

О.А.А. Шукри, В.А. Лобанов, М.С. Хамид

=====

**Современный и будущий климат
Аравийского полуострова**



**Санкт-Петербург
2018**

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

О.А.А. Шукри, В.А. Лобанов, М.С. Хамид

СОВРЕМЕННЫЙ И БУДУЩИЙ КЛИМАТ АРАВИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Монография

Санкт-Петербург

2018

УДК 551.51
ББК
Л68

Рецензент:

А.Е. Шадурский, к-т геогр. наук, вед. специалист
АО «АТОМПРОЕКТ» госкорпорации «Росатом»

Шукри О.А.А., Лобанов В.А., Хамид М.С.

Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография – СПб.: РГГМУ, 2018. – 190 с.

В монографии выполнено исследование по оценке современных климатических изменений температур воздуха и осадков на Аравийском полуострове и определению будущих проекций температур до конца XXI столетия на основе моделей климата. Для решения поставленной задачи сформирована база данных, выполнен анализ ее качества и однородности. Рассчитанные параметры отличия нестационарных моделей от модели стационарной выборки картированы по территории и определены области нестационарности. Получены расчетные климатические характеристики и обобщены по территории Аравийского полуострова. Разработана и реализована методика оценки проекций климатических характеристик с учетом влияния локальных факторов.

Предназначена специалистам гидрометеорологам, инженерам, аспирантам, магистрам и студентам.

Shukri O.A.A., Lobanov V.A., Hamid M.S.

The modern and future climate of the Arabian Peninsula. Monograph – St.Petersburg: ed. RSHU, 2018. – 190 pp.

The monograph studies the modern climate changes in air temperatures and precipitation in the Arabian Peninsula and determines the future temperature projections up to the end of the 21st century on the basis of climate models. To solve the task, a database was created, an analysis of its quality and homogeneity was carried out. The calculated parameters of the differences between non-stationary models from the stationary sample model are mapped over the territory and the regions of nonstationarity are determined. Calculated climatic characteristics are obtained and generalized on the territory of the Arabian Peninsula. A methodology for estimating the projections of climatic characteristics was developed and realized, taking into account the influence of local factors.

The book is intended for specialists in hydrometeorology, engineers, post graduate students, masters and students.

ISBN ISBN 978-5-86813-452-4

© Шукри О.А.А., Лобанов В.А., Хамид М.С. 2018
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Обзор современных климатических изменений на Аравийском полуострове.....	8
1.1 Особенности климатических условий Аравийского полуострова.....	8
1.2. Обзор результатов исследований современных климатических изменений на Аравийском полуострове.....	12
1.3. Оценки будущего климата на основе сценариев и моделей общей циркуляции атмосферы.....	22
1.4. Применяемая методика исследований и ее обоснование.....	35
Глава 2.Формирование региональной климатической базы данных.....	39
2.1. Выбор пунктов наблюдений и информации.....	39
2.2.Формирование региональной базы данных многолетних рядов температур воздуха и осадков.....	41
2.3.Состав и информационные особенности региональной климатической базы данных.....	43
Глава 3. Анализ качества исходной информации и ее подготовка для статистического моделирования.....	50
3.1. Методы оценки однородности и стационарности.....	50
3.2. Результаты оценки однородности и стационарности.....	55
3.3. Методика восстановления пропусков наблюдений и увеличения продолжительности рядов.....	70
3.4. Результаты восстановления данных и формирования многолетних рядов для моделирования.....	73
Глава 4. Статистическое моделирование климатических изменений на Аравийском полуострове.....	83
4.1. Методы статистического моделирования и основные виды моделей.....	83
4.2. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах среднемесячной температуры воздуха....	89
4.3. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах среднегодовой температуры воздуха.....	99
4.4. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах параметров функции внутригодовых	

колебаний температуры воздуха.....	102
4.5. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах осадков.....	105
4.6. Оценка устойчивости полученных изменений.....	110
Глава 5. Моделирование пространственных климатических изменений на Аравийском полуострове.....	119
5.1. Методика пространственной классификации климатических изменений и пространственного моделирова- ния.....	119
5.2. Пространственная изменчивость расчетных характеристик среднемесячной температуры воздуха на Аравийском полуострове.....	126
5.3. Пространственная изменчивость расчетных характеристик среднегодовой температуры и параметров функции сезонных изменений на Аравийском полуострове....	140
5.4. Пространственная изменчивость расчетных характеристик месячных сумм осадков на Аравийском полуострове.....	146
5.5. Пространственные статистические модели температур воздуха и осадков.....	155
Глава 6. Оценка будущего климата Аравийского полуострова	164
6.1. Методика оценки будущего климата.....	164
6.2. Выбор эффективной климатической модели для оценки будущего климата.....	167
6.3. Результаты оценки будущих норм температур на станциях Аравийского полуострова.....	169
Заключение.....	176
Литература.....	181

ВВЕДЕНИЕ

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. Главные климатические характеристики, которые подлежат исследованию - это 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 использу-

ются при проектирование 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 и наблюдаемых данных.

В основе проведенного 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 преимущества нестационарных моделей оценивалась 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.

ГЛАВА 1.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА АРАВИЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

1.1. Особенности климатических условий Аравийского полуострова

Аравийский полуостров (от древнееврейского «араба» - пустыня) находится на юго-западе Азии, занимает площадь около 3,1 млн. км² и является самым большим на планете. Омывается на западе Красным морем, на юге - Аденским заливом и Аравийским морем, на востоке - Оманским и Персидским заливами Индийского океана. На Аравийском полуострове расположены следующие государства: Бахрейн, Йемен, Катар, Кувейт, Объединенные Арабские Эмираты (ОАЭ), Оман и Саудовская Аравия (СА).

Аравийский полуостров расположен между 12° и 30° с.ш. и 35° и 60° в.д. Регион характеризуется многообразными природными условиями и различной геофизической структурой (рис. 1.1). Преобладают равнины и плато на западе, а на юге и востоке - горы (высота до 3600 м). Большая часть территории занята полупустынями и пустынями (Руб-эль-Хали, Дехна, Нефуд, Тихама и др.), которые составляют около 89 % территории.

Более 50 млн. лет Аравийский полуостров был одним целым с африканским континентом. Но после того как образовалась открытая рифтовая зона, а вдоль нее Красное море – полуостров начал отдаляться от побережья Африки. Мощная геологическая сила способствовала образованию нагорья, обрамляющего новообразовавшееся побережье. Вдоль всего побережья Красного моря вырос пояс нагорий, достигающих самых больших высот в северном Йемене. Несколько вершин здесь поднимаются до высоты 3000 м, доминирует им Джабал ан-Наби Шуяб (3766 м) – самая высокая гора Аравийского полуострова.

Климат Аравийского полуострова - один из наиболее неблагоприятных для человека [58,61]: 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. Территория рас-

положена в засушливых районах, на севере которых климат умеренный с максимумом зимних осадков, и тропический климат - на юге.



Рис. 1.1. Аравийский полуостров: космический снимок, географическая и политическая карты

Абсолютный максимум температуры летом достигает $+50^{\circ}\text{C}$ в пустынях, зимние температуры колеблются от $+11$ - $+20^{\circ}\text{C}$ в

континентальной части полуострова до $+19 - +28^{\circ}\text{C}$ на побережье Красного моря и $+11 - +17^{\circ}\text{C}$ на побережье Персидского залива. Абсолютные минимальные температуры зафиксированы в Кувейте (-2°C) и в Аль-Хафджи (-6°C). Климат южной и средней частей региона - тропический пассатный. Побережье Красного моря принадлежит к самым жарким и душным местам земного шара. Температура здесь никогда не опускается ниже 15°C и часто превышает 45°C . Климат внутренних районов сухой и континентальный (в июне средняя температура 30°C , в январе 10°C) [37]. В пустыне Руб-эль-Хали дует губительный горячий ветер самум, повышающий температуру до 50°C , а относительная влажность при этом приближается к нулю.

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. Длительные засухи и пыльные бури являются привычными явлениями. Большую часть года Аравийский полуостров находится под воздействием Азорского субтропического максимума давления, влияние которого распространяется на север вплоть до Южной Сирии [42, 81, 99]. Вследствие этого на западе полуострова и над Красным морем преобладают ветры северного и северо-западного направлений, которые только в зимний период меняются на восточные, несущие воздух из Центральной Азии. В течение всего года условия циркуляции воздушных масс не благоприятствуют выпадению осадков [44]. Только на крайнем севере намечается переход к кратковременному периоду зимних дождей, связанных с прохождением полярного фронта, а на крайнем юго-западе осадки, приносимые ветрами муссонного характера, выпадают в летнее время. Основную влагу летний муссон теряет, проходя над Эфиопией [53]. Летом на южном побережье Аравийского полуострова наблюдается перенос воздушных масс с запада (летний муссон) [103, 111]. В некоторых районах по несколько лет подряд не бывает ни одного дождя, а временами случаются непродолжительные ливни, в течение которых может выпасть несколько десятков миллиметров влаги [43]. Почти повсюду эти случайные дожди приходятся на зимнее время года. В горах внутренних ча-

стей Аравийского полуострова выпадает мало дождей, и они так же пустынно, как и равнины [89].

На рис.1.2 приведены внутригодовые распределения максимальных и минимальных температур и осадков на 6 метеостанциях Аравийского полуострова, находящихся в разных его частях, как показано на рис.1.1 [84].

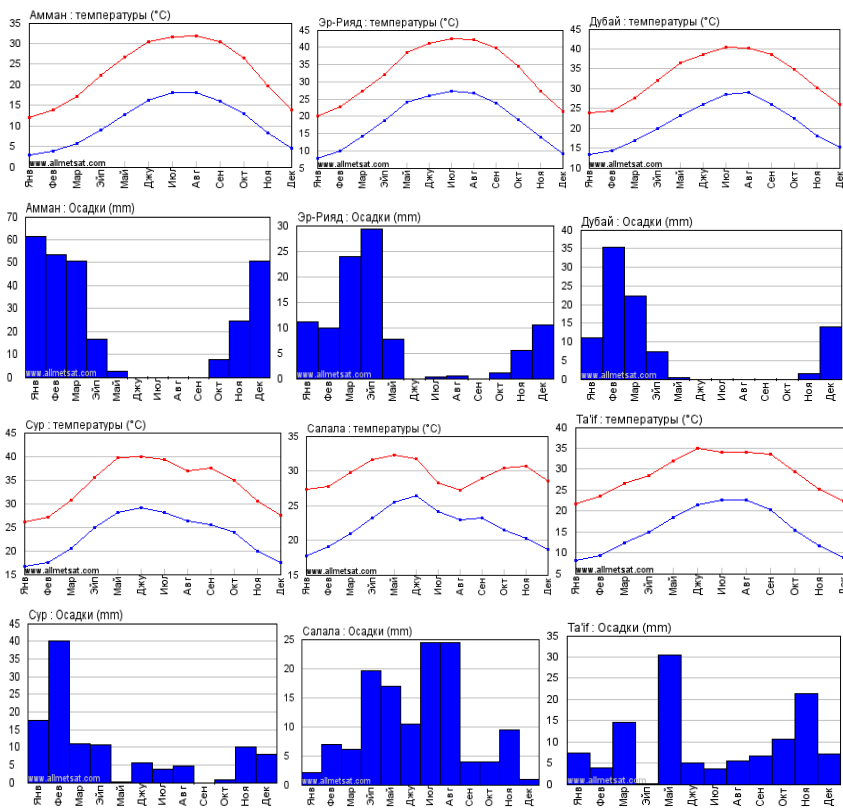


Рис. 1.2. Внутригодовые распределения температур воздуха и осадков на метеостанциях Аравийского полуострова

Из рассмотрения графиков 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°C), а наибольшие в центральных пустынных районах и вблизи Персидского залива (до 40-44°C).

Амплитуда годового хода температур изменяется от 4-10°C в прибрежных, особенно южных районах, до 20-24°C на севере и в центральной части полуострова.

1.2. Краткий обзор результатов исследований современных климатических изменений на Земле и на Аравийском полуострове

К факторам изменения климата по степени их значимости можно отнести следующие.

1) Изменение концентрации парниковых газов в атмосфере. Парниковые газы (углекислый газ, водяной пар, метан и другие) удерживают инфракрасное излучение, идущее от поверхности Земли, препятствуя его рассеянию в космосе. В течение XX века концентрация углекислого газа в атмосфере выросла на четверть. Пока нет полной уверенности, связано ли это с деятельностью человека или является естественным процессом, однако количество аргументов в пользу этой версии растет. В частности, в конце 2007 года Нобелевская премия мира была присуждена Межправительственной группе экспертов по измерениям климата (IPCC), работы которой обосновывают преимущественно антропогенную природу глобального потепления.

2) Изменение ландшафтов. От характера земной поверхности и растительности на ней зависит количество рассеиваемого (отражаемого) ими излучения и, в конечном счете, альбедо Земли. Существенное влияние на ландшафт оказывают сельское хозяйство и урбанизация.

3) Перестройка океанических течений. Морские течения играют большую роль в перераспределении тепла от тропических поясов Земли к умеренным и полярным. Перестройку течений может вызываться изменениями солености и температуры отдельных

участков Мирового океана. Также картина глобальной циркуляции океана меняется из-за движения континентов.

4) Изменение светимости Солнца. Сейчас количество энергии, поступающей от Солнца, колеблется очень незначительно (примерно на 0,1%). Однако нельзя исключить более значительных колебаний на длительных отрезках времени.

5) Мощные взрывы на поверхности Земли. Падения астероидов, крупные вулканические извержения, ядерные взрывы приводят к выбросу аэрозолей в стратосферу, которые поглощают солнечное тепло, не пропуская его к поверхности, а пыль в тропосфере увеличивает облачность, которая отражает солнечный свет в космос. Вместе эти эффекты могут привести к так называемой «ядерной зиме» продолжительностью от нескольких месяцев до десятков лет.

6) Колебания наклона земной оси. Наклон земной оси к плоскости орбиты составляет $23,5^\circ$ и испытывает колебания величиной 1° за десятки и сотни тысяч лет. Эти изменения влияют на температурный контраст между высокими и низкими широтами.

7) Вариации радиуса земной орбиты. Под влиянием гравитационных возмущений других планет среднее расстояние от Земли до Солнца может меняться в масштабе порядка 100 млн. лет. Это влияет на инсоляцию (количество получаемого от Солнца тепла).

8) Вариации эксцентриситета земной орбиты. По тем же причинам долгопериодические колебания испытывает вытянутость земной орбиты. Это влияет на температурный контраст между полушариями. В наше время из-за эллиптичности орбиты расстояние от Земли до Солнца меняется в течение года на 3,4%, а количество получаемого тепла - на 7%. Максимум приходится на январь, минимум — на июль. В Северном полушарии это уменьшает сезонные климатические колебания, а в Южном — увеличивает.

9) Переполусовка земного магнитного поля. В среднем раз в четверть миллиона лет магнитное поле Земли меняет полярность (правда, последняя такая переполусовка произошла 780 тысяч лет назад). В момент смены полярности атмосфера в меньшей мере защищена от действия солнечного ветра и космических лучей.

10) Флуктуации интенсивности космических лучей. Космические лучи ионизируют атомы в атмосфере Земли. Ионы служат

центрами конденсации водяного пара и способствуют образованию облаков, что повышает альбедо Земли. Интенсивность космических лучей меняется при движении Солнечной системы по Галактике.

11) Движение тектонических плит. Континентальные плиты движутся со скоростью несколько сантиметров в год. За время порядка 100 миллионов лет размещение континентов по поверхности планеты радикально меняется. Время от времени все плиты объединяются в один огромный суперконтинент (Пангея, Гондвана и др.), на большей части которого устанавливается резко континентальный климат, что приводит к опустыниванию.

Все эти факторы вносят разный вклад в изменения климата и имеют разные временные масштабы колебаний, формирующих весь диапазон изменений климата от межгодовой изменчивости до циклических колебаний в десятки, сотни тысяч и миллионы лет, обусловленных космическими и геофизическими факторами [84, 85]. По последним сведениям из 5-го доклада МГЭИК [86], основные факторы климата вносят следующие вклады в его колебания, как показано на рис.1.3, где в аномалиях температуры (°C) приводятся:

а) наблюдаемая глобальная температура воздуха за период с 1890 по 2010 гг. по данным реанализа Хадлей Центра [128] (черная линия) и ее сглаживание по данным Lean [100, 101, 102] (красная линия), Lockwood [104,105,106,107] (розовая линия), Folland [67] (зеленая линия), Kaufmann [93, 94, 95] (голубая линия);

б) индекс Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК);

с) вулканическая активность;

д) колебания приходящей солнечной радиации;

е) антропогенные воздействия;

ф) другие факторы, включая межгодовые атлантические колебания (Folland [67]), колебания в 17,5 лет и полугодовые колебания, индекс Арктического колебания (Lean [100], Lockwood [106], Lean and Rind [102], Folland [67], Kaufmann [93], Imbers et al. [82]).

