** с одной стороны является обзорной, а с другой – в ней уже даются оценки будущего климата на Аравийской полуострове на основе сценариев и моделей общей циркуляции атмосферы по данным проектов СМIP3 и СМIP5.

**В параграфе 1.1** рассматриваются особенности климатических условий Аравийского полуострова, состоящие в том, что весь он расположен в засушливой территории, на севере которой умеренный климат с максимумом зимних осадков, а на юге - тропический. Абсолютный максимум температуры летом достигает +50°C в пустынях, зимние температуры колеблются от +11 - +20°C в континентальной части полуострова, до +19 - +28°C на побережье Красного моря и +11 - +17°C на побережье Персидского залива. Абсолютные минимальные температуры зафиксированы в Кувейте (-2°C) и в Аль-Хафджи (-6°C). Осадков выпадает крайне мало: на юге - около 50 мм. в год (иногда дождей не бывает несколько лет подряд), в тропических зонах - около 100 мм. Чуть больше осадков на юго-западе и юго-востоке полуострова - здесь, на склонах гор выпадает 500-700 мм. годовых осадков. Приведены графики внутригодовых изменений среднемесячных температур воздуха и осадков на отдельных станциях из которых следует, что в северной (Амман), центральной (Эр-Рияд) и восточной (Дубай) частях полуострова в месяцы теплого полугодия осадки практически отсутствуют. В то же время в прибрежных районах Аравийского моря (Сур), Аденского залива (Салала) и Красного моря (Тайф) осадки выпадают в течение всего года, причем на метеостанции Салала их годовой максимум приходится на месяцы теплого периода. Максимальные же температуры наименьшие на севере и на юге (до 32<sup>0</sup>C), а наибольшие в центральных пустынных районах и вблизи Персидского залива (до +40 - +44<sup>0</sup>C).

**В параграфе 1.2.** дан краткий обзор результатов исследований современных климатических изменений на Земле и на Аравийском полуострове. Рассмотрены основные

факторы климата и их вклад в колебания глобальной температуры по результатам 5-го доклада МГЭИК. Как следует из анализа составляющих, циклические компоненты в колебаниях глобальной температуры и отдельные ее падения обусловлены естественными факторами (Эль-Ниньо, вулканы, приходящая солнечная радиация), а направленное повешение – антропогенными. Причем, в последние годы глобальная температура несколько стабилизировалась, что обусловлено уменьшением приходящей солнечной радиации и индекса ЭНЮК. Также приведен обзор публикаций по исследованию климатических изменений на Аравийском полуострове из которого следует, что по температуре воздуха десятилетие 1980-1989 гг. было аномально холодным, десятилетие 1990-1999гг. – средним, а последнее десятилетие 2000-2010 гг. – аномально теплым, причем наибольшие положительные аномалии имеют место в центре полуострова. Пространственно-временные распределения осадков более неоднородны и в каждое десятилетие можно встретить области как положительных, так и отрицательных аномалий. Также показан достаточно высокий антропогенный вклад в эмиссию CO<sub>2</sub> на душу населения для отдельных стран Ближнего Востока и Аравийского полуострова и дана оценка влияния повышения уровня Мирового океана на 1м, 2м, 3м, 4м и 5 м на население отдельных стран Аравийского полуострова.

**В параграфе 1.3.** приводятся оценки будущего климата на основе сценариев и моделей общей циркуляции атмосферы. По результатам 5-го доклада МГЭИК следует, что к концу 21-го столетия на территории Аравийского полуострова ожидается увеличение среднегодовой температура от 2<sup>0</sup>С до 4<sup>0</sup>С, причем наибольшее увеличение (до 4.5<sup>0</sup>С) будет иметь место в центральной пустынной части полуострова, где достаточно жарко и сегодня. Зимние осадки к концу 21-го века по данным СМIP3 с большой достоверностью уменьшатся в северной части Аравийского полуострова на 10-20% и несколько вырастут (до 10-15%) на самом юге полуострова в районе Йемена. Летние же осадки останутся практически неизменными. По результатам СМIP5 зимние осадки вырастут в восточной части полуострова и уменьшатся в западной, а летние увеличатся практически на всем полуострове за исключением его северной части, где будет иметь место уменьшение осадков. Если же взять отдельную модель, то неопределенность будет еще больше, поэтому однозначных и надежных оценок изменения осадков в конце 21 века для Аравийского полуострова получено не было.

На основе данных проектов СМIP3 и СМIP5, приведенных в Интернете и представляющих собой результаты моделирования по различным моделям и сценариям, автором были выполнены самостоятельные исследования по оценке возможных будущих изменений температур воздуха в трех разных частях Аравийского полуострова: на севере, в центре и на юге. Для этой цели были выбраны 3 метеостанции: Иордания, Эр-Риад и Аден и данные моделирования в ближайших узлах регулярной сетки. В качестве моделей выбраны такие, которые освещают весь диапазон возможного повышения температуры ( $\Delta T$ ) при удвоении CO<sub>2</sub>: модель Института вычислительной математики РАН, Россия ( $\Delta T = 2.1^{0}C$ ), модель Хэдли центра прогноза климата, Великобритания ( $\Delta T = 3.3^{0}C$ ), модель центра метеорологических национальных исследований, Франция ( $\Delta T = 4.4^{0}C$ ) и ряд других. В качестве сценариев были выбраны сценарии роста CO<sub>2</sub> до увеличения в 2 и 4 раза.

Для выбора наиболее эффективной модели для Аравийского полуострова, прежде всего, было осуществлено сравнение данных моделирования и наблюдений за совместный период. Коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и смоделированными данными  $R > 0.5$  получены для двух станций Эр-Риад и Аден и только за месяцы теплого периода года с мая по сентябрь. Наибольшее значения коэффициента корреляции  $R = 0.72$  имеет место для температуры июня и для модели центра метеорологических национальных исследований Франции. Кроме того, сопоставление норм температур по данным наблюдений и моделирования за совместный период показало, что данные моделирования уже завышены по отношению к наблюдаемым данным до 2-5<sup>0</sup>С в зависимости от месяца и

периода осреднения на метеостанции Эр-Риад и до  $1-3^{\circ}\text{C}$  – на метеостанции Аден. Анализ модельных данных с 2014 г. по 2100 г. показал, что рост средних температур за 30-летние отрезки времени или очень мал (до  $0.5^{\circ}\text{C}$  на метеостанции Аден) или практически отсутствует (метеостанция Эр-Риад) по сценариям СМIP3, хотя по СМIP5 ожидается рост до  $5^{\circ}\text{C}$ .

**В параграфе 1.4.** приводится примененная методика исследований и дается ее обоснование. Предлагаемая методика исследования современных климатических изменений в температуре воздуха и осадках основывается на данных многолетних наблюдений и включает следующие основные части:

- формирование региональной базы многолетних данных в пунктах наблюдений, как на территории Аравийского полуострова, так и сопредельной территории;
- анализ качества и однородности данных наблюдений и приведение непродолжительных рядов к многолетнему периоду с восстановлением пропусков наблюдений;
- определение видов моделей временных для каждого пункта наблюдений и каждой метеорологической характеристики;
- пространственное обобщение результатов моделирования климатических изменений по территории;
- получение климатических закономерностей для стационарных условий по территории Аравийского полуострова;
- построение территориальных статистических моделей и исследование динамики их коэффициентов.

В работе дается обоснование каждой части методики.

**Во второй главе** было осуществлено формирование региональной базы данных и выполнен анализ качества исходной информации в результате чего были получены многолетние ряды наблюдений практически без пропусков продолжительностью примерно 100 лет для температуры и около 70 лет для осадков для целей дальнейшего моделирования.

**Параграфы 2.1 и 2.2** посвящены выбору пунктов наблюдений, формированию региональной базы данных и анализу ее состава и информационных особенностей. В качестве исходной информации для климатического моделирования были выбраны многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и сумм осадков. Архивы многолетних рядов температур воздуха и осадков получены, главным образом, из Интернета с сайтов Королевского метеорологического института Нидерландов и Вашингтонского климатического центра. Всего на территории Аравийского полуострова выбрано 48 метеостанций, из которых в 36 пунктах имеются наблюдения за температурой и в 43 – за осадками. Вместе с тем, средний период наблюдений составляет всего 20-30 лет, что недостаточно для надежного моделирования. Поэтому на сопредельных территориях Ближнего Востока и Африки выбрано еще около 450 станций, из которых 20% имеют продолжительные ряды более 70 лет и примерно столько же включают данные по последние годы наблюдений (2011-2012 гг.), что позволяет их использовать в качестве пунктов-аналогов при приведении непродолжительных рядов на Аравийском полуострове к многолетнему периоду.

В результате были сформированы две региональные базы данных: отдельно по температуре воздуха на 188 станциях и по осадкам на 310 станциях с использованием СУБД программного комплекса (ПК) «Гидрорасчеты». Пространственное распределение метеостанций с температурами воздуха является более равномерным, чем с осадками, хотя есть территории, например, в центре Аравийского полуострова, в которых метеостанции отсутствуют.

**В параграфе 2.3.** приведены методы оценки однородности и стационарности. Анализ однородности и стационарности исходных позволяет с одной стороны проверить надежность исходной информации на наличие ошибочных данных и больших

погрешностей, а с другой стороны – сделать предварительные выводы о статистической значимости климатических изменений за отдельные интервалы времени.

Первым шагом исследования является оценка однородности эмпирических распределений метеорологических характеристик, которая может нарушаться из-за резко отклоняющихся от общей совокупности максимальных и минимальных значений. Для оценки статистической значимости однородности были использованы критерии Смирнова-Граббса и Диксона. На втором шаге осуществляется оценка стационарности, т.е. однородности во времени, для тех метеорологических характеристик, условия измерения которых могли измениться. Например, это может быть связано с заменой регистрирующих приборов, что имело место в бывшем СССР при замене дождемеров на осадкомеры с лепестковой защитой системы Третьякова. При оценке стационарности средних значений и дисперсий для последовательных частей ряда применяются критерии Стьюдента и Фишера, которые также как и критерии однородности, обобщены для особенностей гидрометеорологической информации: естественной внутрирядной связанности и асимметрии. Анализ по этим критериям осуществляется после того, как проведена оценка на отсутствие резко отклоняющихся экстремумов, существенно влияющих на значения средних и особенно дисперсий. Для оценки стационарности дисперсий и средних соответственно по критериям Фишера и Стьюдента. временной ряд разбивается на две или несколько подвыборок одинаковой или разной длины, причем границы разбиения желательно связывать с датами предполагаемого нарушения стационарности.

**В параграфе 2.4** приведены результаты оценки однородности и стационарности по статистическим критериям для каждого временного ряда и для каждого пункта наблюдений. В результате для температуры воздуха на станциях Аравийского полуострова получено:

- число рядов с максимальными неоднородными экстремумами равно 16 или 2.5% , число же рядов с неоднородными минимальными экстремумами несколько больше и равно 24 или 3.7%;
- проведенный анализ многолетних рядов, содержащих неоднородные экстремумы показал, что причина неоднородности в основном в том, что в рядах имеются пропуски наблюдений и они недостаточно продолжительны, что и усилило статистическую значимость экстремумов;
- нестационарными по дисперсиям являются 25 рядов или 3.8% от общего их числа;
- нестационарные по средним являются 40 рядов или 6.2%;
- в теплые месяцы года нестационарность средних наблюдается на большем числе станций (9-11 станций), чем в холодные (3-4 станции);
- нестационарность дисперсий выявляется практически на тех же станциях, где установлены неоднородные экстремумы;
- нестационарных рядов по средним больше, чем по дисперсиям и они уже предварительно характеризуют нестационарность климата, которая больше проявляется в теплые месяцы года.