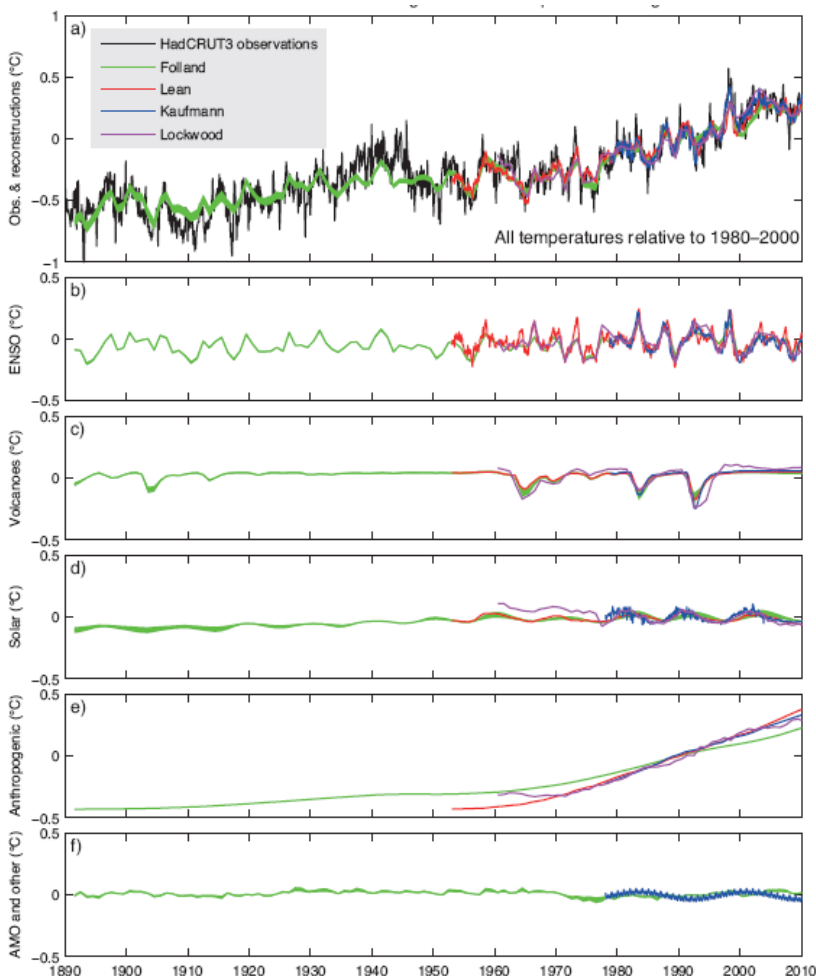


Рис. 1.3. Аномалии колебания глобальной температуры и основных формирующих ее факторов

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 повышение – антропогенными [52, 79, 83, 91, 92]. Причем, в последние годы, как видно из рис.1.3, глобальная температура несколько стабилизировалась, что обусловлено уменьшением в приходящей солнеч-

ной радиации и индекса ЭНЮК [49, 73, 108, 109, 112, 115, 121, 132, 137]. Разделение глобальной температуры воздуха и ее тенденций в виде трендов на естественную и антропогенную компоненту показано на рис.1.4.

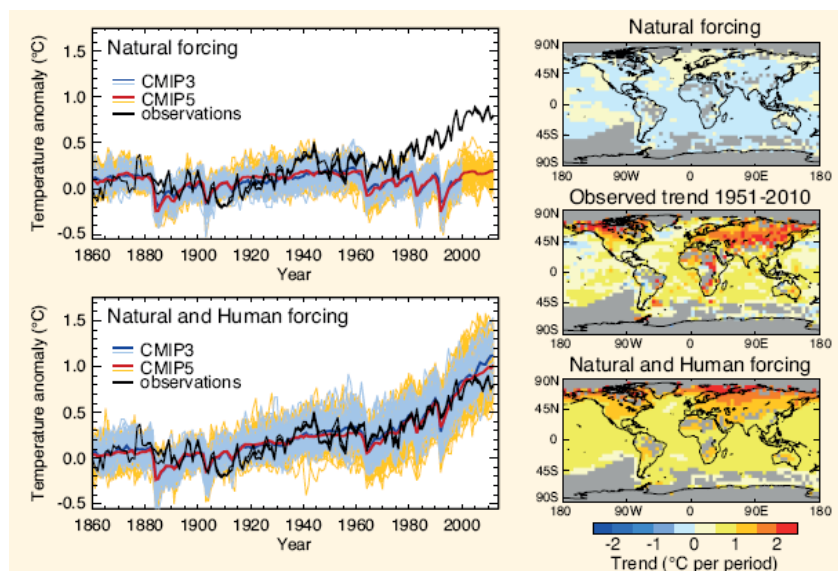


Рис. 1.4. Разделение колебаний глобальной температуры и пространственного распределения трендов на естественные и антропогенные составляющие

На рис.1.4 на левых графиках показаны аномалии глобальной температуры воздуха (в °C) за период 1860 – 2010 гг. с учетом моделирования только естественных факторов (верхний график) и за счет совместного воздействия естественных и антропогенных факторов (нижний график), по данным наблюдений (черная линия) и по данным двух ансамблей климатических моделей (CMIP3 – синяя линия для среднего и голубая полоса для всех моделей и CMIP5 – красная линия для среднего ансамблевого значения и желтая полоса для диапазона, полученного по всем моделям) [70, 71, 76, 13]. Из рассмотрения графиков следует, в последнее десятилетие среднеансамблевые значения дают завышенные результаты по отношению к глобальной температуре, хотя последние данные по CMIP5 им больше соответствуют. В целом же за весь период наблюдений модели достаточно эффективно воспроизводят колебания глобальной

температуры и поэтому можно считать, что рост температуры с начала 1960х годов обусловлен практически только антропогенным фактором. На правых схемах рис.1.4 показано пространственное распределение температурных трендов (в °С за период) по Земному шару только за счет естественных факторов по данным моделирования на основе ансамбля моделей СМIP5 (верхний рисунок) [128], по данным наблюдений (реанализ) за период 1951-2010 гг. (средний рисунок) [123, 127] и в суммарной смоделированной температуре за счет естественных и антропогенных факторов (нижний рисунок). Из рассмотрения и сопоставления рисунков правой части следует, что по данным моделей рост температуры увеличивается от средних широт к высоким, в то время как по данным наблюдений такой закономерности явно не наблюдается и значительные тренды роста температуры имеют место на всех широтах, хотя и выражены локально. На территории Аравийского полуострова, как следует из правого среднего рисунка, имеют место и области отсутствия трендов и области повышения температуры, в том числе и значительно-го [45, 46].

Пространственные тренды в осадках, как следует из того же, 5-го доклада МГЭИК [86], еще в большей степени неоднозначны и локализованы и зависят от широты и времени года [51, 114].

По результатам 5-го доклада МГЭИК также следует, что при современном изменении климата учащаются и аномальные явления [77, 78]. Так в заявлении ВМО о состоянии глобального климата в 2013 г. [10] сказано, что в период с 10 по 15 декабря редчайшая снежная буря обрушилась на отдельные районы Ближнего Востока. В Египте снег выпал в Каире впервые за 112 лет. В Сирийской Арабской Республике, Иордании и Израиле также выпало беспрецедентное количество снега. Буре сопутствовала холодная погода. Так в Шоубаке, Иордания, 15 декабря температура упала до -16°C и такой низкой температуры не было зафиксировано никогда ранее.

Детальный анализ климатических изменений годовых температур воздуха и осадков на Аравийском полуострове за последние 30 лет был проведен в работе [110]. Для этой цели рассматривались данные реанализа [16] в узлах регулярной сетки на территории Саудовской Аравии [47, 59], площадь которой составляет

80% от площади всего полуострова, полученные по наблюдениям на 27 метеостанциях (рис.1.5).

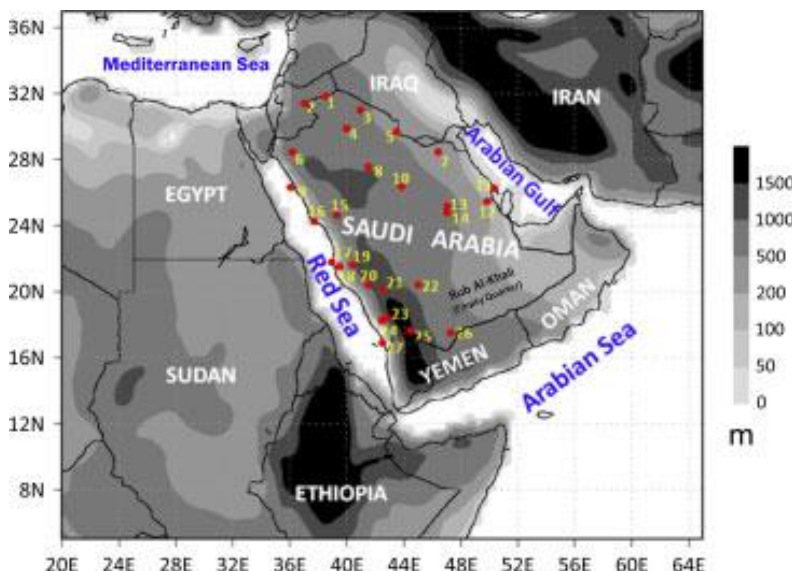


Рис. 1.5. Гипсографическая карта Аравийского полуострова с пунктами наблюдений (красные точки) и их номерами

Данные по осадкам охватывали как очень сухие области с осадками 40-80 мм в год (пустынная область Руб аль-Хали), сухие с годовыми осадками 80-150 мм в центре и на севере и влажные районы с осадками более 150 мм на юго-западе полуострова. Среднегодовые температуры варьировали от относительно высоких (24–27°C) в центре и на юге полуострова до низких (<21°C) на северо-западе и юго-западе. В результате исследования получено, что осадки во второй половине рассматриваемого периода имеют тенденцию к падению со скоростью 47,8 мм за десятилетие, но с большой межгодовой изменчивостью. В то же время максимальные, средние и минимальные годовые температуры увеличились со скоростью соответственно 0,71, 0,60 и 0,48°C за десятилетие [117]. Пространственные распределения полученных скоростей трендов или аномалий за десятилетия (в процентах для осадков и в °C для температур) показаны на рис.1.6.

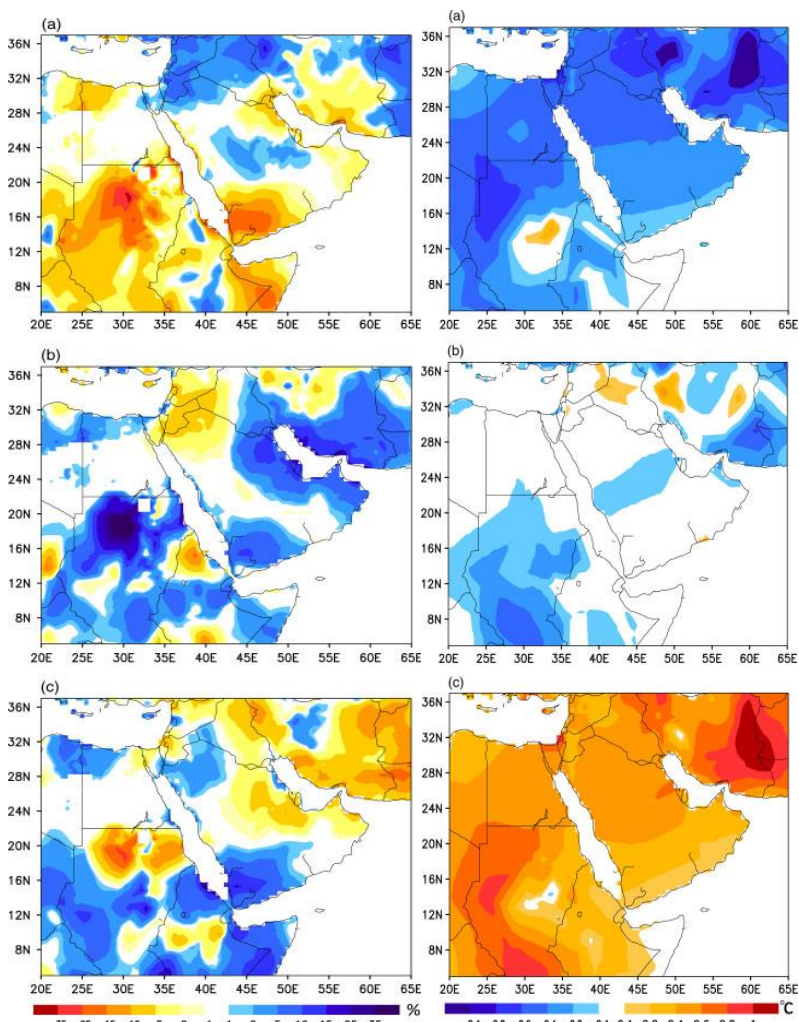


Рис. 1.6. Пространственные распределения аномалий осадков (слева) и среднегодовых температур (справа) за три отдельных десятилетия (сверху вниз): 1980-1989 гг., 1990-1999 гг., 2000-2009 гг. по отношению к базовому периоду 1979-2009 гг.

Из рассмотрения пространственных распределений следует, что по температуре десятилетие 1980-1989 гг. было аномально холодным, десятилетие 1990-1999 гг. – средним, а последнее десятилетие 2000-2009 гг. – аномально теплым, причем наибольшие по-

ложительные 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. Так, в первое десятилетие отрицательные аномалии осадков наблюдаются на севере и в центре полуострова, а положительные – на юго-западе. В последнее же десятилетие отрицательные аномалии имеют место на юго-западе и севере, а положительные – в центре и на востоке. Кроме того, имеют место достаточно обширные области, где осадки совсем не изменяются [64].

Более детальный анализ среднемесячных и экстремальных температур воздуха и месячных сумм осадков по всему Аравийскому полуострову проведен в работе [122], где применялся также метод тренд-анализа для данных на 21 станции за последние 2–3 десятилетия. Для среднегодовой температуры ее статистически значимый рост установлен на 14 станциях и только для станции Сииб получено статистически значимое похолодание. Причем наибольшая скорость потепления составляла $1,03^{\circ}\text{C}$ за десятилетие на метеостанции Сур (Оман) и $0,81^{\circ}\text{C}$ на метеостанции Дубай. Потепление среднегодовой температуры в основном обусловлено трендами роста в марте и апреле, а наибольшая скорость среднегодового потепления составляет $1,47^{\circ}\text{C}$ за десятилетие и наблюдается в мае на метеостанции Сур. Рост максимальных месячных температур имеет место на 12 станциях из 21 и наибольшие тренды наблюдаются на востоке и юго-востоке полуострова [118]. Только юго-запад полуострова и Оманский залив не дают повышения температуры. Наибольшая скорость роста максимальной месячной температуры имеет место в марте на станции Бахрейн ($2,27^{\circ}\text{C}$ за десятилетие). Минимальные месячные температуры растут на 16 станциях с наибольшей скоростью $1,24^{\circ}\text{C}$ за десятилетие в Дубаи в октябре. Максимальные суточные температуры уменьшаются на 6 станциях и растут на 3 станциях.

Тренды в годовых суммах осадков статистически значимы только на двух метеостанциях и показывают их уменьшение [98].

Непосредственно антропогенный вклад в эмиссию CO_2 на душу населения для отдельных стран Ближнего Востока в сравнении с другими странами (США, ЕС, Россия, Китай, Египет, Турция) приведен на рис.1.7 [126].

Как следует из рисунка, страны имеющие большую площадь, небольшое население и высокую долю в добыче нефти (Объединенные Арабские Эмираты, Кувейт, Саудовская Аравия) дают наибольший вклад в эмиссию углекислого газа на планете, даже больше, чем наиболее промышленно развитые страны [69, 130, 133, 138].

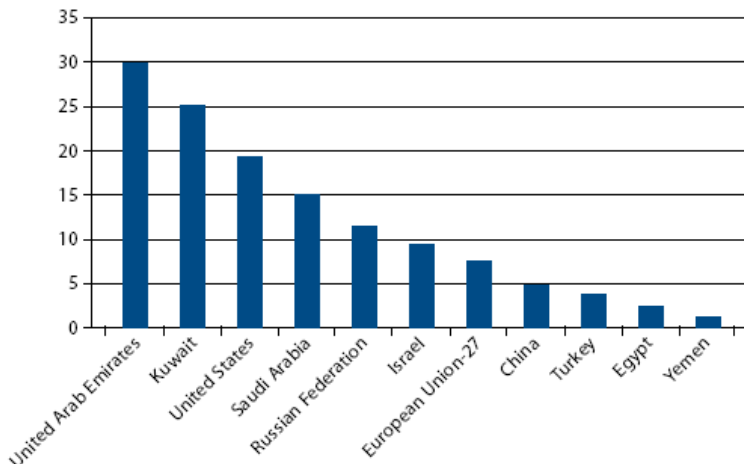


Рис. 1.7. Вклад отдельных стран Ближнего Востока и других стран мира в эмиссию углекислого газа

Помимо изменений стандартных климатических характеристик для территории Аравийского полуострова важна также оценка повышения уровня мирового океана при современном потеплении климата, т.к. полуостров с трех сторон омывается водами Красного и Аравийского морей и Персидского залива. Диаграмма, показывающая процент воздействия повышения уровня океана по отношению к численности населения для отдельных стран Аравийского полуострова и северной Африки приведена на рис.1.8. Из диаграммы следует, что наибольший ущерб от повышения уровня моря из стран Арабского полуострова будут испытывать Объединенные Арабские Эмираты и Катар. В Арабских Эмиратах влияние повышения уровня моря на 1 м уже будет испытывать на себе почти 5% населения страны, а на 4 м – 10% населения. Наименьший процент воздействия от повышения уровня моря будет наблюдаться в Йемене – всего около 1,5% даже при подъеме уровня на 5 м [60,74,90,125,126].

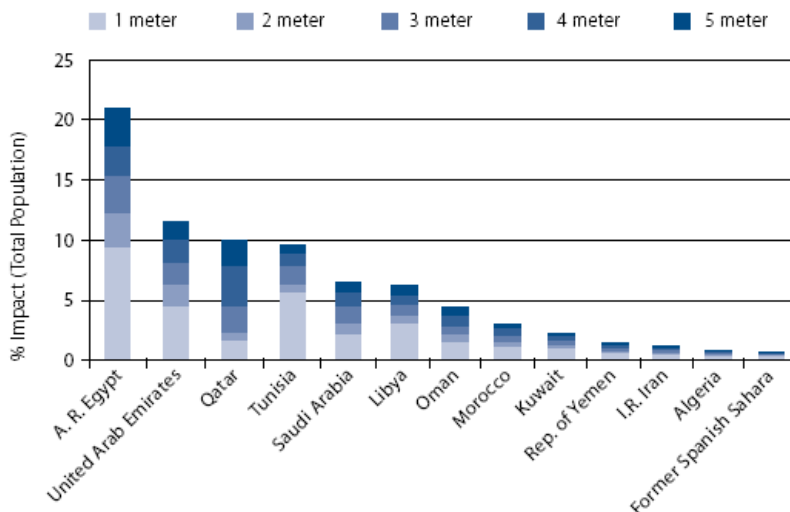


Рис. 1.8. Влияние повышения уровня Мирового океана на 1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м на население отдельных стран Аравийского полуострова и Северной Африки (в % от общего числа жителей)

1.3. Оценки будущего климата на основе сценариев и моделей общей циркуляции атмосферы

Основным инструментом для оценки будущего климата являются физико-математические модели общей циркуляции атмосферы и океана с включением в них биологических, химических и других блоков [8, 31, 41]. В связи с тем, что такие модели созданы или создаются в разных странах и разными учеными, необходимо было выбрать наилучшие из них. Для этой цели в 1990 г. был создан международный проект по сравнению моделей климата AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) в рамках которого проводится целенаправленное сравнение глобальных моделей общей циркуляции атмосферы (Global Atmospheric General Circulation Models - AGCMs), разработанных различными группами исследователей в различных странах мира, как между собой, так и с данными наблюдений [38, 48]. Это дает возможность исследовать систематические погрешности в воспроизведении современного

климата и оценить диапазон возможных его изменений, обусловленных различными воздействиями, например, антропогенными.

В 2005-2006 гг. рабочая группа по совместным моделям между атмосферой и океаном (Working Group on Coupled Modelling – WGCM) в рамках AMIP начала собирать результаты климатического моделирования ведущих научных центров по всему миру. Собранные в виде архивов результаты моделирования прошлого, настоящего и будущего климата сформировали третью фазу проекта по сравнению взаимосвязанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP3) [38]. В частности, WGCM организовала эту деятельность для того, чтобы специалисты за пределами крупных центров по климатическому моделированию могли использовать их результаты для подготовки четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC, 2007 г.).

В основном результаты моделирования были предназначены для рабочей группы №1 МГЭИК, деятельность которой направлена на изучение физических основ климатической системы (атмосферы, суши, океана и морских льдов) и выборе переменных, которые отражают компоненты этой системы и должны быть заархивированы. Эта коллекция результатов моделирования получила название «Мультимодельные наборы данных проекта CMIP3 Всемирной программы исследований климата» или "WCRP CMIP3 multi-model dataset" [88,96]. В сентябре 2008 г. на встрече с участием 20 ведущих международных коллективов по моделированию климата в рамках рабочей группы по моделям взаимодействия между атмосферой и океаном (Working Group on Coupled Modelling - WGCM) была достигнута договоренность о проведении следующего этапа работ с использованием нового набора скоординированных экспериментов. Эти эксперименты сформировали 5-ую фазу международного проекта по сравнению моделей (CMIP5) и должны были обеспечить:

- учет механизмов, отвечающих за непонятные обратные связи, обусловленные углеродным циклом и облачностью;
- исследование климатической предсказуемости и способности моделей прогнозировать климат на десятилетних временных масштабах;

- установить, почему при заданных одинаковых воздействиях модели дают разные результаты.

В проекте CMIP5 реализован набор модельных экспериментов для того, чтобы:

- оценить насколько реалистичны модели в воспроизведении климата недавнего прошлого;
- сформировать проекции будущих климатических изменений на ближайшую (до 2035 г.) и долгосрочную (до 2100 г.) перспективы;
- понять некоторые из факторов, ответственные за различия в получаемых проекциях климата, включая количественную оценку ключевых обратных связей, связанных с облаками и углеродным циклом.

Проект CMIP5 был успешно завершен с получением следующих результатов:

- десятилетние ретроспективные и будущие прогнозы;
- долгосрочное моделирование;
- только атмосферное моделирование, проведенное для вычислительных требований моделей.

Стратегия CMIP5 [29,119] включает в себя два вида экспериментов по климатическому моделированию: долгосрочное (сто-летний масштаб) и на ближайшую перспективу (10-30 лет) обычно до 2035 г., называемое также экспериментами по десятилетнему прогнозированию (Meehl et al. 2009 [112]). Долгосрочные эксперименты, как правило, начинаются с доиндустриального квазиравновесного состояния, в то время как десятилетние прогнозные эксперименты формируются с учетом наблюдаемых условий океана и морского льда.

CMIP5 по сравнению со CMIP3, включает в себя более полные модели и более широкий набор экспериментов, адресованных большему разнообразию научных проблем. Модели и эксперименты CMIP5 отличаются от предыдущих фаз также и более высоким пространственным разрешением и используют более богатый комплект полей вывода для архивирования. В проекте CMIP5 дана лучшая документация по моделям и условиям эксперимента и сформирована новая стратегия, которая делает результаты более доступными для исследователей. Так, если в проекте CMIP3 рассматривалось 12 экспериментов с моделями, то в CMIP5 таких экспериментов уже 35 и их перечень дан, например, в работе [128].

В табл. 1.1 приведены названия некоторых численных экспериментов, реализованных в проекте CMIP5, в том числе и сокращенные названия и основное назначение эксперимента.

Таблица 1.1

Название и назначение численных экспериментов проекта CMIP5

N п/п	Краткое описание эксперимента и период моделирования	Сокращенное название	Основные цели
1.	Доиндустриальный контрольный эксперимент (Pre-industrial control experiment)	piControl	Оценка, естественная изменчивость
2	Прошлое (примерно 1,5 века): 1850-2005 (Past ~1,5 centuries)	historical	Оценка
3	Будущая проекция климата (2006-2300гг.), основанная на сценарии RCP4.5	rsp45	Проекция
4	Будущая проекция климата (2006-2300гг.), основанная на сценарии RCP8.5	rsp85	Проекция
5	Будущая проекция климата (2006-2300гг.), основанная на сценарии RCP2.6	rsp20	Проекция
6	Будущая проекция климата (2006-2100гг.), основанная на сценарии RCP6.0	rsp69	Проекция
7	AMIP-эксперимент с наблюдаемыми температурами поверхности океана (SST) и приписанным уровнем за период 1979 г. – настоящее время)	Amip	Оценка
8	Эксперимент по увеличению CO ₂ на 1% в год (до увеличения в 4 раза).	1pctCO2	Оценка чувствительности климата, обратные связи
9	Быстрое увеличение CO ₂ в 4 раза и затем удерживание фиксированным	abrupt4xCO2	Оценка чувствительности, обратные связи, быстрые отклики
10.	Климатические температуры поверхности океана (SSTs), введенные из pi-контроля	sstClim	Быстрые отклики
11.	Также, как и в предыдущем эксперименте, но при уве-	sstClim4xCO2	Быстрые отклики

№ п/п	Краткое описание эксперимента и период моделирования	Сокращенное название	Основные цели
	личении CO ₂ в 4 раза		
12	Такой же, как сценарий 10, но с аэрозолями, заданными от 2000 г.	sstClimAeroso	Быстрые отклики
13	Такой же, как сценарий 10, но с сульфатными аэрозолями, заданными от 2000 г.	sstClimSulfate	Быстрые отклики
14	Доиндустриальные условия, накладываемые как в piControl эксперименте, но с атмосферным CO ₂ , определяемым внутри самой модели.	esmContro	Оценка, углеродный цикл
15	Моделирование прошлого, но с управляемыми выбросами, а не концентрациями.	esmHistorical	Оценка, углеродный цикл
16	Будущая проекция, как в gsr85, но при управляемых выбросах, а не концентрациях.	Esmrcp85	Проекция
17	Также как в amip, но с равнономерным 4K увеличением в слоях температуры (SST)	amip4K	Обратные связи с облачностью
18	Образцы SST аномалий, добавленные к amip условиям (как предусмотрено в CFMIP)	amipFuture	Обратные связи с облачностью
19	Зонально однородные температуры поверхности океана (SST), накладываемые на поверхность Земли, полностью покрытую океаном (как задано в CFMIP).	aquaControl	Облачность
20	Как в эксперименте aquaControl, но с увеличением CO ₂ , в 4 раза (4 x CO ₂).	aqua4xCO2	Облачность, быстрые отклики.

В проекте CMIP5 вместо известных сценариев SRES (B1, A1B, A2, соответствующих концентрации CO₂ в 2100 году в 540, 762 и 875 ppm) по CMIP3, представлены новые сценарии RCP (Representative Concentration Pathway), связанные со стабилизацией

общего антропогенного воздействия в 2100 году также на разных уровнях: 2.6, 4.5, и 8.5 Вт/м² и вместо концентрации CO₂ в ppm в этих сценариях дан общий эффект воздействия в Вт/м².

И если в CMIP3 ансамблевые оценки определялись по 16 глобальным моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), то в CMIP5 для обобщений использованы данные более, чем 50 моделей, представленные более 20 научными коллективами разных исследовательских центров. По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP3, модели CMIP5 характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климатических процессов.

Как и в проекте CMIP3, в новом проекте CMIP5 изменения климата рассматриваются для начала (2011- 2030 гг.), для середины (2041-2060 гг.) и конца (2080-2099 гг.) XXI века, осредненные за 20 лет по отношению к базовому климатическому периоду 1980-1999 гг.

Основные сценарии проекта CMIP5 (RCP) близки по своему смыслу сценариям SRES проекта CMIP3. Например, средний сценарий RCP 4.5 включает долгосрочные, глобальные выбросы парниковых газов, эмиссию короткоживущих примесей, землепользование и изменение почвенного покрова в глобальном масштабе. Сценарий RCP 4.5 обновлен из более ранних сценариев GCAM (Global Change Assessment Model), чтобы объединить информацию о выбросах и растительном покрове для минимизации затрат по достижению такого энергетического воздействия. Для ограничения выбросов по этому сценарию следует провести изменения в энергетической системе Земли, включая сдвиги в энергетике, в технологиях снижения выбросов и в развитии технологии по улавливанию и хранению углерода. Кроме того, стоимость по снижению совместного воздействия связана с эмиссией в землепользовании и в результате с расширением лесных угодий по сравнению с их современным объемом. Моделирование будущих выбросов и землепользования было отмасштабировано из региональных моделей в сетку, чтобы облегчить переход к климатическим моделям. Хотя существует много альтернативных путей для достижения предельного радиационного воздействия в 4.5 Вт/м², применение RCP 4.5 представляет собой общую платформу для климатических

моделей по исследованию реакции климатической системы на стабилизацию радиационного воздействия от антропогенных компонент.

По самому благоприятному сценарию RCP2.6 концентрация CO_2 будет такой, что даст добавку радиационного отклика в 2.6 Вт/м^2 к 2100 году по отношению к доиндустриальным условиям. По другим двум неблагоприятным сценариям RCP 6.0 (или rcp60) RCP8.5 (или rcp85) добавка радиационного отклика к 2100 году будет составлять 6.0 Вт/м^2 и 8.5 Вт/м^2 . Каждый из этих 4х основных сценариев имеет и 2 варианта временной экстраполяции: основной – до 2100 г. и его расширение до 2300 г.

Некоторые сценарии полностью оставлены из проекта CMIP3. Например, AMIP-эксперимент, который также применяется для диагностических исследований при реалистических значениях атмосферных компонент, полей температуры поверхности океана, площади морских льдов по данным с 1979г. по настоящее время. Традиционный CMIP-эксперимент по увеличению CO_2 на 1% в год до увеличения концентрации в 4 раза, начинающийся с концентрации 286 ppm, которая соответствует 1850 г. CO_2 остается неизменным после достижения концентрации в 4 раза превышающую начальную. Этот эксперимент в основном используется для исследования переходных состояний климатического отклика к воздействию парниковых газов. Сценарий быстрого увеличения CO_2 в 4 раза и затем удерживание его фиксированным.

Число моделей, которые использовались в CMIP5 было более 50, что также в 2 раза больше, чем их применялось при выполнении проекта CMIP3. В список основных моделей, по которым выполнялись численные эксперименты в настоящее время входят следующие:

1. Модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics, Russia, INM CM4.0 Model).
2. Модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC Model).
3. Модель канадского центра моделирования и анализа климата с разрешением T47 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CCCMA Model, T47 resolution).

4. Модель канадского центра моделирования и анализа климата с разрешением T63 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CGCM3.1 Model, T63 resolution).
5. Модель Бьеркнессовского центра климатических исследований, Норвегия (Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, BCM2.0 Model).
6. Японская модель MIROC3.2 с высоким разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3.2, high resolution).
7. Японская модель MIROC3.2 со средним разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3.2, medium resolution).
8. Модель центра атмосферных исследований Австралии версии Mk3.0 (CSIRO Atmospheric Research, Australia, Mk3.0 Model).
9. Модель центра атмосферных исследований Австралии версии Mk3.5 (CSIRO Atmospheric Research, Australia, Mk3.5 Model).
10. Модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model).
11. Модель национального института геофизики и вулканологии Италии (INGV, National Centre of Geophysics and Volcanology, Italy, ECHAM 4.6 Model).
12. Французская модель CM4 V1 (IPSL/LMD/LSCE, France, CM4 V1).
13. Модель института атмосферной физики, Китай (LASG, Institute of Atmospheric Physics, China, FGOALS1.0_g Model).
14. Модель института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).
15. Модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CM3 Model).
16. Модель метеорологического института боннского университета, Германия (Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G Model).
17. Модель института метеорологических исследований, Япония (Meteorological Research Institute, Japan, CGCM2.3.2a).
18. Модель C4x3 НАСА (NASA Goddard Institute for Space Studies, C4x3)

19. Модель Американского Космического Агентства E20/HYCOM, США (NASA Goddard Institute for Space Studies, Model E20/HYCOM).

20. Модель Американского Космического Агентства E20/Russell, США (NASA Goddard Institute for Space Studies, Model E20/Russell).

21. Модель национального центра атмосферных исследований CCSM3.0, США (National Center for Atmospheric Research, CCSM3.0).

22. Модель национального центра атмосферных исследований PCM1, США (National Center for Atmospheric Research, PCM1).

23. Модель CM2.0 геофизической лаборатории динамики жидкости Национального управления океанических и атмосферных исследований, США (NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0 Model).

24. Модель CM2.1 геофизической лаборатории динамики жидкости Национального управления океанических и атмосферных исследований, США (NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1 Model).

Полные и сокращенные названия основных климатических моделей даны в табл.1.2.

Таблица 1.2

Полные и сокращенные названия климатических моделей

Код модели	Организация/страна/институт	Код организации, версия модели
INM	Institute for Numerical Mathematics (INM)/Russia	INM-CM4
BCC	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC-CSM1.1 BCC-SM1.1(m)
CCCMA	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM2 CanCM4 CanAM4
CSIRO-BOM	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	ACCESS1.0 ACCESS1.3
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (National Institute for Space Research)	BESM OA 2.3
GCESS	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	BNU-ESM
RSMAS	University of Miami - RSMAS	CCSM4(RSMAS)

Код модели	Организация/страна/институт	Код организации, версия модели
NCAR	National Center for Atmospheric Research	CCSM4
NSF-DOE-NCAR	Community Earth System Model Contributors	CESM1(BGC) CESM1(CAM5) CESM1(CAM5.1,FV2) CESM1(FASTCHEM) CESM1(WACCM)
COLA and NCEP	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies and National Centers for Environmental Prediction	CFSv2-2011
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS
CNRM-CERFACS	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	CNRM-CM5 CNRM-CM5-2
CSIRO-QCCCE	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-Mk3.6.0
EC-EARTH	EC-EARTH consortium	EC-EARTH
LASG-CESS	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghua University	FGOALS-g2
LASG-IAP	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	FGOALS-gl FGOALS-s2
FIO	The First Institute of Oceanography, SOA, China	FIO-ESM
NASA GMAO	NASA Global Modeling and Assimilation Office	GEOS-5
NOAA GFDL	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM2.1 GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M GFDL-HIRAM-C180 GFDL-HIRAM-C360
NASA GISS	NASA Goddard Institute for Space Studies	GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC
NIMR/KMA	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	HadGEM2-AO

Код модели	Организация/страна/институт	Код организации, версия модели
MOHC (additional realizations by INPE)	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	HadCM3 HadGEM2-CC HadGEM2-ES HadGEM2-A
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR
MIROC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Envi- ronmental Studies	MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM
MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Insti- tute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC4h MIROC5
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)	MPI-ESM-MR MPI-ESM-LR MPI-ESM-P
MRI	Meteorological Research Institute	MRI-AGCM3.2H MRI-AGCM3.2S MRI-CGCM3 MRI-ESM1
NICAM	Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model Group	NICAM.09
NCC	Norwegian Climate Centre	NorESM1-M NorESM1-M

Часто рассматриваются результаты численных экспериментов не по одной модели, а по их ансамблю. Пример полученных результатов моделирования среднегодовой температуры по ансамблю моделей для территории Аравийского полуострова показан на рис.1.8 [29, 19].

Как следует из рис.1.8, к концу 21-го столетия на территории Аравийского полуострова ожидается увеличение среднегодовой температура от 2°C до 4°C, причем наибольшее увеличение (до 4,5°C) будет иметь место в центральной пустынной части полуострова, где достаточно жарко и сегодня [65,66,72,75,80,97].