Для остальных станций архива температур, расположенных за пределами Аравийского полуострова, получено, что число рядов, содержащих неоднородные максимумы равно 4%, а число рядов с неоднородными минимумами – 1.5%. Нестационарность дисперсий установлена по критерию Фишера в 2.6% от общего числа рядов, а нестационарность средних по критерию Стьюдента – в 1.0% станций.

Для месячных сумм осадков на станциях Аравийского полуострова получено:

- число рядов с неоднородными максимумами 49 или 4.6%, с неоднородными минимумами – 39 или 3.7% от общего числа.
- по месяцам года число неоднородных максимумов изменяется от 1-3 в холодные месяцы года до 5-7 – в теплые, хотя явной закономерности внутри года не прослеживается;
- число неоднородных минимумов варьирует от 1 в декабре – январе до 5-7 в теплый период года.

- нестационарными по дисперсиям являются 159 из 528 рядов или 30% от общего числа,
- практически все случаи нестационарности дисперсий обусловлены влиянием одного или нескольких экстремумов, которые могут быть однородными при оценке по критериям Диксона и Смрнова-Граббса, но проявляют свою неоднородность при оценке дисперсии как второго момента распределения;
- по месяцам процент нестационарных данных распределен достаточно равномерно, но с некоторыми всплесками до 34-48% весной и осенью. Летом и зимой процент нестационарности уменьшается до 20%.
- по станциям наибольшее число месяцев с нестационарной дисперсией осадков наблюдается на метеостанциях: Аден (7 месяцев), Абин Алкод (8 месяцев), Масира (8 месяцев).

Анализ неоднородных рядов позволил установить, что выявленные неоднородные экстремумы температуры и осадков связаны с пропусками наблюдений и недостаточной продолжительностью рядов. Нестационарность для рядов температур обусловлена в одних случаях влиянием неоднородных экстремумов, в других - естественными климатическими изменениями. Для рядов осадков нестационарность обусловлена в основном экстремумами и пропусками наблюдений.

Поэтому непродолжительные ряды наблюдений с пропусками следовало привести к многолетнему периоду и восстановить пропущенные данные наблюдений.

**В параграфах 2.5 и 2.6** представлена методика и результаты восстановления пропусков наблюдений и увеличения продолжительности рядов. Данная известная методика, приведенная, например, в СП 101-2003 (Свод правил по определению основных расчетных гидрологических характеристик) основана на построении регрессионных уравнений связи между рассматриваемым рядом и рядами-аналогами в ближайших пунктах наблюдений. Выполнение данной процедуры необходимо для того, чтобы результаты последующего моделирования временных рядов были достаточно надежными и их можно было обобщать по территории, т.е. ряды наблюдений должны быть продолжительными, примерно одинаковой длины и без пропусков.

Были заданы следующие условия эффективного регрессионного уравнения, применяемого для восстановления:

$$n' \geq 10; R \geq 0.7-0.8; b/\sigma_b \geq 2, \quad (1)$$

где  $n'$  - число совместных лет наблюдений в приводимом пункте и пунктах - аналогах;  $R$  - коэффициент парной или множественной корреляции между значениями рассматриваемого ряда и значениями характеристик в пунктах - аналогах;  $b$  - коэффициент уравнения регрессии;  $\sigma_b$  - средняя квадратичная погрешность коэффициента уравнения регрессии.

Число одновременно включенных аналогов в уравнение регрессии было ограничено тремя:

$$Y = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + b_3 Y_3, \quad (2)$$

где  $Y$  - климатические характеристики на рассматриваемой станции;  $Y_1, Y_2, Y_3$  - климатические характеристики на станциях-аналогах.

Вместе с тем в качестве предполагаемых аналогов для каждого ряда наблюдений за температурой воздуха на Аравийском полуострове были привлечены остальные 187 рядов на станциях как на полуострове, так и за его пределами, а для каждого ряда осадков на полуострове - 309 таких рядов из всей сформированной базы данных.

В соответствии с условием (1) для приведения к многолетнему периоду среднемесячных температур воздуха минимальное значение коэффициента корреляции было задано  $R=0.8$ , а для сумм месячных осадков -  $R=0.7$ , т.к. осадки намного хуже

связаны по территории. Обобщенные результаты восстановления пропусков наблюдений и приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Средние периоды наблюдений (в годах) до и после применения процедуры восстановления пропусков и приведения к многолетнему периоду на метеостанциях Аравийского полуострова

месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха												
до	41	40	41	41	41	41	41	39	39	40	40	41
после	114	116	110	102	101	99	96	102	102	101	101	106
Осадки												
до	34	36	34	35	34	34	33	33	33	33	33	33
после	82	79	71	51	98	73	73	68	71	57	74	50

Как следует из данных таблицы, средний период наблюдений в 39-41 год для температуры воздуха удалось увеличить до 96 (август) – 116 (февраль) лет, причем восстановление в холодные месяцы года явилось более эффективным, чем в теплые, что связано с большей однородностью синоптических процессов и лучшей пространственной связанностью температур зимой. Данные по осадкам восстанавливаются хуже, чем по температуре воздуха и в среднем для Аравийского полуострова продолжительность наблюдений за суммами месячных осадков была увеличена с 33-36 лет до 73-79 лет и даже до 98 лет для осадков мая. Наихудшее восстановление было в апреле (51 год), в декабре (50 лет) и октябре (57 лет). Наилучшее восстановление кроме мая было в январе (82 года) и феврале (79 лет). В остальные месяцы средняя продолжительность рядов после процедуры восстановления составила 68-74 года.