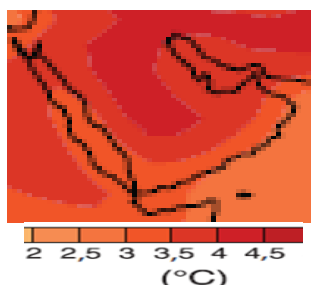


Рис. 1.8. Проекция изменений приземной температуры на конец XXI столетия (2090-2099гг.). На карте показана усредненная проекция нескольких моделей МОЦАО для сценария A1B СДСВ. Все температуры показаны по отношению к периоду 1980-1999 гг.

В соответствии с 5-ым докладом МГЭИК и рис.1.9, нормы температур на Аравийском полуострове должны повыситься по среднему сценарию RCP 4.5 для 50%-ного квантиля на 3°C к концу 21 века по сравнению с периодом 1986-2005 гг. [111].

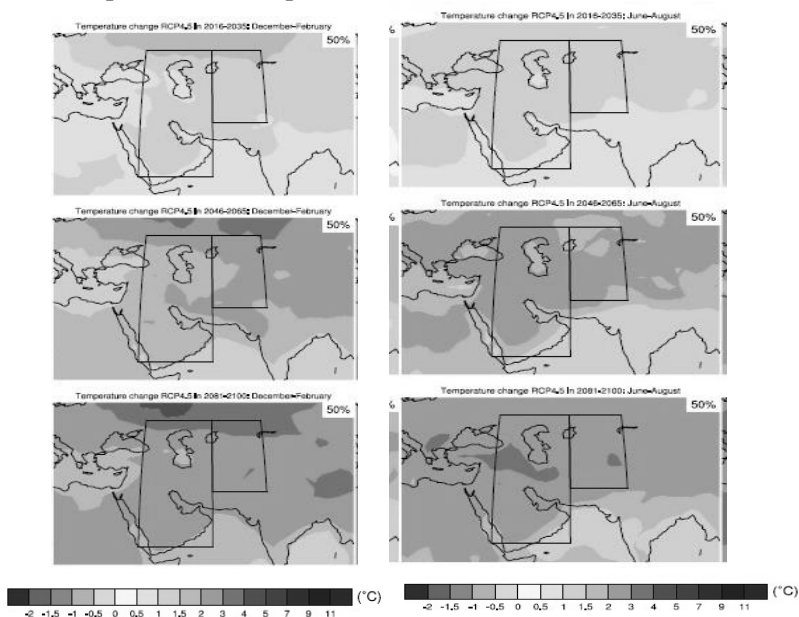


Рис. 1.9. Проекция будущих норм зимних (слева) и летних (справа) температур за периоды 2016-2035, 2046-2065 и 2081-2100 гг. (сверху вниз) в отклонениях от нормы 1986-2005гг. для ансамбля моделей и сценария RCP 4.5 при 50%-ном квантиле из [111]

Вместе с тем проекции рис.1.8 и 1.9 дают достаточно равномерное повышение на всей территории, не учитывая локальные особенности климата. Это и не удивительно, т.к. модели климата не рассматривают особенности процессов подсеточного масштаба, которые и вносят различия в зональные температуры за счет азональных факторов. Поэтому сценарные оценки по ансамблю моделей могут существенно отличаться как от тех же оценок по отдельным моделям, так и от фактических температур на конкретных метеостанциях.

Результаты моделирования зимних и летних осадков по ансамблю моделей для сценария A1B приведены на рис.1.10 [39, 50, 87].

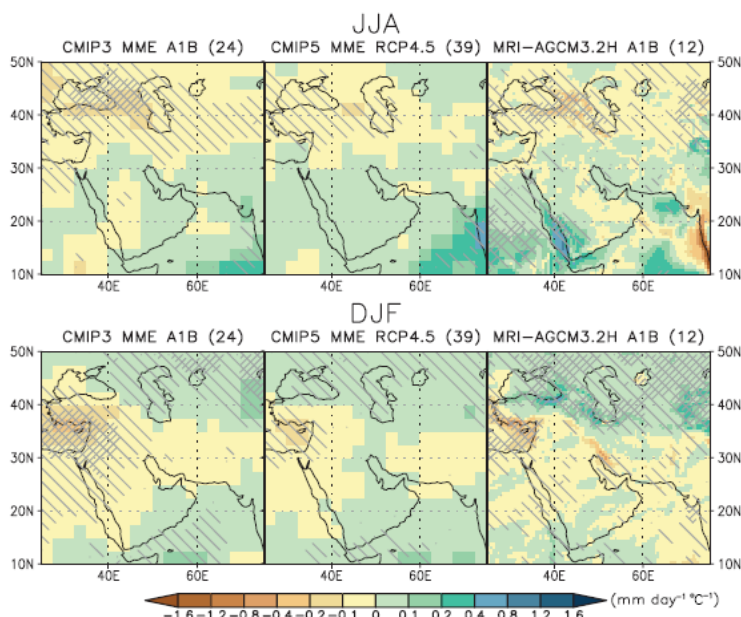


Рис. 1.10. Карты относительных изменений (в мм на день и градус) летних (верхние рисунки) и зимних (нижние рисунки) осадков за период 2080-2099 гг. по отношению к базовому периоду 1986-2005 гг. для сценария A1B и для ансамбля из 24 моделей (CMIP3, слева), из 39 моделей (CMIP5, в середине) и по модели Meteorological Research Institute (MRI, справа)

Из анализа результатов следует, что к концу 21-го века по данным CMIP3 зимние осадки с большой достоверностью уменьшатся в северной части Аравийского полуострова на 10-20% и не-

сколько вырастут (до 10-15%) на самом юге полуострова в районе Йемена. Летние же осадки останутся практически неизменными. Если же взять отдельную модель, то неопределенность будет еще больше, что показано наклонной штриховкой. Поэтому однозначных и надежных оценок изменения осадков в конце 21 века для Аравийского полуострова получено не было [54, 55, 56, 62].

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 [135, 139]. Можно отметить, что проекции осадков для Аравийского полуострова в 5-ом докладе МГЭИК вообще не представлены из-за их низкой достоверности (заштрихованная область на карте).

Также предполагается увеличение экстремальных осадков около центров тропических циклонов, выходящих на Аравийский полуостров и уменьшение средних осадков от чрезвычайных тропических циклонов в связи со сдвигом их траекторий к северу [63].

1.4. Применяемая методика исследований и ее обоснование

Примененная в дальнейших главах 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.

Каждая часть методики исследования имеет свое индивидуальное обоснование. Так региональная база данных должна включать ряды наблюдений не только на Аравийском полуострове, но и за его пределами в связи с тем, что эти данные могут быть использованы в виде многолетних рядов-аналогов для приведения к многолетнему периоду данных на полуострове, а также для надежного пространственного обобщения результатов, особенно на границах полуострова. Вторая особенность при формировании базы данных – это выбор эффективных климатических характеристик для анализа. Для того, чтобы оценить изменения внутри года и влияние отдельных месяцев на среднегодовую температуру воздуха и суммы годовых осадков необходимо выбрать оптимальную дискретность, которая в исследованиях является месячной дискретностью. Именно за месяц происходит сглаживание, как погодных экстремумов, так и отдельных синоптических процессов. Поэтому для анализа выбраны многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков.

Анализ качества и однородности данных наблюдений является начальной и одной из главных частей методики, т.к. от надежности и качества данных зависит достоверность и надежность установленных на их основе закономерностей. Для объективной оценки качества данных должны быть применены и объективные статистические методы оценки однородности, основанные на статистических критериях. В настоящей работе будут применены две группы критериев: первая для оценки однородности эмпирических распределений, которая может быть нарушена наличием неоднородных экстремумов, и вторая – для оценки однородности во времени или стационарности, которая может быть нарушена за счет смены регистрирующих приборов и других условий наблюдений. Очевидно, что если целью является установление долговременных климатических изменений, то наличие или отсутствие одного или нескольких экстремумов в многолетнем ряду наблюдений не должно существенно влиять на параметры модели, т.к. эти экстремумы обусловлены межгодовой изменчивостью, а не долгопериодным изменением климата. Поэтому, если экстремум не является однородным, то его можно исключить из ряда наблю-

дений, что не должно сказываться на виде и параметрах климатической модели временного ряда. К качеству исходной информации относится и приведение ряда к многолетнему периоду и восстановление пропусков наблюдений. Эта процедура необходима по следующим причинам:

- надежность определения вида и параметров модели временного ряда напрямую зависит от его продолжительности и равномерности наблюдений, т.е. предполагается отсутствие пропусков;
- параметры моделей можно сравнивать на разных станциях, если они получены примерно за одинаковый и продолжительный период.

Для статистического моделирования временных рядов были выбраны самые простые классы моделей: стационарная и нестационарная. При этом нестационарность определяется по главному параметру – среднему значению ряда наблюдений. Также преимущество стационарной или нестационарной модели должно определяться простыми и понятными показателями. Одним из таких показателей является остаточная дисперсия или то, что не удалось объяснить с помощью модели. Так, для модели стационарной выборки остаточная дисперсия равна естественной вариации временного ряда, т.е. климат принимается постоянным, а вся естественная межгодовая изменчивость представлена средним квадратическим отклонением. Если же нестационарная модель больше соответствует временному ряду, то ее остаточная дисперсия или среднее квадратическое отклонение остатков должно быть меньше, чем для стационарной модели. Это отличие можно выразить в процентах или оценить его статистическую значимость по статистическим критериям. Особенность настоящей методики состоит в том, что в качестве нестационарной модели рассматривается не только модель линейного тренда, практически единственная, которая применяется в современном эмпирико-статистическом анализе [124], но и модель ступенчатых изменений, более соответствующая триггерному механизму атмосферы.

Пространственное обобщение также осуществляется простыми и понятными методами. Одним из них является метод пространственной интерполяции, позволяющий выделить области с большими и малыми климатическими изменениями, т.е. предста-

вить неоднородное поле климатических изменений. Если же описать это поле в виде параметров за каждый год, то будет получена пространственная статистическая модель, параметры или коэффициенты которой можно рассматривать во времени и их динамика будет характеризовать климатические изменения определенных параметров поля, например, среднего его значения или градиента.

ГЛАВА 2.

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

2.1. Выбор пунктов наблюдений и формирование региональной базы данных

В качестве исходной информации для климатического моделирования были выбраны многолетние ряды температур воздуха и осадков месячной дискретности (среднемесячные температуры воздуха и суммы осадков за месяцы года). Архивы многолетних рядов температур воздуха и осадков получены, главным образом, из Интернета со следующих сайтов:

- сайт Королевского метеорологического института Нидерландов (<http://www.knmi.nl>) [11];
- сайт Вашингтонского климатического центра (<http://cdiac.ornl.gov>) [15].

На сайте Вашингтонского климатического центра размещена информация по 6000 пунктам наблюдений за температурой воздуха и по 7500 пунктам наблюдений за осадками по всему миру, но ограничена началом 1980-х гг. На сайте Королевского метеорологического института Нидерландов содержится меньше станций, но по ним информация постоянно пополняется, что позволяет дополнить ряды наблюдениями до 2011-2012 гг.

Территориальный выбор метеостанций основывался на следующих принципах:

- выбирались все имеющиеся в архивах метеостанции на территории Аравийского полуострова;
- выбирались метеостанции на территории сопредельных государств как в целях их использования в качестве предполагаемых аналогов для восстановления пропусков и удлинения рядов на станциях Аравийского полуострова, так и для целей интерполяции за пределы Аравийского полуострова в пространственных моделях климатических изменений.

В странах Аравийского полуострова находится всего 48 пунктов наблюдений, причем 36 пунктов с наблюдениями за температурой воздуха и 43 пункта с наблюдениями за осадками. Поэтому для регионального анализа температур воздуха и осадков

были дополнительно выбраны метеостанции на территории сопредельных государств Ближнего Востока: Иордания, Ирак, Иран и Африки: Египет, Судан, Эфиопия, Джибути, Сомали, Эритрея. В результате общее число выбранных станций равно 493, причем наблюдения за температурой воздуха имеют место на 188 станциях и за осадками – на 310 метеостанциях. Информация о числе метеостанций на территории каждого государства с разделением станций по наблюдениям за температурой воздуха и осадками приведена в табл.2.1.

Как следует из табл. 2.1, достаточно много метеостанций с наблюдениями за осадками находится на территории Судана (107 станций) и Эфиопии (83 станции), а за температурой – на территории Ирана (43 станции), Судана (36 станций) и Египта (24 станции). Также можно отметить, что вся рассматриваемая территория освещена наблюдениями неравномерно, причем для некоторых стран преобладают станции с наблюдениями за температурой воздуха, а для других – с наблюдениями за осадками. Наибольшее число совпадающих станций с наблюдениями за обеими характеристиками расположено на Аравийском полуострове.

В связи с тем, что дальнейший анализ и моделирование температуры воздуха и осадков были осуществлены раздельно, для выбранных метеостанций были сформированы две региональные климатические базы данных:

- база данных, содержащая многолетние ряды среднемесячных температур воздуха по 188 станциям;
- база данных, содержащая многолетние ряды сумм месячных осадков по 310 станциям.

Таблица 2.1

Число метеостанций на территории разных государств

Страна	Количество метеостанций		
	общее	с температурой	с осадками
Аравийский полуостров			
Йемен	22	12	22
Саудовская Аравия	12	13	12
Оман	6	3	6

Страна	Количество метеостанций		
	общее	с температурой	с осадками
Бахрейн	1	1	1
Кувейт	6	6	1
Катар	1	1	1
Ближний Восток			
Иордания	7	7	11
Иран	43	43	9
Ирак	14	14	10
Африка			
Египет	24	24	18
Судан	107	36	107
Эфиопия	83	14	83
Джибути	1	1	1
Сомали	19	13	19
Эритрея	9		9
Всего	493	188	310

2.2. Формирование региональной базы данных многолетних рядов температур воздуха и осадков

Для формирования региональных баз данных (БД) было использовано СУБД программного комплекса (ПК) «Гидрорасчеты» (сертификат Госстандарта Российской Федерации № 0812948, РОСС RU.СП04.Н00118 и Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2010615886). Сформированные геоинформационные слои координат метеостанций двух региональных БД приведены на рис.2.1 и 2.2 соответственно.

Как следует из сопоставления рис.2.1 и 2.2, пространственное распределение метеостанций с температурами воздуха является более равномерным, чем с осадками. Хотя есть территории, например, в центре Аравийского полуострова, в которых метео-

станции отсутствуют. По границам Аравийского полуострова также имеется достаточное число станций, которые могут быть использованы в качестве предполагаемых аналогов и для пространственного обобщения полученных результатов.

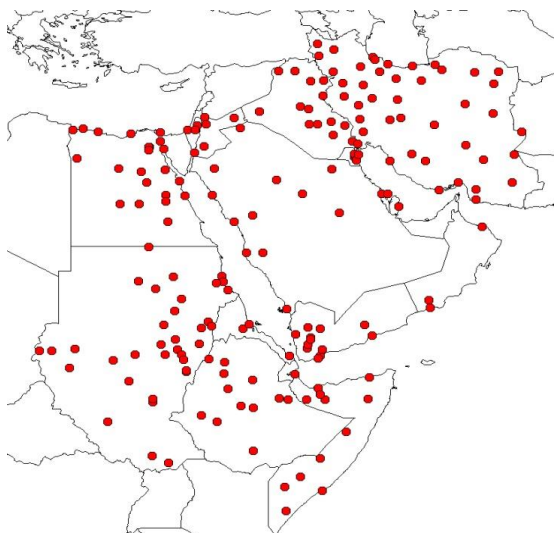


Рис. 2.1. Расположение метеостанций региональной БД температур воздуха

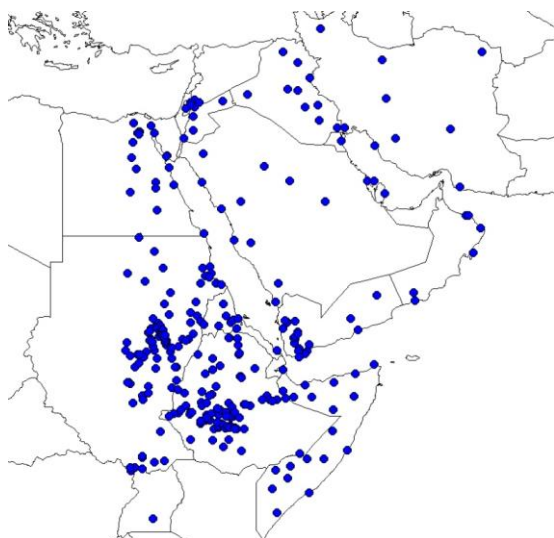


Рис. 2.2. Расположение метеостанций региональной БД осадков

2.3. Состав и информационные особенности региональной климатической базы данных

Продолжительность наблюдений, наряду с их качеством является одним из главных критериев надежности статистического моделирования. Поэтому, чем продолжительнее исходный ряд и при условии, что он включает последние годы наблюдений, тем эффективнее будут результаты его анализа и моделирования. Сформированные региональные базы данных по температуре воздуха и осадкам имеют разные периоды наблюдений. Информация о продолжительностях и периодах наблюдений за среднемесячными температурами воздуха приведена в табл.2.2, а за осадками - в табл.2.3 для метеостанций на территории Аравийского полуострова. В таблицах дана наибольшая продолжительность наблюдений, т.к. фактических наблюдений в отдельные месяцы может быть и меньше, чем число строк в таблице.

Таблица 2.2

Продолжительности (n) и периоды наблюдений за среднемесячной температурой воздуха на метеостанциях Аравийского полуострова

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (n)
Йемен				
1	41443	Ар-Раян	1942-2006	29
2	41466	Таиз	1983-2006	24
3	41467	Сана	1983-2006	24
4	41468	Хадрамаут сайун	1980-2006	27
5	41469	Ходейда	1995-2006	12
6	41470	Ибб	1992-2006	15
7	41474	Абин алкод	1971-1993	23
8	41475	Дамар	1999-2006	8
9	41476	Дамар русаб	1982-1990	9
10	41479	Марб	1995-2006	12
11	41480	Аден	1881-2006	100

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (п)
12	41481	Албида	1982-1990	9
Среднее				24
Саудовская Аравия				
13	40356	Турайф	1978-2011	34
14	40373	Эль-Кайсума	1977-2011	35
15	40375	Табук	1964-2011	47
16	40394	Хаиль	1961-2011	51
17	40400	Эль-Ваджх	1966-2011	46
18	40405	Гассим	1967-2011	43
19	40416	Дахран	1949-2011	63
20	40430	Медина	1956-2011	56
21	40438	Эр-Рияд	1941-2011	66
22	40439	Янбу	1967-2011	37
23	41020	Джидда	1951-1982	32
24	41036	Эт-Таиф	1961-2011	42
25	41140	Джизан	1963-2011	39
Среднее				45,5
Оман				
26	41256	Сиб	1971-2009	38
27	41314	Тумрайт	1982-2009	28
28	41316	Салала	1942-2009	58
Бахрейн				
29	41150	Бахрейн	1902-2011	97
Катар				
30	41170	Доха	1962-2011	38
Кувейт				
31	40580	Кувейт	1961-1980	20
32	40581	Шуваих	1961-1980	20

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (n)
33	40582	Кувейт 2	1956-2011	51
34	40583	Эль-Ахмади	1961-1980	19
35	40584	Мина-Эль-Ахмади	1961-1980	19
36	40588	Файлака	1971-1980	10
Среднее				23,1

Таблица 2.3

Продолжительности (n) и периоды наблюдений за суммами месячных осадков на метеостанциях Аравийского полуострова

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (n)
Йемен				
1	41443	Ар-Раян	1942-1990	21
2	41466	Таиз	1944-2003	52
3	41467	Сана	1932-2002	52
4	41468	Хадрамаут Сайун	1977-2004	28
5	41469	Ходейда	1963-2001	27
6	41470	Ибб	1982-2004	23
7	41471	Ибб Аладин	1970-2001	25
8	41472	Ибб Адлил	1970-2001	14
9	41473	Ибб Ярим	1973-1994	16
10	41474	Абин Алкод	1971-1993	23
11	41475	Дамар	1987-2004	12
12	41476	Дамар Русаб	1981-1990	10
13	41477	Алмхуит	1975-1989	12
14	41478	Алмхуит Кукабан	1975-1989	15
15	41479	Хаджа	1975-2001	20
16	41480	Аден	1881-1994	90

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (п)
17	41481	Албида	1982-1990	9
18	41482	Лахдж	1973-1985	13
19	41483	Лахдж Алмсимир	1972-1985	14
20	41484	Лахдж Мдрам	1972-1981	10
21	41485	Лахдж Алфюш	1972-1985	14
22	42801	Тамуд	1956-1989	31
Среднее				24,1
Саудовская Аравия				
23	40375	Табук	1966-2011	40
24	40394	Хаиль	1966-2011	41
25	40400	Эль-Ваджх	1966-2011	41
26	40405	Гассим	1967-2011	40
27	40416	Дахран	1951-2011	61
28	40430	Медина	1956-2011	51
29	40438	Эр-Рияд	1941-2011	61
30	40439	Янбу	1967-2011	35
31	41024	Джидда	1951-2004	45
32	41036	Эт-Таиф	1966-2011	35
33	41114	Хамис-Мушайт	1967-2004	26
34	41140	Джизан	1967-2011	33
Среднее				42,4
Оман				
35	41256	Сиб	1893-2011	113
36	41258	Миналь-Фахал	1967-1988	22
37	41268	Сур	1977-2004	28
38	41288	Масира	1943-2011	69
39	41314	Тумрайт	1980-2011	32
40	41316	Салала	1942-2011	70

№ п/п	Код	Станция	Период наблюдений	Продолжительность наблюдений (n)
Среднее				55,7
Бахрейн				
41	41150	Бахрейн	1902-2011	96
Кувейт				
42	40582	Кувейт	1956-2011	51
Катар				
43	41168	Доха	1962-2000	39

В результате анализа данных, приведенных в табл.2.2 и 2.3, можно сделать вывод, что средняя продолжительность рядов наблюдений составляет 45-50 лет, но существенно варьирует как в зависимости от страны, так и внутри самой страны.

Средняя продолжительность рядов наблюдений за температурой воздуха для территории Йемена составляет 24 года, но варьирует от 8 до 100 лет; на территории Саудовской Аравии средняя продолжительность рядов температур воздуха больше и равна 45,5 лет, а варьирует в меньших пределах: от 32 до 66 лет. На территории Кувейта средняя продолжительность рядов температур воздуха также небольшая и составляет 23 года при вариации от 10 до 51 года. За пределами Аравийского полуострова наиболее продолжительные ряды наблюдений за температурой воздуха составляют 76–104 года на Ближнем Востоке и 98–110 лет на территории Африки, в основном в Египте и Судане.

Продолжительность рядов осадков на территории Аравийского полуострова также разная. Так для Йемена средний период наблюдений за осадками составляет 24 года при вариации от 9 до 90 лет; в Саудовской Аравии средняя продолжительность рядов 42,4 года при меньшей вариации от 26 до 61 года; для Омана средняя продолжительность еще больше 55,7 лет при вариации от 22 до 113 лет. За пределами Аравийского полуострова наиболее продолжительные ряды наблюдений за осадками в странах Ближнего Востока достигают 76–110 лет (Иран) и 100–113 лет в странах Африки (Египет, Судан, Эфиопия).

Для наглядности пространственное распределение продолжительностей рядов температур воздуха представлено на рис.2.3 в виде трех градаций: ряды менее 50 лет наблюдений, ряды наблюдений в диапазоне от 50 до 70 лет и наиболее продолжительные ряды более 70 лет. Число метеостанций с непродолжительными рядами (менее 50 лет) составляет 116, со средними по продолжительности рядами – 42 станции и наиболее продолжительные ряды наблюдений имеют место на 30 станциях (16% от общего числа станций).

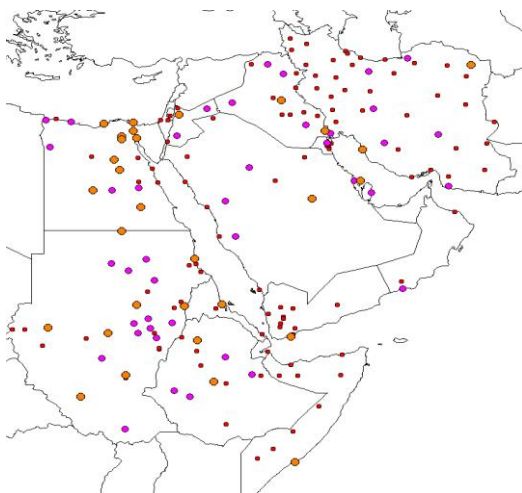


Рис. 2.3. Распределение метеостанций по продолжительности наблюдений за температурой воздуха (наименьшие окружности $n < 50$ лет, средние $50 < n < 70$ лет и большие – $n > 70$ лет)

В соответствии с рис.2.3, метеостанции с наиболее продолжительными рядами достаточно равномерно расположены как по территории Аравийского полуострова, так и за его пределами, что представляет возможность использовать их в качестве предполагаемых аналогов для приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду.

Пространственное распределение продолжительностей наблюдений за осадками показано на рис.2.4, из которого следует, что оно не является таким же равномерным как для температуры воздуха. Наиболее продолжительные ряды наблюдений за осадками находятся на территории Судана и Эфиопии, а на самом Ара-

вийском полуострове таких станций с наиболее продолжительными рядами всего 5. В связи с тем, что осадки менее связаны по пространству, чем температура воздуха, такое неоднородное распределение станций по продолжительности наблюдений может существенно снизить эффективность приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду.

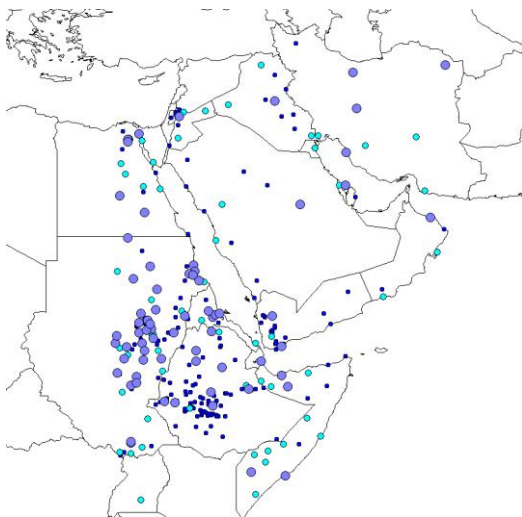


Рис. 2.4. Распределение метеостанций по продолжительности наблюдений за осадками (наименьшие окружности $n < 50$ лет, средние $50 < n < 70$ лет и большие – $n > 70$ лет)

В целом можно сделать вывод, что собрана информация по достаточно большому числу метеостанций (188 станций с наблюдениями за температурой и 310 с наблюдениями за осадками), которая позволила сформировать две региональные климатические базы данных. Хотя средний период наблюдений и недостаточно большой (45-50 лет), но имеется 16-23% метеостанций с наиболее продолжительными рядами наблюдений (более 70 лет) и примерно 20% станций содержат ряды с наблюдениями по 2011-2012 гг., что обуславливает потенциальные возможности для приведения непродолжительных рядов на территории Аравийского полуострова к многолетнему периоду.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ ПОДГОТОВКА ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Методы оценки однородности и стационарности

Анализ однородности и стационарности исходных данных 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 [120].

Первым шагом исследования является оценка однородности эмпирических распределений метеорологических характеристик, которая может нарушаться из-за резко отклоняющихся от общей совокупности максимальных и минимальных значений. Оценка однородности рядов метеорологических наблюдений осуществляется на основе генетического и статистического анализа исходных данных наблюдений. Генетический анализ заключается в выявлении физических причин, обуславливающих неоднородность наблюдений. Для оценки статистической значимости однородности применяются критерии резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении: критерии Смирнова-Граббса и Диксона [9, 16]. Существуют три основные причины такой неоднородности:

а) резко отклоняющиеся метеорологические величины имеют особые условия формирования, например, сформированы тайфунами;

б) экстремальное событие имеет более редкую вероятность появления, чем та, которая определяется по эмпирической формуле при включении его в общую последовательность наблюдений;

в) резко отклоняющаяся величина обусловлена значительной погрешностью измерений.

Последовательность оценки однородности состоит в том, что вначале сомнительные резко отклоняющиеся от эмпирического распределения максимумы проверяются по статистическим критериям и в случае отклонения гипотезы однородности устанавливается ее причина на основе генетического анализа.

Особенность критериев оценки однородности Смирнова-Граббса и Диксона состоит в том, что они разработаны для условий нормального симметричного закона распределения генеральной совокупности и отсутствия автокорреляции. В тоже время эмпирические распределения отдельных метеорологических характеристик, особенно осадков, имеют большую асимметрию, и в ряде случаев, во временных рядах может иметь место статистически значимая автокорреляция между смежными членами ряда ($r(1)$). Для учета таких особенностей метеорологической информации были проведены работы по расширению таблиц статистических критериев наиболее часто применяемых в гидрометеорологии (критерии Диксона, Смирнова-Граббса, Стьюдента, Фишера) и полученные результаты представлены в работе [32].

Статистики критериев Диксона рассчитываются на основании эмпирических данных по следующим формулам:

а) для максимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки (Y_n):

$$D1_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_1), \quad (3.1)$$

$$D2_n = (Y_n - Y_{n-1}) / (Y_n - Y_2), \quad (3.2)$$

$$D3_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_2), \quad (3.3)$$

$$D4_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_3), \quad (3.4)$$

$$D5_n = (Y_n - Y_{n-2}) / (Y_n - Y_1), \quad (3.5)$$

б) для минимального члена ранжированной в возрастающем порядке выборки (Y_1):

$$D1_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_n), \quad (3.6)$$

$$D2_1 = (Y_1 - Y_2) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (3.7)$$

$$D3_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-1}), \quad (3.8)$$

$$D4_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_{n-2}), \quad (3.9)$$

$$D5_1 = (Y_1 - Y_3) / (Y_1 - Y_n), \quad (3.10)$$

где: $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n$, и n – объем выборки.

Статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена ранжированной последовательности (Y_n) рассчитывается по формуле:

$$G_n = (Y_n - Y_{cp}) / \sigma, \quad (3.11)$$

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

и для минимального (Y_1):

$$G_1 = (Y_1 - Y_{cp}) / \sigma, \quad (3.12)$$

Оценка однородности по критериям состоит в сравнении расчетного значения статистики критерия, полученной по эмпирическим данным, с ее критическим значением из таблиц или номограмм при заданном уровне значимости, объеме выборки, коэффициентах автокорреляции и асимметрии. Уровень значимости обычно задается равным 5%, что соответствует принятию нулевой гипотезы об однородности с вероятностью 95%. В результате гипотеза однородности может быть принята в том случае, если расчетное значение статистики меньше соответствующего критического.

Обобщенные для асимметричного распределения Пирсона 3 типа с учетом внутрирядной связанности критерии Диксона и Смирнова - Граббса имеют следующие особенности. Значимая асимметрия в анализируемых выборках приводит к увеличению критических значений статистик, определенных для исходного нормального распределения, если проверяется максимальное значение ряда, и к уменьшению критических значений этих статистик при проверке минимального члена ряда. Влияние автокорреляции на статистики критериев не столь существенно, как асимметрии. При этом, чем больше асимметрия, тем в большей степени сказыва-

ется влияние автокорреляции. Поэтому, если использовать критерии Диксона и Смирнова-Граббса, основанные на нормальном распределении, можно допустить существенную ошибку. Ошибка состоит в том, что можно принять минимальное отклоняющееся значение принадлежащим к данной совокупности, тогда как в действительности оно является неоднородным и принадлежит к другому распределению и, наоборот, считать аномальным одно или несколько максимальных значений, тогда как они принадлежат тому же асимметричному распределению.

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 [7]. При оценке стационарности средних значений и дисперсий для последовательных частей ряда применяются критерии Стьюдента и Фишера также обобщенные для особенностей гидрометеорологической информации [30, 32, 134]. Анализ по этим критериям осуществляется после того, как проведена оценка на отсутствие резко отклоняющихся экстремумов, существенно влияющих на значения средних значений и особенно дисперсий. Для оценки стационарности дисперсий и средних значений соответственно по критериям Фишера и Стьюдента временной ряд разбивается на две или несколько подвыборок одинаковой или разной длины [6, 28], причем границы разбиения желательно связать с датами предполагаемого нарушения стационарности. По каждой подвыборке вычисляются значения средних ($\bar{Y}_{cpj}$) и дисперсий (σ^2_j), которые используются для получения расчетных значений статистики Фишера:

$$F = \sigma^2_j / \sigma^2_{j+1} . \quad (3.13)$$

где F – расчетные значения статистики Фишера;
 $\sigma^2_j, \sigma^2_{j+1}$ – соответственно дисперсии двух следующих друг за другом подвыборок (j и $j+1$) объемом n_1 и n_2 , при $\sigma^2_j > \sigma^2_{j+1}$.

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается при заданном уровне значимости $\alpha(\%)$, если расчетное значение статисти-

стики критерия меньше критического ($F < F^*$) при заданных степенях свободы, соответствующих объемам выборок (n_1 и n_2).

Критические значения статистики Фишера (F^*) в зависимости от уровня значимости $\alpha(\%)$, коэффициентов внутрирядной ($r(1)$) и межрядной корреляции (R) при равных объемах двух выборок ($n_x = n_y$) приведены в таблицах [32].

При объемах выборок n_1 и n_2 больше или равных 25 членам ряда можно использовать классическое F -распределение для нормально распределенных независимых случайных величин с новыми степенями свободы, которые зависят от автокорреляции и асимметрии и определяются по формулам:

$$n_{1F} = \frac{n_1 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_1}}{n_1(1-r^2)} \right]} \quad (3.14)$$

$$n_{2F} = \frac{n_2 g}{1 + \frac{2r^2}{1-r^2} \left[1 - \frac{1-r^{2n_2}}{n_2(1-r^2)} \right]} \quad (3.15)$$

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

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента для оценки стационарности двух средних значений последовательных подвыборок определяется по формуле:

$$t = \frac{Y_{cpI} - Y_{cpII}}{\sqrt{n_1 \sigma_I^2 + n_2 \sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (3.16)$$

где: Y_{cpI} , Y_{cpII} , σ_I^2 , σ_{II}^2 – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок, n_1 и n_2 – объемы выборок.

Критические значения статистики Стьюдента определяются по таблицам критических значений при равных объемах выборок или рассчитываются по уравнению:

$$t'_\alpha = C_t * t_\alpha. \quad (3.17)$$

где: t'_α – критическое значение статистики Стьюдента при наличии автокорреляции, t_α – критическое значение статистики Стьюдента для случайной совокупности при таком же числе степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$; C_t – переходный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента автокорреляции.

Оценка стационарности по критерию Стьюдента осуществляется также путем сравнения расчетных и критических значений статистик. Если расчетное значение меньше критического при заданном уровне значимости гипотеза об однородности (стационарности) не отклоняется.