После процедуры восстановления вновь была осуществлена проверка полученных многолетних рядов на станциях Аравийского полуострова на однородность экстремумов и стационарность средних значений и дисперсий. В результате были сформированы откорректированные временные ряды среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков для последующего моделирования, которые, как правило, заканчивались 2011 -2012 гг.

**В Главе 3** осуществлено статистическое моделирование климатических изменений на Аравийском полуострове.

**В параграфе 3.1** дано описание методов статистического моделирования и основных видов моделей. В качестве моделей временных рядов рассматривались:

- модель стационарной выборки;
- нестационарная модель монотонных изменений в виде тренда,
- нестационарная модель ступенчатых изменений, характеризующих переходы от одного стационарного состояния к другому.

Непосредственно само моделирование временных рядов включало три основные стадии:

- расчет параметров моделей;
- оценка эффективности нестационарных моделей по отношению к стационарной;
- оценка статистической значимости нестационарных моделей по отношению к стационарной.

Параметрами стационарной модели являются среднее значение ( $Y_{cp}$ ) и среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ), определяемые по ряду наблюдений.

Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или нескольким) стационарным моделям для двух (или нескольких) частей временного ряда, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для



В целом результаты моделирования рядов среднемесячных температур воздуха можно свести в общую Табл.2, из которой следует, что:

- нестационарные модели имеют внутригодовое распределение и наибольший их процент, достигающий 60% от всех рядов, приходится на июль-август, в то время как в зимние месяцы нестационарные модели полностью отсутствуют;
- наиболее эффективной нестационарной моделью является модель ступенчатых изменений, отличие которой от стационарной в среднем достигает 15-18% в то время как эффективность модели линейного тренда достигает 11-12%;
- модель линейного тренда менее эффективна, чем ступенчатых изменений;
- ступенчатый рост температуры в большинстве случаев относится к 1980 – 1990 годам.

Таблица 2.

Средние территориальные значения  $\Delta_{стун}$  и  $\Delta_{тр}$  (в %) и процент эффективных нестационарных моделей (%) для среднемесячных температур воздуха на Аравийском полуострове.

показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{стун}$	3.3	4.2	6.1	7.4	12.5	10.5	15.2	18.0	10.6	9.5	6.2	4.8
%н	4.3	0	4.2	17.4	58.3	29.2	58.3	62.5	34.8	29.2	16.7	0
$\Delta_{тр}$	1.2	1.8	2.9	5.8	9.6	6.9	11.4	12.5	7.7	6.4	2.6	1.8
%н	0	0	4.2	13.0	41.7	25.0	41.7	50.0	26.1	20.8	8.3	0

Основной вывод из анализа пространственно-временной динамики нестационарности сводится к тому, что нестационарные модели имеют место в основном в теплый период года и более характерны для внутренних частей полуострова, а в холодный период температуры, как правило, стационарны за исключением прибрежных областей юга и запада полуострова.

В параграфе 3.3. представлены результаты моделирования климатических изменений в многолетних рядах среднегодовой температуры воздуха. Получено, что среднее отклонение модели ступенчатых изменений от стационарной модели составляет 20.6% (с максимумами до 38%) и процент эффективных моделей равен 95.8%. Для модели линейного тренда среднее отклонение от стационарности равно 17.4%, а относительное число эффективных нестационарных моделей составляет 62.5%. Поэтому среднегодовая температура воздуха существенно более нестационарна, чем любая из среднемесячных температур. Примеры нестационарных рядов среднегодовой температуры воздуха показаны на Рис.2.

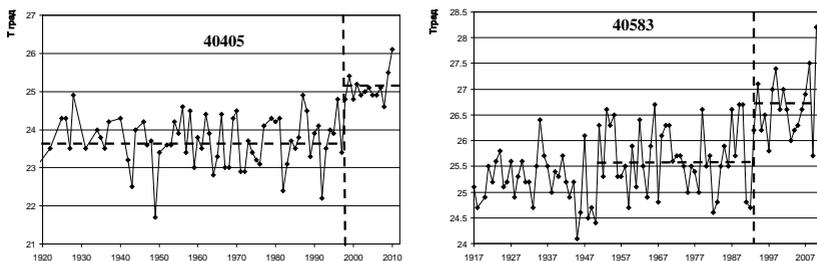


Рис.2. Примеры нестационарных моделей для станций 40405 Гасим (Саудовская Аравия) и 40583 Эль-Ахмади (Кувейт).

Большое количество нестационарных рядов среднегодовой температуры воздуха по сравнению со среднемесячными рядами можно объяснить только тем, что среднегодовая температура получена за счет процедуры осреднения среднемесячных данных, которая

является своеобразным математическим фильтром для сглаживания и исключения случайных составляющих и для выявления имеющих в них незначительных нестационарностей. Поэтому, если в среднемесячных температурах нестационарность проявляется в основном в летние месяцы, а температура зимних месяцев остается стационарной, то при суммировании 12 значений все случайные «шумовые» колебания будут отфильтрованы и выявляются только «сигналы».

Из полученных пространственных полей отклонений следует, что они практически одинаковы для обеих нестационарных моделей и стационарные модели имеют место только вдоль побережья Красного моря и крайнем востоке полуострова. Вся остальная часть Аравийского полуострова содержит нестационарные модели роста среднегодовой температуры. Причем в центральных областях этот рост обусловлен ростом температур месяцев теплого полугодия, а в южных прибрежных – ростом температур в месяцы холодного полугодия.