3.2. Результаты оценки однородности и стационарности

Анализ однородности эмпирических распределений среднемесячных температур воздуха и сумм месячных осадков был проведен по критериям Диксона и Смирнова-Граббса для всех рядов наблюдений продолжительностью более 20 лет, а анализ стационарности был осуществлен для рядов продолжительностью 40 лет и более. Ограничения по продолжительности связаны с тем, что для коротких рядов наблюдений велика вероятность естественной неоднородности, связанной с наличием экстремумов более редкой повторяемости, чем та, которая вычисляется по короткому ряду и с естественной цикличностью, связанной с чередованием периодов повышенной и пониженной температуры воздуха и осадков, которые могут составлять от одного до 2-3 десятилетий. При этом, оценка однородности и стационарности осуществлялась для всех пунктов наблюдений, расположенных как на Аравийском полуострове, так и за его пределами, т.к. априори неизвестно какие из станций за пределами полуострова могут быть аналогами при восстановлении пропусков и приведении непродолжительных рядов к многолетнему периоду. Вместе с тем, анализ однородности и стационарности данных для предполагаемых аналогов также необходим, т.к. существующая неоднородность в аналогах будет перенесена в восстановленные данные.

Обобщенные результаты оценки однородности максимальных (Макс.) и минимальных (Мин.) экстремумов среднемесячных температур по критериям Диксона (Д) и Смирнова-Граббса (СГ)

приведены в табл. 3.1 для тех станций на Аравийском полуострове и ближайшем окружении (всего 54 станции) в которых получен вывод о неоднородности. В этой таблице знак «+» обозначает, что гипотеза однородности принимается, знак «-» - отклоняется, а если расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости α от 3% до 5%, то гипотеза принимается условно и в таблице ставится «(+)», а рядом численное значение уровня значимости, соответствующее расчетному значению статистики. Если же расчетное значение статистики критериев находилось в диапазоне уровня значимости α от 1% до 3%, то гипотеза однородности условно отклоняется и в таблице ставится знак «(-)», а рядом - численное значение уровня значимости.

Таблица 3.1

Установленные неоднородности в рядах среднемесячных температур на метеостанциях Аравийского полуострова и прилегающих территорий

№ п/ п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
			Январь				Февраль			
1	40438	Эр-Рияд	(-)1,6		-	-				
2	40581	Шуваих			(-)2,3	(-)3				
3	40582	Кувейт 2			-	-				
4	40583	Эль-Ахмади			(-)2,2					
5	40584	Мина-Эль-Ахмади			-	-				
6	41256	Сиб		(-)2,3						
7	41466	Таиз				(-)2,7				
8	41467	Сана								-
9	41468	Хадрамаут сайун								-
			Март				Апрель			
1	40356	Турайф							-	-
2	40394	Хаиль			-	-				

№ п/ п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
3	40416	Дахран			(-) 1,9	-				
4	40439	Янбу			-					
5	41036	Эт-Таиф						-		-
6	41150	Бахрейн	(-) 2,4				-			
7	41467	Сана	-	-		-		-		-
8	41468	Хадрамаут сайун		-		(-)2,2				
			Май				Июнь			
1	40405	Гасим		-		-				
2	40438	Эр-Рияд			(-) 1,4					
3	40581	Шуваих			(-) 2,7				(-) 2,1	(+) 5,8
4	41170	Доха		(-) 2,1		(-)2,2				
5	41466	Таиз		-		-				
6	41467	Сана					-			
7	41468	Хадрамаут сайун	-	-		-				
			Июль				Август			
1	40583	Эль-Ахмади			-	-				
2	40584	Мина-Эль-Ахмади			(-) 2,3					
3	41466	Таиз				(-)1,5				
4	41468	Хадрамаут сайун						-		
5	41480	Аден		-		(-)1,2				
			Сентябрь				Октябрь			
1	40356	Турайф			-	-				
2	40405	Гасим			-					

№ п/ п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
3	40430	Медина			-	-			(-) 2,7	
4	40581	Шуваих							(-) 2,4	
5	41314	Тумрайт		(-) 2,7						
6	41466	Таиз		-		-				
7	41467	Сана						-		-
			Ноябрь				Декабрь			
1	40405	Гасим		-		-				
2	40416	Дахран			-	-				
3	40430	Медина			(-) 2,5					
4	41036	Эт-Таиф					(-) 2,1			
5	41140	Джизан								
6	41170	Доха		-						
7	41467	Сана					-	-	-	

Из результатов табл.3.1 следует, что число неоднородных экстремумов для среднемесячных температур воздуха не столь велико. Если считать, что общее число тестов по двум критериям (Диксона и Смирнова-Грabbса) для 54 станций и 12 месяцев равно 1296, то общее число выводов о неоднородности в табл.3.1 – 72 или всего 5,5%. Если же рассматривать только гарантированные выводы о неоднородности (без тех, которые в скобках), то их число будет 50 или 3,8%. Число рядов с максимальными неоднородными экстремумами равно 22 (3,4%), а при исключении условно неоднородных – 16 (2,5%). Число же рядов с неоднородными минимальными экстремумами несколько больше и равно 38 (5,7%) или при исключении условно неоднородных - 24 (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. Примеры рядов, содержащих неоднородные экстремумы, приведены на рис.3.1.

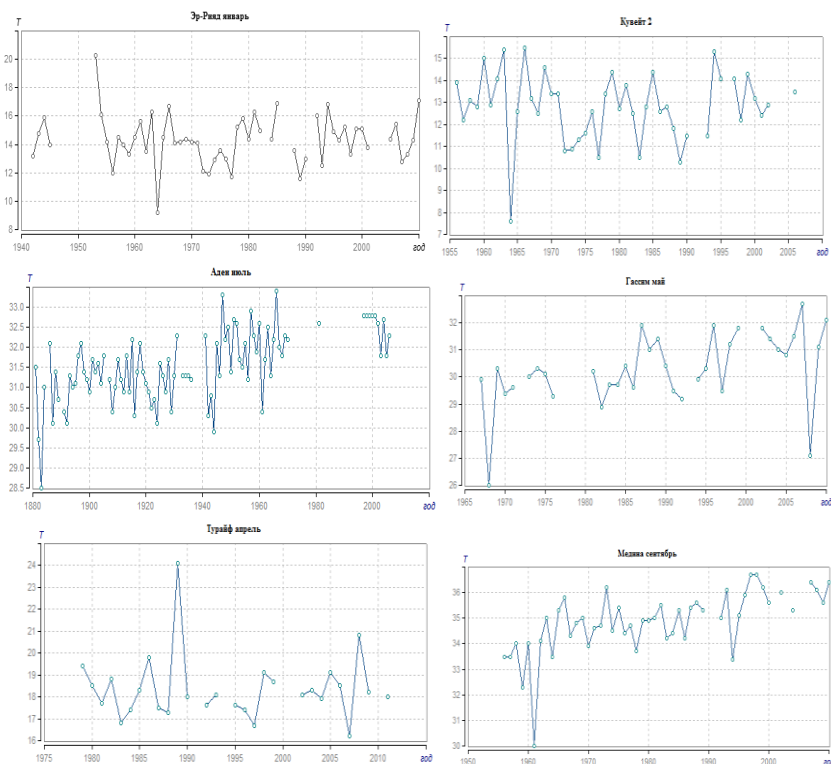


Рис. 3.1. Примеры неоднородных экстремумов в рядах среднемесячных температур воздуха

Выявленные неоднородные экстремумы не были исключены из рядов наблюдений для последующей процедуры восстановления пропусков и удлинения рядов, т.к. это были фактические наблюдения и возможно в удлиненном ряду экстремум не будет восприниматься как неоднородный. Вместе с тем полученные ре-

зультаты неоднородности учитывались при последующей оценке стационарности.

Результаты оценки стационарности на тех же 54 станциях по критериям Фишера (Ф) и Стьюдента (Ст) приведены в табл.3.2 для выявленных случаев нестационарности.

Таблица 3.2

Установленные нестационарности в рядах среднемесячных температур на метеостанциях Аравийского полуострова и прилегающих территорий

№п/п	Код	Название метеостанции	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст
			Январь		Февраль		Март	
1	40582	Кувейт 2		-				
2	41020	Джидда			(-)2,7			
3	41150	Бахрейн						(-)1,2
4	41256	Сиб				-		
5	41316	Салала		-				-
6	41466	Таиз	-		-			
7	41467	Сана			-			
8	41468	Хадрамаут сайун	-		-			
9	41480	Аден		-		-		-
			Апрель		Май		Июнь	
1	40373	Эль-Кайсума				(-)2,8		
2	40375	Табук				(-)3,1		-
3	40405	Гассим						(-)1,5
4	40438	Эр-Рияд		-		-		-
5	40582	Кувейт 2		-		-		
6	41020	Джидда			-			
7	41036	Эт-Таиф		-				
8	41150	Бахрейн				-		-
9	41170	Доха				(-)1,2		
10	41316	Салала		-		-		(-)3

№п/п	Код	Название метеостанции	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст
11	41466	Таиз	-				-	
12	41467	Сана	-				-	
13	41468	Хадрамаут сайун	-		-		-	
14	41480	Аден						-
			Июль		Август		Сентябрь	
1	40356	Турайф				-		
2	40373	Эль-Кайсума				(-)3,6		
3	40375	Табук				-		-
4	40394	Хаиль				-		
5	40400	Эль-Ваджх				(-)1,8		-
6	40430	Медина		-		-		(-)1,4
7	40438	Эр-Рияд		-		-		-
8	40439	Янбу		-		(-)1,3		
9	40582	Кувейт 2		-				
10	40584	Мина-Эль-Ахмади						(-)3,0
11	41140	Джизан						(-)2,9
12	41150	Бахрейн		-		(-)1		-
13	41170	Доха	(-)1,5			(-)1,4		
14	41316	Салала						(-)1,3
15	41466	Таиз	-		-		-	
16	41468	Хадрамаут сайун			-			
17	41480	Аден		-		-		-
			Октябрь		Ноябрь		Декабрь	
1	40373	Эль-Кайсума			-			
2	40400	Эль-Ваджх		-		-		(-)2,9
3	41036	Эт-Таиф		(-)1,4				

№п/п	Код	Название метеостанции	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст
4	41150	Бахрейн		-				
5	41316	Салала		-		-		(-)2,7
6	41466	Таиз	-				-	
7	41467	Сана	-		-		-	
8	41468	Хадрамаут сайун	-				-	
9	41480	Аден				-		-

Основные выводы из табл.3.2 следующие:

- нестационарными по дисперсиям являются 27 рядов (4,2%) или гарантированно (при исключении условно нестационарных) – 25 рядов (3,8%);

- нестационарными по средним являются 60 рядов (9,2%) или гарантированно (при исключении условно нестационарных) – 40 рядов (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, они имеют место не только на станциях с неоднородными экстремумами или пропусками наблюдений и в целом характеризуют нестационарность климата, которая больше проявляется в теплые месяцы года.

В любом случае нестационарность температур воздуха не связана с инструментальными причинами, например, сменой регистрирующих приборов, и поэтому нестационарные данные не были исключены из дальнейшей процедуры восстановления пропусков и удлинения рядов. Примеры установленных нестационарных рядов показаны на рис.3.2

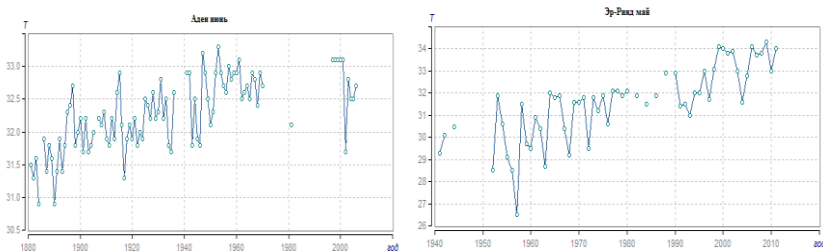


Рис. 3.2. Примеры рядов наблюдений, нестационарных по средним значениям

Результаты оценки однородности и стационарности получены также и для остальных станций архива температур, расположенных за пределами Аравийского полуострова. Общие выводы состоят в том, 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.

Аналогичным образом осуществлена оценка однородности и стационарности многолетних рядов месячных сумм осадков. Пример установленных неоднородных экстремумов для 44 станций на территории Аравийского полуострова приведен в табл.3.3.

Из результатов табл.3.3 следует, число рядов с неоднородными максимумами 74 (7,0%) или при исключении условно неоднородных – 49 рядов (4,6%). Количество рядов с неоднородными минимумами составляет 56 или 5,3%, а при исключении условно неоднородных – 39 рядов или 3,7%. 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. Также, как и в случае с температурой воздуха, неоднородные экстремумы осадков связаны с пропусками наблюдений и недостаточной продолжительностью рядов. Они также были оставлены в рядах для последующей процедуры приведения к многолетнему периоду.

Таблица 3.3

Установленные неоднородности в рядах месячных сумм осадков
на метеостанциях Аравийского полуострова

№ п/п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
			Январь				Февраль			
1	40270	АмманАэропорт	(-)2,4							
2	40271	Иордания уни		-						
3	40280	Дейр Алла		-		-				
4	40296	Раба		(-)2						
5	40340	Акаба Аэро-от					(-)1,8		(-)1,9	
6	40375	Табук							(-)1,7	
7	40394	Хаиль	(-)1,2							
8	40430	Медина					-		-	
9	40439	Янбу					(-)2,5			
10	41288	Масира							(-)2,5	
11	41314	Тумрайт					-		-	
12	41468	Хадрамаут сай-ун	-		-		(-)2			
13	41471	Ибб Аладин					(-)1,4			
14	41474	Абин Алкод					-			
15	41480	Аден	(-)2,7							
			Март				Апрель			
1	40255	Ирбид						-		
2	40270	АмманАэропорт					(-)2,4			
3	41024	Джидда	(-)2,3		(-)1,8					
4	41314	Тумрайт					-		(-)1,4	
5	41470	Ибб						(-)1		
6	41474	Абин Алкод	-		-					
7	41480	Аден			(-)2,4					

№ п/п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
			Май				Июнь			
1	40250	Руавшид					-			
2	40255	Ирбид					-		-	
3	40310	Маан			(-)2,9					
4	40582	Кувейт					-		-	
5	41140	Джизан					-			
6	41168	Доха	-		-					
7	41256	Сиб	-		-					
8	41258	Миналь-фахал					(-)1,8			
9	41316	Салала	(-)1							
10	41466	Таиз						-		-
11	41467	Сана					-		-	
12	41468	Хадрамаут сай-ун					-		-	
13	41469	Ходейда					-		-	
14	41474	Абин Алкод	-		-					
15	41480	Аден					(-)1		-	
			Июль				Август			
1	40430	Медина	-							
2	40438	Эр-Рияд					-		-	
3	41256	Сиб	-		-		-		-	
4	41258	Миналь-фахал	-		-		-		-	
5	41268	Сур					-			
6	41288	Масира	-		-		-		-	
7	41314	Тумрайт					-		-	
8	41469	Ходейда	-		-					
9	41470	Ибб						-		(-)2,8

№ п/п	Код	Название ме- теостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
			Сентябрь				Октябрь			
1	40250	Руавшид			-					
2	40255	Ирбид	(-)2		-					
3	40265	Мафрак	-		-					
4	40270	АмманАэропорт	-		-					
5	40271	Иордания уни	(-)1,4		(-)1,4					
6	40405	Гассим					(-)1,6		(-)2,5	
7	40416	Дахран					-		-	
8	40438	Эр-Рияд					-		(-)2,5	
9	41258	Миналь-фахал					-			
10	41268	Сур					-			
11	41288	Масира	-		-				-	
12	41314	Тумрайт					-		-	
13	41467	Сана					-		-	
14	41474	Абин Алкод					-		-	
15	41480	Аден					(-)1,4		(-)2,8	
16	42801	Тамуд					-		-	
			Ноябрь				Декабрь			
1	40256	Вади-Йабис		-						
2	40271	Иордания уни		(-)3						
3	40375	Табук	(-)1,9							
4	40394	Хаиль	-		-					
5	40416	Дахран	(-)2,6		(-)1,4					
6	40438	Эр-Рияд	(-)1,5		(-)1,5					
7	41150	Бахрейн	(-)2,1		(-)3					
8	41168	Доха	-		-					

№ п/п	Код	Название метеостанции	Макс.		Мин.		Макс.		Мин.	
			Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ	Д	СГ
9	41288	Масира	-		-					
10	41316	Салала			(-)2,3		-		-	
11	41467	Сана								
12	41468	Хадрамаут сай-ун	-		-					
13	41469	Ходейда					-			
14	41473	Ибб ярим	(-)1,2							
15	41474	Абин Алкод	-							

Результаты оценки стационарности осадков на тех же 44 станциях по критерию Фишера приведены в табл.3.4 для выявленных случаев нестационарности при уровне значимости 1% и менее. По критерию Стьюдента ни одного результата нестационарности при уровне значимости $\alpha=1\%$ и менее установлено не было.