**В параграфе 3.4** изложены результаты моделирование климатических изменений в многолетних рядах параметров функции внутригодовых колебаний температуры воздуха. Из всех параметров функции внутригодовых колебаний нестационарным является только стандарт остатков (нестационарность практически для 50% станций), характеризующий интенсивность макросиноптических процессов. Полученные для этого параметра пространственные распределения отклонений  $\Delta\%$  от стационарной модели показывают, что наибольшая нестационарность имеет место на юге и центральных частях полуострова, а стационарность наблюдается на крайнем юго-востоке и местами вдоль побережья Красного моря.

**В параграфе 3.5** представлены результаты моделирования климатических изменений в многолетних рядах осадков. Обобщенные показатели нестационарных моделей, приведенные в Табл.3.

Таблица 3

Средние территориальные значения  $\Delta_{стун}$  и  $\Delta_{мп}$  (в %) и процент эффективных нестационарных моделей (%н) для сумм месячных осадков на Аравийском полуострове.

показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta_{стун}$	7.7	5.2	5.1	4.5	5.6	4.8	4.7	6.8	5.0	5.6	5.7	5.0
%н	12.5	5.7	7.7	0	0	12.5	3.4	10.7	5.9	11.8	5.5	0
$\Delta_{мп}$	3.2	3.6	2.8	2.3	2.4	1.8	1.9	3.5	2.2	2.5	2.7	2.0
%н	6.2	5.9	3.8	0	0	4.2	0	7.7	6.7	0	0	0

Как следует из Табл.3, средние территориальные отклонения от стационарной модели очень малы и варьируют от 4.5% до 7.7% для модели ступенчатых изменений и от 1.8% до 3.6% для модели линейного тренда. Число нестационарных рядов также мало и изменяется от 0 до 4 для модели ступенчатых изменений и от 0 до 2 для модели линейного тренда, что в процентном отношении дает до 12% и до 7% от общего числа рядов соответственно для модели ступенчатых изменений и линейного тренда. Поэтому пространственное распределение нестационарных рядов отсутствует, а нестационарность проявляется на отдельных станциях, расположенных в прибрежных районах юга и запада полуострова. Причины нестационарности не климатические, а в основном локальные: непродолжительный период наблюдений и наличие пропусков при большой естественной вариации месячных сумм осадков от 0 мм до нескольких сот мм; возможная смена приборов, особенно на территории Йемена в конце 1950х годов; локальные особенности метеостанции и погрешности в измерении осадков.

**Глава 4** является основной и посвящена установлению пространственных закономерности климатических характеристик на Аравийском полуострове

**В параграфе 4.1.** приведена методика установления пространственных закономерностей, включающая две основные части:

- определение основных расчетных климатических характеристик в виде норм, стандартных отклонений и квантилей редкой повторяемости в пунктах наблюдений;
- построение пространственной интерполяционной модели климатических норм и других показателей распределений климатических характеристик (дисперсия, квантили редкой повторяемости).

Даны методы определения параметров распределений климатических характеристик и их квантилей редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет. Для пространственной интерполяции использован метод полигонов, а для пространственного статистического моделирования – регрессионное уравнение, связывающее многолетнее климатическое поле и поле каждого года:

$$Y_{ij} = A_{ij}Y_{cpi} + A_{0j} \pm E_{ij}, \quad (7)$$

где:  $Y_{ij}$  – значение климатической характеристики на  $i$ -ой станции в  $j$ -ый год;  
 $Y_{cpi}$  – среднее многолетнее значение климатической характеристики на  $i$ -ой станции;  
 $A_{ij}$ ,  $A_{0j}$  – коэффициенты уравнения, определяемые по МНК;  $E_{ij}$  – случайные отклонения.

Коэффициент  $A_{ij}$  характеризует градиент поля,  $A_{0j}$  – уровень поля или среднее территориальное значение климатической характеристики, а стандартное отклонение остатков  $S_{Ej}$  – внутреннюю неоднородность поля в каждый  $j$ -ый год.

**В параграфе 4.2** дается анализ пространственной изменчивости расчетных характеристик среднемесячной температуры воздуха на Аравийском полуострове. Прежде всего проведена оценка устойчивости климатических норм, полученных за разные 30-летние периоды, в том числе и за период, рекомендуемый ВМО (1961-1990 гг.), начиная с 1901 г. и за весь период наблюдений. Установлено, что нормы температур растут только в летние месяцы, в то время как в другие месяцы года они остаются практически стабильными, также как и средние квадратические отклонения. Вместе с тем, даже в летние месяцы нормы температур за весь период наблюдений и за период, рекомендуемый ВМО практически не отличаются. Поэтому пространственные распределения норм среднемесячных температур были получены при их расчете за весь период наблюдений. Основные пространственные закономерности температур следующие:

- зимой наиболее высокие температуры имеют место в прибрежных южных частях Аравийского полуострова, особенно на самом юго-западе;
- начиная с весны территориальные максимумы температур начинают смещаться с юго-запада в центр и на восток полуострова и к августу – сентябрю достигают побережья Персидского залива;
- начиная с октября снова смещаются на юго-запад, достигая там максимума в январе – феврале;
- пространственный размах нормы температуры составляет до 20<sup>0</sup>С зимой и до 10<sup>0</sup>С летом;
- изменчивость многолетних колебаний температур наименьшая на юге и юго-востоке, а наибольшая на севере и в центре;
- климатические нормы температур нестабильны примерно для половины станций, хотя направленный рост норм имеет место для небольшого их числа и в основном в летний период.

Между климатическими нормами и расчетными среднемесячными температурами повторяемостью 1 раз в 100 и 200 лет (обеспеченностью 0.5%, 1% и 99%, 99.5%) были получены эффективные региональные зависимости (всего 96 зависимостей) коэффициенты корреляции которых в подавляющем большинстве случаев были  $R > 0.9$  и самыми высокими – в месяцы холодного периода года из-за более однородных условий. Построенные территориальные зависимости имеют большое практическое значение для прикладной климатологии, т.к. с одной стороны позволяют получить расчетные

климатические характеристики повторяемостью 1 раз в 100 и 200 лет для рассматриваемых станций, а с другой стороны на основе пространственных интерполяций норм и этих регрессионных зависимостей можно получить расчетные климатические характеристики в любой точке Аравийского полуострова, где наблюдения отсутствуют.

**В параграфе 4.3** рассматривается пространственная изменчивость расчетных характеристик среднегодовой температуры и параметров функции сезонных изменений. В связи с тем, что среднегодовая температура является наиболее нестационарной оценивалась взаимосвязь между климатическими нормами, полученными за весь период наблюдений и период, рекомендуемый ВМО, которая представлена тесной зависимостью с коэффициентом корреляции  $R=0.996$  и с коэффициентами  $b_1=0.996$ , т.е. практически не отличается от 1 или линия является биссектрисой прямого угла, и  $b_0=0.14$ , т.е. практически близок к 0. Получены также зависимости между расчетными климатическими характеристиками за весь период и период ВМО. Построены пространственные распределения норм и стандартных отклонений среднегодовых температур на Аравийском полуострове, из которых следует, что распределения норм температур, полученные при осреднении данных за разные периоды практически не отличаются и имеют тенденцию их уменьшения с юга на северо-запад. В то же время пространственные распределения средних квадратических отклонений отличаются уже более значительно. Если за период ВМО наблюдается один существенный минимум изменчивости на юго-западе и практически однородное поле стандартных отклонений во все центральной и северной частях полуострова, то за весь период наблюдений поле в северной части полуострова уже неоднородно, а более однородной является южная часть полуострова с небольшой изменчивостью.

При исследовании пространственных закономерностей параметров функции внутригодовых колебаний получено, что средние территориальные значения коэффициентов  $B_1$  равны 1, т.е. являются как устойчивыми во времени, так и несмещенными. Средние территориальные значения коэффициента  $B_0$  имеют небольшое отрицательное смещение для территории и во времени отличаются в 2 раза, значения параметра  $Se$  стабильны во времени и в среднем равны  $0.9^{\circ}C$ . Изменчивость же для всех этих коэффициентов остается стабильной. Пространственные распределения коэффициентов  $B_1$  и  $B_0$  практически однородны, а отдельные их локальные минимумы имеют место для  $B_1$  на севере, у Персидского залива и на юге, а для коэффициента  $B_0$  – в центральной части полуострова. Распределение параметра  $Se$  имеет пространственные закономерности роста с юга на север полуострова, т.е. интенсивность макросиноптических процессов на севере и в центре полуострова, которые соответствуют континентальному климату, больше, чем на юге и в прибрежных областях.

**В параграфе 4.4** приведены результаты исследования пространственной изменчивости расчетных характеристик месячных сумм осадков. В связи с тем, что осадки являются практически стационарной климатической характеристикой, для них эффективнее определять климатические нормы и квантили распределения вероятностей редкой повторяемости по рядам, приведенным к многолетнему периоду. Прежде всего были построены региональные зависимости, связывающие параметры и квантили, полученные за весь многолетний период и период, рекомендуемый ВМО с  $R=0.89-0.92$ , а затем были получены пространственные интерполяционные модели, основные характеристики которых приведены в Табл.4.

Таблица 4.

## Территориальные средние нормы и предельные значения осадков по месяцам на Аравийском полуострове

период	Хар-ка	Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Весь	Ср.	22.8	26.2	38.3	44.6	37.7	26.9	50.5	83.5	23.6	27.6	35.7	27.8
	Макс.	81.5	93.2	89.4	168.8	162	120	203	343	169	123	93	65.5
	Мин.	1.2	2.2	3.5	1.9	1	0.1	0.1	0.6	0.1	0.4	1.0	4.5
ВМО	Ср.	16.7	23.4	27.6	38.1	28.6	22.5	42.9	70.6	18.2	21.5	23.5	20.7
	Макс.	68	80.4	71.1	168	115	132	169	271	141	73.3	70.1	63
	Мин.	0.7	2.0	2.5	2.8	0.2	0.2	0.1	0.4	0.1	1.2	2.6	7.4

По пространственному анализу получены следующие основные выводы:

- нормы осадков остаются практически стабильными;
- в осадках таких ярко выраженных пространственных закономерностей, как в температуре воздуха не наблюдается, хотя имеет место тенденция, что в прибрежных, особенно холмистых и горных частях полуострова осадков больше, чем во внутренних;
- по территории нормы осадков изменяются в холодный период от 2 мм в прибрежных районах юга и запада до 30 мм и даже до 70 мм на северо-востоке, а в теплый, наоборот, от 0.1 – 1 мм на севере и в центральной части до 60-70 мм в прибрежных юго-западных районах;
- изменчивость осадков тем больше, чем больше абсолютные значения осадков и в холодный период года варьирует от 1-2 мм на юго-западе до 20-40 мм во внутренних и северных частях полуострова, а в теплый период: от 0.1 мм в центральной части до 20-40 мм на юго-западе.

Также как, и для температуры воздуха были построены 96 региональных зависимостей, связывающих нормы осадков с расчетными значениями редкой повторяемости. Достаточно эффективными являются зависимости, связывающие нормы с максимумами редкой повторяемости, имеющие коэффициенты корреляции в среднем  $R=0.83$  (вариация от 0.62 до 0.96) при использовании данных за весь период наблюдений и  $R=0.79$  (вариация от 0.54 до 0.95) при обобщении данных за период ВМО. Зависимости же, связывающие нормы с минимальными осадками редкой повторяемости существенно хуже при средних  $R=0.68$  за весь период наблюдений и  $R=0.57$  за период ВМО, причем минимальные значения  $R$  могут быть 0.3-0.4, что делает зависимости неэффективными. Поэтому для практических целей можно рекомендовать использовать все зависимости для расчета максимальных экстремумов и зависимости для отдельных месяцев (июнь - октябрь) при  $R>0.7$  для расчета минимальных осадков редкой повторяемости.