Таблица 3.4

Установленные нестационарности дисперсий в рядах месячных сумм осадков на метеостанциях Аравийского полуострова

Код	Станция	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40255	Ирбид				-	-	-			-			
40256	Вади-Йабис											-	
40265	Мафрак									-	-		
40270	АмманАэропорт				-		-			-			
40271	Иордания уни									-			
40280	Дейр Алла									-	-		
40296	Раба				-	-						-	
40310	Маан					-					-		
40340	Акаба Аэро-от		-	-	-						-		

Код	Станция	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40375	Табук	-	-	-	-						-	-	
40394	Хаиль	-	-		-						-	-	
40400	Эль-Ваджх	-				-					-		
40416	Дахран			-	-	-					-	-	
40430	Медина		-							-	-		-
40438	Эр-Рияд							-				-	
40439	Янбу				-						-	-	-
40582	Кувейт						-						
41024	Джидда	-	-	-	-	-							
41036	Эт-Таиф							-	-			-	
41114	Хамис-Мушайт			-									
41140	Джизан	-		-			-				-		
41150	Бахрейн				-	-						-	
41168	Доха	-		-	-	-						-	
41256	Сиб			-		-		-	-		-		
41258	Миналь-фахал				-			-	-		-		
41268	Сур					-			-		-		
41288	Масира		-	-		-		-	-	-	-	-	
41314	Тумрайт				-		-	-		-	-		-
41316	Салала			-	-	-					-	-	-
41443	Ар-раян							-		-		-	
41466	Таиз		-	-			-				-		
41467	Сана		-				-	-			-	-	-
41468	Хадрамаут сайун	-				-	-	-		-		-	
41469	Ходейда			-			-	-	-	-			-
41471	Ибб Аладдин		-				-		-	-			
41472	Ибб Адлил								-			-	-

Код	Станция	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
41473	Ибб ярим							-				-	
41474	Абин Алкод	-	-	-		-	-		-		-	-	
41479	Хаджа	-											-
41480	Аден	-	-	-	-	-	-						-
42801	Тамуд		-								-	-	
сумма		10	12	14	15	15	12	11	9	12	21	19	9

Как следует из табл. 3.4, число случаев нестационарности дисперсий составляет 159 из 528 или 30,0% от общего их числа, что достаточно много, если принять, что при оценке однородности экстремумов таких случаев было 4%. Однако, анализ временных нестационарных рядов показал, что практически все случаи нестационарности дисперсий обусловлены влиянием одного или нескольких экстремумов, которые могут быть однородными при оценке по критериям Диксона и Смирнова-Граббса, но проявляют свою неоднородность при оценке дисперсии как второго момента распределения при возведении разности между экстремумом и средним значением в квадрат. По месяцам процент неоднородных данных распределен достаточно равномерно, но с некоторыми всплесками до 34-48% весной и осенью. Летом же 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).

В общем же нестационарные данные также были оставлены в рядах наблюдений для применения процедуры приведения к многолетнему периоду в связи с тем, что они являются фактическими наблюдениями и после процедуры восстановления данные снова должны быть проверены на однородность и стационарность.

3.3. Методика восстановления пропусков наблюдений и увеличения продолжительности рядов

Для того, чтобы результаты моделирования временных рядов были достаточно надежны и их можно было обобщать по территории необходимо, чтобы:

- ряды наблюдений имели достаточную продолжительность,
- в рядах отсутствовали пропуски наблюдений;
- ряды были практически одинаковой длины.

Восстановление пропусков наблюдений и приведение непродолжительных рядов к практически одинаковому многолетнему периоду осуществлялось на основе методики построения регрессионных уравнений связи между рассматриваемым рядом и рядами-аналогами в ближайших пунктах наблюдений, приведенной в работах [18, 19, 20, 30].

Последовательность приведения к многолетнему периоду состоит в следующем:

- все уравнения, удовлетворяющие условиям эффективности, располагаются в порядке убывания коэффициентов корреляции;
- восстанавливаются значения метеорологической характеристики приводимого пункта за период совместных наблюдений в пунктах-аналогах по уравнению с наибольшим значением коэффициента корреляции;
- далее используются уравнения регрессии, коэффициенты корреляции которых меньше предыдущего, но больше всех остальных;
- поэтапное восстановление погодичных значений метеорологической характеристики продолжается до тех пор, пока не будут использованы все уравнения регрессии, отвечающие условиям эффективности.

Уравнение множественной линейной регрессии, по которому осуществляется восстановление, имеет следующий вид [6]:

$$Y = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2 + \dots + b_j Y_j + \dots + b_l Y_l \quad (3.18)$$

При расчете параметров распределения и значений метеорологических характеристик за отдельные годы (Y_i) с использова-

нием аналитических методов, основанных на регрессионном анализе, в соответствии с [30] соблюдались следующие условия:

$$n \geq 6-10; \quad R \geq R_{кр}; \quad R/\sigma_R \geq A_{кр}; \quad b/\sigma_b \geq B_{кр}; \quad (3.19)$$

где n – число совместных лет наблюдений в приводимом пункте и пунктах-аналогах ($n \geq 6$ при одном аналоге, $n \geq 10$ при двух и более аналогах));

R – коэффициент парной или множественной корреляции между значениями рассматриваемого ряда и значениями характеристик в пунктах - аналогах;

b – коэффициенты уравнения регрессии;

σ_b – средняя квадратическая погрешность коэффициента регрессии,

$R_{кр}$ – критическое значение коэффициента парной или множественной корреляции (обычно задается ≥ 0.7);

$A_{кр}, B_{кр}$ – соответственно критические значения отношений R/σ_R , b/σ_b (обычно задается ≥ 2.0).

Если хотя бы один из коэффициентов уравнения регрессии не удовлетворяет условию (3.19), то это уравнение не используется для приведения к многолетнему периоду.

Восстановленные данные, полученные по уравнению (3.18) на основе метода наименьших квадратов (МНК) имеют систематически заниженную дисперсию. Исключение систематической смещенности дисперсии восстановленных данных осуществляется путем введения поправки в погодичные значения, полученные по уравнению регрессии:

$$Y_i' = (Y_i - \bar{Y}_n) / R + \bar{Y}_n, \quad (3.20)$$

где Y_i' – погодичные значения климатических характеристик, рассчитанные по уравнению регрессии (3.18), $\bar{Y}_n$ – среднее значение приводимого ряда за совместный с пунктом-аналогом период.

Критический анализ условий (3.19) показал, что часть из них можно исключить как избыточные, часть откорректировать и в то

же время следует добавить другие. В результате система условий эффективности будет иметь следующий вид:

$$Rad \geq Rad_{кр}; \quad n \geq 10; \quad R \geq 0.85; \quad k/\sigma_k \geq 2; \quad \sigma_{\varepsilon}/\sigma_Y \leq \sigma_{кр}(20\%); \quad \sigma_{\varepsilon}/Y_p \sigma'_{кр}(20\%); \quad (3.21)$$

где: $Rad_{кр}$ – предельный радиус (в км) внутри которого выбирают аналоги, Rad – расстояние от рассматриваемого пункта до пункта-аналога, σ_{ε} – стандартная погрешность уравнения (стандарт остатков), σ_Y – стандартное отклонение временного ряда метеорологической характеристики, Y_p – восстановленное значение.

Последнее шестое условие в (3.21) неприменимо для некоторых метеорологических характеристик, например, для температуры воздуха, т.к. она может иметь значения равные или близкие нулю. Условия (3.21) гарантируют, что погрешность восстановленного значения не превышает 20% от вариации многолетнего ряда и от самой расчетной величины при статистически значимых коэффицентах уравнения.

Для оценки эффективности восстановленных по уравнениям значений предлагаются следующие основные показатели:

- количество восстановленных лет (абсолютное Δn и относительное $\Delta n'(\%) = (N - n)/n * 100\%$;
- стандартная погрешность абсолютная (σ_{ε}) и относительная ($\sigma_{\varepsilon}'(\%)$), определяемая по формуле:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_Y \sqrt{1 - R^2}, \quad (3.22)$$

- отношение стандартной (или средней стандартной) погрешности восстановления (σ_{ε_B}) к среднему квадратическому отклонению исходного ряда ($\sigma_{\varepsilon_{\Phi}}$): $\sigma_{\varepsilon_B}/\sigma_{\varepsilon_{\Phi}}$ или это же отношение дисперсий $F = \sigma_{\varepsilon_B}^2/\sigma_{\varepsilon_{\Phi}}^2$, что представляет собой известный критерий Фишера.
- критерий Стьюдента для оценки однородности среднего восстановленных значений ($Y_{ср_B}$) по отношению к среднему наблюдаемых данных ($Y_{ср_{\Phi}}$).

3.4. Результаты восстановления данных и формирования многолетних рядов для моделирования

В соответствии с условием (3.21) 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. Наибольшее число одновременно учитываемых аналогов в уравнении (3.18) было задано 3, а минимальное значение совместного периода наблюдений $n \geq 10$.

Результаты оценки эффективности приведения рядов среднемесячных температур воздуха даны в табл.3.5, где в числителе – число лет до восстановления, в знаменателе – после приведения к многолетнему периоду.

Таблица 3.5

Оценка эффективности приведения температуры воздуха к многолетнему периоду на метеостанциях Аравийского полуострова

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
1	40356	Турайф	27/107	28/120	27/108	28/101	28/106	29/89
2	40373	Эль-Кайсума	27/95	32/108	28/108	32/68	29/96	32/92
3	40375	Табук	39/106	41/109	38/109	41/109	41/108	44/106
4	40394	Хаиль	44/109	44/122	46/133	47/104	45/65	48/89
5	40400	Эль-Ваджх	37/108	40/128	39/122	41/105	37/108	40/110
6	40405	Гассим	34/133	36/133	37/133	34/111	36/108	38/108
7	40416	Дахран	60/117	61/121	58/117	61/117	60/80	62/74
8	40430	Медина	50/111	52/110	53/92	54/77	51/80	54/95
9	40438	Эр-Рияд	55/87	55/106	61/108	58/71	58/79	58/105
10	40439	Янбу	28/111	31/101	29/107	33/71	30/63	31/63
11	40580	Кувейт	20/226	20/122	20/133	20/125	20/121	20/110
12	40581	Шуваих	20/122	20/123	19/133	20/132	20/121	20/112
13	40582	Кувейт 2	45/122	44/133	46/122	45/132	44/112	45/109

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
14	40583	Эль-Ахмади	18/126	19/122	18/133	18/125	18/121	16/109
15	40584	Мина-Эль-Ахмади	19/126	19/122	19/127	18/108	18/111	19/117
16	41020	Джидда	28/82	28/103	29/70	29/75	29/73	30/78
17	41036	Эт-Таиф	35/92	35/106	37/104	37/105	36/110	35/108
18	41140	Джизан	33/97	33/106	34/81	36/107	36/93	35/100
19	41150	Бахрейн	94/118	94/133	94/133	95/132	94/133	94/119
20	41170	Доха	32/133	35/133	35/133	34/120	34/112	32/110
21	41256	Сиб	33/81	31/98	34/66	34/81	34/97	34/95
22	41314	Тумрайт	25/69	21/92	23/69	24/69	25/98	23/82
23	41316	Салала	52/130	49/105	54/70	54/72	55/95	55/71
24	41480	Аден	97/130	99/131	98/131	93/131	96/128	95/125
		среднее	40/114	40/116	41/110	41/102	41/101	41/99
			7	8	9	10	11	12
1	40356	Турайф	32/89	28/64	28/64	29/103	30/99	30/107
2	40373	Эль-Кайсума	32/89	22/87	22/87	29/86	26/92	30/107
3	40375	Табук	43/89	37/108	37/108	40/70	39/107	39/103
4	40394	Хаиль	46/89	42/105	42/105	43/118	43/108	42/108
5	40400	Эль-Ваджх	37/109	37/103	37/103	39/107	40/107	40/108
6	40405	Гассим	35/93	34/107	34/107	32/98	34/94	33/105
7	40416	Дахран	61/70	59/119	59/119	59/102	58/97	61/109
8	40430	Медина	50/81	49/108	49/108	50/69	52/107	52/111
9	40438	Эр-Рияд	58/98	55/83	55/83	56/110	56/107	60/109
10	40439	Янбу	33/107	25/103	25/103	28/89	28/108	30/109
11	40580	Кувейт	20/107	20/110	20/110	20/111	20/133	19/111
12	40581	Шуваих	20/105	19/110	19/110	19/109	19/107	20/111
13	40582	Кувейт 2	46/110	44/111	44/111	43/108	43/108	42/110
14	40583	Эль-Ахмади	16/114	17/107	17/107	17/121	16/118	18/111

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
15	40584	Мина-Эль-Ахмади	19/116	18/88	18/88	19/121	19/111	19/111
16	41020	Джидда	31/73	30/116	30/116	31/70	32/70	32/110
17	41036	Эт-Таиф	35/103	34/99	34/99	30/106	32/110	31/100
18	41140	Джизан	34/61	28/102	28/102	31/97	30/94	30/100
19	41150	Бахрейн	94/110	94/129	94/129	94/109	95/133	95/109
20	41170	Доха	33/111	34/109	34/109	34/98	32/99	33/111
21	41256	Сиб	30/89	33/94	33/94	32/85	35/95	36/88
22	41314	Тумрайт	22/85	21/87	21/87	22/83	24/69	26/98
23	41316	Салала	51/97	53/68	53/68	57/110	54/68	54/73
24	41480	Аден	93/127	95/125	95/125	93/128	95/129	95/128
		среднее	41/96	39/102	39/102	40/101	40/103	41/106

Как следует из данных таблицы, средний период наблюдений в 39-41 год 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.

Оценка эффективности восстановления рядов месячных сумм осадков приведена в табл.3.6 для станций на Аравийском полуострове.

Таблица 3.6

Оценка эффективности приведения месячных сумм осадков к многолетнему периоду на метеостанциях Аравийского полуострова

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
1	40375	Табок	29/81					
2	40394	Хейл	31/64	34/61	31/110		26/109	
3	40400	Вейх	31/61	31/87			26/108	

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
4	40405	Гассин	30/111	30/59	32/85	32/103		
5	40416	Дхахран	59/117	57/117	59/117	59/111		
6	40430	Медина	43/73	40/108	47/69		36/130	46/52
7	40438	Риад	50/92	49/110	52/83	51/113	51/125	
8	40439	Джембо	21/108	24/107	25/86	28/110	28/63	
9	40582	Кувейт инт.	45/79	44/91	23/108		43/112	45/125
10	41024	Джадах	34/83	35/91			36/91	
11	41036	Тайф					29/110	28/110
12	41114	Хамис Му-шайт	23/111	21/110			24/110	21/109
13	41140	Гизан	23/111		26/106		27/110	30/105
14	41150	Бахрейн аэр.	89/96	89/108			88/103	90/127
15	41168	Дона инт.	38/88	39/99	39/104		38/110	
16	41256	Сииб аэр.	108/119	106/118	106/115	102/118	106/119	102/115
17	41258	Мина ал Фахал	21/110	21/109	21/119	20/119		
18	41268	Сур	26/57	22/95	26/116	25/104	23/100	
19	41288	Масирах					65/109	64/72
20	41314	Зумрайт	27/106	25/74	29/110	28/107	29/98	29/121
21	41316	Салалах	65/70	61/97	69/103	66/120	59/118	
22	41443	Ар-Раян	19/94	19/90	19/79	50/97	20/115	20/72
23	41466	Таиз	50/69	50/98	50/64		51/87	51/67
24	41467	Сана	52/95	52/79	52/71		52/106	52/67
25	41468	Хадрамаут сайун	28/65	28/78	27/108		28/101	27/103
26	41469	Ходейда	22/91	24/109				
27	41470	Ибб	22/106	109/109	22/111		23/107	23/109
28	41471	Ибб Аладин	24/83	24/59	24/101		25/106	

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
29	41472	Ибб Адлил	14/87	14/92	14/113		14/107	14/109
30	41473	Ибб Ярим					16/105	16/109
31	41474	Абин Алкод	23/49	23/49	23/122		23/100	23/107
32	41475	Даммар	12/46	12/60	12/19		12/103	12/89
33	41476	Дамар Русаб	10/108	10/60	10/112		10/107	10/107
34	41478	Алмхуит					12/120	12/109
35	41478	Алмхуит ку- кабан	15/96	15/59			15/99	14/103
36	41479	Хаджа	19/76	19/59			18/110	18/103
37	41480	Аден	84/123	83/121			87/131	84/121
38	41482	Лахдж	13/87	13/66			13/111	
39	41485	Лахдж алфюш	13/69	13/55			13/108	14/99
40	42801	Тамуд	26/86	26/87			25/117	
		среднее	34/82	36/79	34/71	35/51	34/98	34/73
			7	8	9	10	11	12
1	40375	Табок					24/120	23/43
2	40394	Хейл	35/36	32/85	28/105	29/111		
3	40400	Вейх				29/108		
4	40405	Гассин					28/108	23/57
5	40416	Дхахран					57/98	59/103
6	40430	Медина	41/59		37/86		39/119	37/102
7	40438	Риад	53/71				48/86	46/57
8	40439	Джембо					23/106	
9	40582	Кувейт инт.			46/117		44/121	42/59
10	41024	Джадах	38/69	34/84	39/98		37/89	
11	41036	Тайф	31/111		26/105	25/110	23/110	
12	41114	Хамис Му- шайт	23/108	20/108	21/100		19/107	

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
13	41140	Гизан	27/110		24/105	26/108		
14	41150	Бахрейн аэр.	89/96	88/94	89/95		82/103	89/92
15	41168	Дона инт.		39/57			38/106	39/50
16	41256	Сииб аэр.	101/118	103/117	103/106		104/118	103/118
17	41258	Мина ал Фахал			22/70		22/92	22/36
18	41268	Сур					24/118	
19		Масирах	57/87	58/65			63/78	
20	41314	Зумрайт	24/101	27/105	26/41			
21	41316	Салалах	63/73	66/110	65/78	67/103		66/84
22	41443	Ар-Раян	20/105	19/98	19/113		18/114	19/118
23	41466	Таиз	50/60	50/67	51/91	50/97		
24	41467	Сана	51/83	50/75	52/69		52/115	52/75
25	41468	Хадрамаут сайун	28/106	28/110	28/100		28/107	28/72
26	41469	Ходейда						26/92
27	41470	Ибб	23/109	23/118		23/108	23/109	21/62
28	41471	Ибб аладин		14/111			25/121	25/27
29	41472	Ибб адлил	14/108		14/100	14/111	14/109	14/93
30	41473	Ибб ярим	16/112	16/108	16/100	16/121		
31	41474	Абин алкод	23/95		23/92	23/105		
32	41475	Дамар	12/25	12/111	12/102		12/49	
33	41476	Дамар русаб	10/109	10/109	10/105			
34	41478	Алмхуит				11/109		
35	41478	Алмхуит ку- кабан	14/105	14/110	14/104			
36	41479	Хаджа	17/106	17/108	16/106	17/108	16/102	16/86
37	41480	Аден	82/121	85/101	83/124		80/129	

№ п/п	код	название	Месяцы					
			1	2	3	4	5	6
38	41482	Лахдж	13/106	13/104	13/94			
39	41482	Лахдж мдрам	10/107	10/118				
40	41485	Лахдж алфюш	14/106	14/86				
41	42801	Тамуд		28/32			28/21	26/59
		среднее	33/73	33/68	33/71	33/57	33/74	33/50

Пустая ячейка в таблице свидетельствует о том, что данные за этот месяц восстановить не удалось. При этом при расчете средних за каждый месяц количество восстановленных данных в пустых ячейках задавалось равным наблюдаемым данным.