**В параграфе 4.5** построены пространственные статистические модели температур воздуха и осадков и осуществлен анализ из коэффициентов во времени с целью выбора наиболее эффективной модели временного ряда. Проведенный анализ стабильности параметров построенных пространственных статистических моделей температур и осадков свидетельствует о том, что они практически не изменяются во времени за исключением роста пространственного градиента поля температур и уменьшения их средних региональных значений в летние месяцы.

**В заключении** приведены следующие основные научные и практические результаты, полученные в результате выполненного регионального климатического исследования для территории Аравийского полуострова.

1. Создана региональная база данных, включающая многолетние ряды наблюдений за среднемесячными температурами воздуха на 188 метеостанциях Аравийского полуострова (36 метеостанций) и сопредельных территорий и за суммами месячных осадков на 310 метеостанциях (43 на Аравийском полуострове) со средним периодом

наблюдений 45-50 лет (20% станций имеют период наблюдений более 70 лет) и с включением последних лет наблюдений (2011-2012 гг.) примерно на 20% станций.

2. Проведен анализ качества и однородности информации в региональной базе данных на основе статистических критериев и выявлены отдельные случаи неоднородных экстремумов и нестационарности средних значений и дисперсий, связанные в основном с пропусками наблюдений и недостаточной продолжительностью рядов. Осуществлено восстановление пропусков наблюдений и приведение непродолжительных рядов к многолетнему периоду в результате чего средний период наблюдений в 39-41 год для среднемесячной температуры воздуха на Аравийском полуострове удалось увеличить до 96 (август) – 116 (февраль) лет, причем восстановление в холодные месяцы года явилось более эффективным, чем в теплые, что связано с большей однородностью синоптических процессов и лучшей пространственной связанностью температур зимой. Данные по осадкам восстанавливались хуже, чем по температуре воздуха и в среднем для Аравийского полуострова продолжительность наблюдений за суммами месячных осадков была увеличена с 33-36 лет до 73-79 лет. После восстановления вновь был проведен анализ однородности данных и сформирована база непрерывных многолетних рядов для моделирования, включающих большую часть 20 века и начало 21 века.

3. На основе выполненного статистического моделирования временных рядов при сравнении модели стационарной выборки с нестационарными моделями линейного тренда и ступенчатых изменений для среднемесячных температур воздуха получено, что процент нестационарных моделей по территории изменяется от 0% зимой до 60% в июне-августе. Наиболее эффективной нестационарной моделью является модель ступенчатых изменений, отличие которой от стационарной в среднем достигает 15-18% (с максимумами до 30-32%) в то время как эффективность модели линейного тренда достигает 11-12% (с максимумами также до 30-33%). В теплый период нестационарные модели более характерны для внутренних частей полуострова, а в холодный – в отдельных прибрежных областях юга и запада полуострова.

4. Для среднегодовой температуры среднее отклонение модели ступенчатых изменений от стационарной модели составляет 20.6% (с максимумами до 38%) и процент эффективных моделей равен 95.8%. Для модели линейного тренда среднее отклонение от стационарности равно 17.4%, а относительное число эффективных нестационарных моделей составляет 62.5%. Поэтому среднегодовая температура воздуха существенно более нестационарна, чем любая из среднемесячных температур, что обусловлено процедурой осреднения и фильтрации случайных составляющих в каждом из 12 рядов среднемесячных температур и в выделении климатического «сигнала» летних месяцев. Стационарные модели имеют место только вдоль побережья Красного моря и на крайнем востоке полуострова. Вся остальная часть Аравийского полуострова содержит нестационарные модели роста среднегодовой температуры. Причем в центральных областях этот рост обусловлен ростом температур месяцев теплового полугодия, а в южных прибрежных – ростом температур в месяцы холодного полугодия.

5. Проведенное моделирование для параметров функции внутригодовых колебаний температуры воздуха показало, что процент нестационарных рядов составляет для коэффициента  $B_1$  - 12.5% и 4.2% для моделей ступенчатых изменений и линейного тренда, для коэффициента  $B_0$  наименьший и для обеих моделей равен 4.2%, т.е. имеет место только для одной метеостанции и для параметра  $Se$  процент нестационарности наибольший и составляет соответственно 45.8% и 20.8%. При этом, наибольшая нестационарность интенсивности макросиноптических процессов  $Se$  имеет место на юге и центральных частях полуострова, а стационарность наблюдается на крайнем юго-востоке и местами вдоль побережья Красного моря.

6. Для рядов месячных сумм осадков средние территориальные отклонения от стационарной модели очень малы и варьируют от 4.5% до 7.7% для модели ступенчатых изменений и от 1.8% до 3.6% для модели линейного тренда. Число нестационарных рядов

также мало и изменяется от 0 до 4 для модели ступенчатых изменений и от 0 до 2 для модели линейного тренда, что в процентном отношении дает до 12% и до 7% от общего числа рядов. Поэтому пространственное распределение нестационарных рядов отсутствует, а нестационарность проявляется на отдельных станциях, расположенных в прибрежных районах юга и запада полуострова и обусловлена локальными, а не климатическими причинами.

7. Для оценки возможных будущих изменений температуры воздуха на Аравийском полуострове из мультимодельных наборов данных проектов СМIP3 и СМIP5, размещенных в Интернете, были выбраны результаты 4х климатических моделей и 2х климатических сценариев до конца 21-го века и данные наблюдений на трех метеостанциях, находящихся в разных частях полуострова (север, центр и юг). Сравнение данных наблюдений и моделирования за совместный период дало невысокие коэффициенты корреляции (максимум 0.60-0.72) и превышение климатических норм по модельным данным до 2-5<sup>0</sup>С в зависимости от месяца и периода осреднения на метеостанции Эр-Риад и до 1-3<sup>0</sup>С – на метеостанции Аден. Анализ модельных данных за будущий период с 2014 г. по 2100 г. показал, что рост средних температур за 30-летние отрезки времени или очень мал (до 0.5<sup>0</sup>С на метеостанции Аден) или практически отсутствует (метеостанция Эр-Риад) по сценариям СМIP3, хотя по СМIP5 ожидается рост до 5<sup>0</sup>С на метеостанции Аден в июне.

8. Помимо подтверждения известных климатических закономерностей, что на Аравийском полуострове зимой теплее прибрежные области, а летом – внутренние пустынные, получены численные значения пространственного размаха нормы температуры, составляющие до 20<sup>0</sup>С зимой и до 10<sup>0</sup>С летом; установлено, что изменчивость многолетних колебаний температур наименьшая на юге и юго-востоке, а наибольшая – на севере и в центре; климатические нормы температур нестабильны примерно для половины станций, хотя направленный рост норм имеет место для небольшого их числа и в основном в летний период.

9. Осадков чуть больше в прибрежных, особенно холмистых и горных частях полуострова, чем во внутренних и по территории они изменяются в холодный период от 2 мм в прибрежных районах юга и запада до 30 мм и даже до 70 мм на северо-востоке, а в теплый, наоборот, от 0.1 – 1 мм на севере и в центральной части до 60-70 мм в прибрежных юго-западных районах; изменчивость осадков зависит от абсолютной величины и достигает до 50% от их нормы, в то время как сами нормы осадков остаются практически стабильными

10. Получены очень тесные территориальные зависимости между средними значениями температур и температурами редкой повторяемости (раз в 100 и 200 лет) с коэффициентами корреляции более 0.9 для большинства месяцев. Они имеют большое практическое значение для прикладной климатологии, т.к. с одной стороны позволяют получить расчетные климатические характеристики редкой повторяемостью для рассматриваемых станций, а с другой стороны на основе пространственных интерполяций норм и этих регрессионных зависимостей можно получить расчетные климатические характеристики в любой точке Аравийского полуострова, где наблюдения отсутствуют.

11. Для месячных сумм осадков получены эффективные территориальные зависимости, связывающие нормы с максимумами редкой повторяемости, с коэффициентами корреляции в среднем R=0.83 (вариация от 0.62 до 0.96) при использовании данных за весь период наблюдений и R=0.79 (вариация от 0.54 до 0.95) при обобщении данных за период ВМО (1961-1990 гг.). Зависимости же, связывающие нормы с минимальными осадками редкой повторяемости существенно хуже при средних R=0.68 за весь период наблюдений и R=0.57 за период ВМО, причем минимальные значения R могут быть 0.3-0.4, что делает зависимости неэффективными.

12. Построены пространственные статистические модели для среднемесячных и среднегодовых температур воздуха, параметров внутригодовых изменений температуры и

месячных сумм осадков и осуществлено моделирование временных рядов их коэффициентов. В результате проведенного анализа стабильности параметров пространственных статистических моделей температур получено, что они практически не изменяются во времени за исключением роста пространственного градиента поля температур и уменьшения их средних региональных значений в летние месяцы. Поэтому можно считать, что для летних месяцев в последние годы градиент пространственного поля температур стал больше. Параметр же  $A_0$  для июля, характеризующий среднюю региональную температуру, наоборот уменьшился с начала 1980х годов. Нестационарность пространственного градиента осадков (параметр  $A_1$ ) имеет место в основном в феврале и ноябре и связано с его уменьшением, т.е. поле осадков в эти месяцы становится более равномерным.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Шукри Омар А.А. Современные климатические изменения температуры воздуха и осадков в Йемене и прилегающих территориях // Ученые записки РГГМУ, 2011, с.86-94.
2. Шукри Омар Абдулхаким Али Климатические сценарии и их применимость для оценки будущих изменений климата на Аравийском полуострове// Ученые записки РГГМУ, 2013, №29, С.110-124.
3. Лобанов В.А., Задорожный С.П., Молдован Н.В., Шадурский А.Е., Шукри Омар А. Информация и методы для оценки устойчивости расчетных гидрометеорологических характеристик при инженерных изысканиях //Инженерные изыскания. Всероссийский научно – аналитический журнал, октябрь 10/2011, с.52-58.
4. В. А. Лобанов, Омар А.А. Шукри Оценка климатических изменений температуры воздуха и осадков на Аравийском полуострове. Ученые записки РГГМУ, 2014 №37, с.85-96.
5. В. А. Лобанов, Омар А.А. Шукри Моделирование пространственных климатических изменений на Аравийском полуострове. Ученые записки РГГМУ, 2015, №38, с. 45-54.

#### Другие публикации за период подготовки диссертации:

1. Лобанов В.А., А.Л.Кандове, О.А.А.Шукри Методические указания по выполнению лабораторной работы: «Сценарные оценки будущего климата на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана и данных проекта СМIP5». РГГМУ, Санкт-Петербург, 2015. – 31 с. (в печати).
2. Shukri O. A. Modern climate changes in air temperature and precipitation in Yemen and neighboring areas // Abstracts of 11<sup>th</sup> International Precipitation Conference, 2013 the Netherlands, p.112.
3. V.A. Lobanov, O.A. Shukri Statistical methods for analysis and modeling of climate change in the Arabian Peninsula. // Abstracts of STAHY2014 workshop, 10-11 November 2014, Abu-Dhabi, p.73.