Из табл.3.6 следует, что 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 по критериям Диксона и Смирнова-Грabbса и стационарность средних значений и дисперсий по критериям Стьюдента и Фишера. Данная проверка необходима, т.к. небольшая неоднородность и нестационарность в рядах-аналогах может привести к существенной неоднородности в восстановленных данных в рассматриваемом пункте, а с другой стороны могут иметь место значительные погрешности восстановленных данных за отдельные годы.

В результате проверки многолетних рядов температуры воздуха на однородность экстремумов гарантированно неоднородным ($\alpha=1\%$) получен 51 ряд, содержащий неоднородные максимумы (17,7%) и 54 ряда, содержащие неоднородные минимумы (18,7%). Достаточно большой процент по сравнению с результатами

Табл.3.1 обусловлен тем, что часть экстремумов так и осталось неоднородными несмотря на увеличение длины ряда и к ним еще добавились восстановленные экстремумы, которые содержали достаточно большие погрешности восстановления. Поэтому все установленные по критериям неоднородные экстремумы были исключены из рядов наблюдений для дальнейшего моделирования. Даже, если это и были наблюдаемые данные, то они также могут содержать большую погрешность измерений, а главное, что исключение одного значения из многолетнего ряда наблюдений практически не должно повлиять на параметры моделей временных рядов и установление долгопериодных климатических изменений.

При проверке стационарности средних значений и дисперсий для восстановленных многолетних рядов по критериям Стьюдента и Фишера было получено гарантированно 78 нестационарных рядов по дисперсиям (27%) и 73 ряда нестационарных по средним значениям (25%). Детальный анализ каждого восстановленного временного ряда показал, что в большинстве случаев нестационарность дисперсий и средних значений обусловлена наличием неоднородных экстремумов, которые были исключены из ряда. В других же случаях, особенно для средних значений нестационарность обусловлена погрешностями в восстановленных данных, которые также были исключены из рядов наблюдений. В результате были сформированы откорректированные временные ряды среднемесячных температур воздуха для последующего моделирования, продолжительность которых представлена в табл.3.7. Как правило, большинство рядов наблюдений заканчивались 2011-2011 гг.

Таблица 3.7

Продолжительности откорректированных рядов наблюдений, принятых для моделирования

Код	Станция	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40356	Турайф	107	110	108	101	106	50	61	102	63	64	99	107
40373	Эль-Кайсума	95	108	108	68	94	50	60	57	87	56	91	106
40375	Табук	106	109	108	211	107	105	89	60	108	70	104	60

Код	Станция	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40394	Хаиль	109	121	131	105	65	50	99	60	59	117	106	49
40400	Эль-Ваджх	108	126	121	111	106	110	61	86	102	107	107	104
40405	Гасим	133	133	132	117	106	50	50	60	105	95	46	105
40416	Дахран	117	120	117	76	79	74	62	62	119	62	97	109
40430	Медина	111	110	61	71	78	89	61	70	48	55	106	110
40438	Эр-Рияд	86	106	108	45	79	71	71	67	70	68	107	57
40439	Янбу	111	100	106	125	63	45	62	64	62	50	108	108
40580	Кувейт	126	122	131	130	121	97	107	54	110	111	133	222
40581	Шуваих	121	133	133	132	121	91	61	114	63	109	107	110
40582	Кувейт 2	121	133	122	122	110	108	61	53	111	108	108	109
40583	Эль-Ахмади	126	122	133	108	121	35	104	58	106	121	115	122
40584	Мина-Эль-Ахмади	122	122	127	75	110	110	106	106	86	122	121	110
41020	Джидда	84	103	70	51	71	48	53	69	115	68	57	100
41036	Эт-Таиф	91	105	59	48	110	108	61	60	60	58	59	47
41140	Джизан	96	106	78	132	93	97	58	62	46	96	50	108
41150	Бахрейн	131	133	132	132	133	110	73	60	60	59	133	133
41170	Доха	130	132	133	80	111	110	49	46	133	46	99	40
41256	Сиб	40	97	40	69	96	91	88	60	93	85	95	97
41314	Тумрайт	69	50	69	71	94	82	84	39	58	31	50	73
41316	Салала	68	102	60	131	95	67	65	69	56	66	122	107
41480	Аден	84	84	85	101	128	65	60	63	63	126	99	106
	среднее	104	112	103	100	100	80	71	67	83	81	97	100

Из анализа данных табл.3.7 и сопоставления с результатами табл.3.5 можно сделать следующие выводы:

- после корректировки продолжительность временных рядов в среднем уменьшилась на 13 лет, причем в месяцы холодного по-

лугодия всего на 1-7 лет, а в месяцы теплого полугодия – на 19-35 лет;

- средняя продолжительность откорректированных рядов составляет 92 года и охватывает практически все 20-е столетие и начало 21-го века до 2010-2011 гг.;

- средняя продолжительность откорректированных рядов на полуострове имеет годовой ход с максимумами 100-112 лет в холодные месяцы года и с минимумом 67-71 год в июле и августе и около 80 лет в остальные месяцы теплого периода года.

Аналогичные исследования по оценке однородности и стационарности восстановленных рядов и их корректировке были проведены и для месячных сумм осадков. Гарантированно неоднородные максимумы были установлены в 38 рядах (7,2%) и неоднородные минимумы – в 34 рядах (6,4%), что значительно меньше, чем для температур воздуха. Эти неоднородные экстремумы были исключены из рядов наблюдений для дальнейшего моделирования. Нестационарными по дисперсиям являются уже 157 рядов (30%) и нестационарность в них обусловлена также отдельными наблюдаемыми и восстановленными экстремумами, которые были исключены из рядов наблюдений. Здесь же интересно отметить, что при оценке стационарности средних значений по критерию Стьюдента не было получено ни одного нестационарного ряда. В результате продолжительность откорректированных рядов месячных сумм осадков, подготовленных для дальнейшего моделирования уменьшилась несущественно – примерно на 5-7%.

ГЛАВА 4. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА АРАВИЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

4.1. Методы статистического моделирования и основные виды моделей

В качестве моделей временных рядов рассматривались следующие [22, 23, 24]:

- 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 [26, 34]:

- 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 среднеквадратическое отклонение (σ), 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 каждой части ряда:

$$\begin{aligned} Y_{1cp} &= \text{const1}, \quad Y_{2cp} = \text{const2}, \\ \sigma_1 &= \text{const1}, \quad \sigma_2 = \text{const2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Момент ступенчатых изменений (t_n) определяется визуально или на основе дополнительной информации о факторе и дате нарушения стационарности (например, изменение индекса атмосферной циркуляции), а также может быть определен итерациями при достижении минимального значения суммы квадратов откло-

нений от среднего значения для каждой из двух частей временного ряда:

$$SS = \sum_1^{n1} (Y_i - Y_{1cp})^2 + \sum_{n1+1}^n (Y_i - Y_{2cp})^2 = \min , \quad (4.2)$$

где $n1, n2=n-n1$ – объемы каждой из двух частей временного ряда; SS - общая сумма квадратов отклонений.

Стандартное отклонение остатков ступенчатой модели для одной ступени и двух стационарных интервалов определяется по формуле:

$$\sigma_{ступ} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}} \quad (4.3)$$

где $\sigma_{ступ}$ – стандартное отклонение остатков модели ступенчатых изменений; σ_1, σ_2 – стандартные отклонения стационарных отрезков временного ряда; n_1, n_2 – объемы стационарных отрезков.

Модель линейного тренда выражается следующим уравнением [6]:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \quad (4.4)$$

где t – время; b_1, b_0 – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов (МНК):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}, \quad (4.5)$$

$$b_0 = Y_{cp} - b_1 t_{cp} \quad (4.6)$$

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или ко-

коэффициента корреляции R зависимости (4.4), который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}} \quad (4.7)$$

Статистическая значимость R определяется из условия $R \geq R^*$, где R^* - критическое значение коэффициента корреляции, определяемые при заданном числе степеней свободы (v) и уровне значимости (α), где $v = n-2$, n - объем ряда, $\alpha=5\%$ [9].

Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков вычисляется по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2} \quad (4.8)$$

где σ_y – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего); σ_ε – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Для количественной оценки отличий модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарного среднего рассчитываются относительные отклонения по формулам:

$$\Delta_{mp} = \left(\frac{\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_\varepsilon}{\bar{\sigma}_y} \right) \bullet 100\% \quad , \quad (4.9)$$

$$\Delta_{cmyн} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{cmyн}}{\sigma_y} \right) \bullet 100\% \quad , \quad (4.10)$$

где Δ_{mp} , $\Delta_{cmyн}$ – относительные отклонения или отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; σ_y , σ_ε , $\sigma_{cmyн}$ – стандартные отклонения остатков соответственно моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений.

В первом приближении можно считать, что если относительное отклонение превышает 10%, то нестационарная модель является эффективнее стационарной. Однако правильное, когда это отличие от стационарности является не только существенным, но еще и статистически значимым. Для оценки статистической значимости монотонных (трендовых) и ступенчатых изменений во временных рядах был применен критерий Фишера, показывающий, насколько статистически значимо отличаются остаточные дисперсии выбранных моделей от дисперсии временного ряда (стационарной модели). Статистики критерия Фишера [9, 20, 28, 32] для каждой из двух конкурирующих моделей по отношению к модели стационарной выборки вычисляются по формулам:

$$F_{TP} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_{\varepsilon}}, \quad (4.11)$$

$$F_{стун} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_{стун}} \quad (4.12)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, т.к. она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки.

Рассмотренные основные виды моделей временных рядов применимы к анализу информации, имеющей погодичную дискретность, т.е. одна климатическая характеристика за каждый год, например, среднегодовая температура, среднемесячная температура конкретного месяца, ежедневный максимум температуры за каждый год и т.д. Вместе с тем интерес представляют и параметры модели внутригодовых изменений, которые характеризуют как климатические изменения, связанные с приходящей солнечной радиацией, так и адвективные свойства, связанные с погодными изменениями. При этом, колебания метеорологических характеристик внутри года являются сложным композиционным процессом,

так как включают в себя мезомасштабную, синоптическую, климатическую и другие виды составляющих и поэтому моделирование колебаний внутри года аналогично декомпозиции (разделению) сложного процесса на однородные составляющие.

Можно непосредственно задать вид сезонной функции аналитически, например, описав ее гармонической функцией, параметры которой за каждый год можно определить по данным наблюдений, применяя метод наименьших квадратов. Однако, из-за сложного взаимодействия радиационного и адвекционного процессов, нелинейности прохождения радиации сквозь толщу атмосферы и влияния местных условий вблизи пунктов наблюдений вид сезонной функции часто оказывается неодинаковым для разных станций. В настоящей работе применялась модель внутригодовых колебаний, описанная в работах [17, 22], для которой задается «климатическая» сезонная функция усреднением данных для каждого месяца за определенное число лет. Осреднение во времени за многолетний период позволяет исключить влияние синоптических и макросиноптических процессов. В рамках данной модели предполагается, что вид сезонной функции одинаков для каждого года, что выражается в существовании линейной зависимости между значениями климатической сезонной функции и сезонной функции для отдельного года. В связи с тем, что вид функции циклов одинаков в каждый год, зависимости между функциями циклов конкретных лет и средней многолетней функцией будут иметь вид прямых линий, коэффициенты которых будут характеризовать отличие конкретного года от средних многолетних условий. В этом случае отклонения от прямой линии в виде остатков будут характеризовать процессы масштаба меньше годового, например, макросиноптические, синоптические и т.д. Выражение декомпозиции на основе средних однородных условий для процесса годового масштаба в результате можно записать как:

$$Y_{ij} = Y_{1ij} + Y_{2ij}, \quad (4.13)$$

и

$$Y_{1ij} = B_{1j} \cdot Y_{cpi} + B_{0j}, \quad (4.14)$$

$$Y_{2ij} = \varepsilon_{ij}, \quad (4.15)$$

или

$$Y_{ij} = B_{1j} \cdot Y_{cpi} + B_{0j}, \pm \varepsilon_{ij}, \quad (4.16)$$

где Y_{ij} – матрица исходных наблюдений, где i – номер месяца (или дня) внутри года, j – номер года; Y_{1ij} – составляющие композиционного процесса, начиная с годового масштаба и более; Y_{2ij} – составляющие композиционного процесса масштабов меньших, чем год; Y_{cpi} – средняя многолетняя функция годового хода; B_{1j} – коэффициент, характеризующий отличие амплитуды j -го годового хода от амплитуды среднего многолетнего годового хода и при $B_{1j} = 1$ амплитуда конкретного года совпадает с многолетней; B_{0j} – коэффициент, характеризующий отличие уровня годового хода j -го года от уровня среднего многолетнего годового хода и при $B_{0j}=0$ уровень конкретного годового хода совпадает со средним многолетним значением; ε_{ij} – отклонения от линии связи конкретных и многолетних условий, характеризующие составляющие композиционного процесса, масштаб которых меньше годового и могут быть представлены в виде их обобщенного показателя – стандартного отклонения ($S\varepsilon_j$), характеризующего интенсивность таких процессов для j -го года.

Уравнение (4.14) позволяет не только вычислить основные параметры сезонной функции (B_1 и B_0) за каждый год, но и осуществить разделение общей вариации внутри года на климатическую и синоптическую, причем последняя также может быть представлена обобщенным параметром ($S\varepsilon$). Отклонения ε_{ij} могут также иметь сезонные изменения и характеризовать новый комплекс процессов разных временных масштабов. Поэтому представление всей синоптической изменчивости одним параметром $S\varepsilon$ является несколько условным и его следует рассматривать как интегральный показатель всех отклонений относительно сезонной функции.

В результате по среднемесячным температурам за каждый год определяются два коэффициента модели B_1 и B_0 , характеризующие амплитуду годового хода и среднюю за год температуру и один параметр $S\varepsilon$, характеризующий интенсивность макросиноптической изменчивости. Временные ряды B_1 , B_0 и $S\varepsilon$ также аппроксимируются моделью стационарной выборки и нестационарными моделями тренда и ступенчатых изменений.

4.2. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах среднемесячной температуры воздуха

Параметры моделей временных рядов и характеристики их эффективности были рассчитаны для всех пунктов наблюдений за температурой воздуха на Аравийском полуострове и для каждого месяца. Пример результатов для температуры января и для станций с установленной эффективной нестационарной моделью приведен в табл. 4.1, где: $F_{ст}$, $St_{ст}$ – статистики критериев Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух частей временного ряда, полученных по дате ступенчатых изменений ($T_{ступ.}$), $T_{нач.}$, $T_{кон.}$ – годы начала и окончания наблюдений, N – период наблюдений (в годах), $R_{тр}$ – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Таблица 4.1

Эффективные нестационарные модели и их характеристики
(температура воздуха января, Аравийский полуостров)

Код ВМО	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{ступ}\%$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
41256	12,4	15,1	1,3	1,39	2,82	2,97	1944	1930	2011	81	0,48
41316	14,7	14	1,37	1,35	3,27	4,42	1914	1881	2011	130	0,52
41480	18,6	23	1,51	1,69	5,8	5,87	1926	1881	2011	130	0,58

В связи с тем, что нестационарность могла быть обусловлена погрешностями в восстановленных данных, временные ряды с выявленной нестационарностью подвергались более детальному анализу на предмет установления причин этой нестационарности. Так, для станции с индексом 41256 Сиб было установлено, что данные до 1971 г. являются восстановленными и поэтому было осуществлено дополнительное моделирование временного ряда, состоящего только из наблюдаемых данных за период с 1971 г по 2011 г. Аналогичным образом, для рядов с индексами 41316 Салала и 41480 Аден также было повторено моделирование только на основе наблюдаемых данных. Новые результаты по этим пунктам приведены в табл.4.2.

Таблица 4.2

Пересчитанные характеристики моделей временных рядов
(температура воздуха января, Аравийский полуостров)

Код ВМО	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{ступ}\%$	F_{mp}	$F_{ступ}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
41256	4,2	7,8	1,09	1,18	2,06	2,13	1990	1972	2011	40	0,29
41316	7,7	11,2	1,17	1,27	1,46	3,47	1977	1944	2011	68	0,38
41480	1,3	3,4	1,03	1,07	1,21	2,22	1976	1927	2009	83	0,16

Как следует по данным табл. 4.2, из трех рядов с эффективными нестационарными моделям после исключения восстановленных данных остался только один ряд на метеостанции 41316 Салала, находящейся на территории Омана. Результаты моделирования также показали, что из нестационарных моделей наиболее эффективной является модель ступенчатых изменений со средним значением $\Delta_{ступ} = 3,3\%$ по сравнению с моделью линейного тренда, где среднее отличие от нестационарности составляет $\Delta_{mp} = 1,2\%$. Поэтому для построения пространственной интерполяционной модели отличий от стационарности [23, 24] использованы данные по $\Delta_{ступ}$. Полученная пространственная модель $\Delta_{ступ}$ для среднемесячной температуры января на Аравийском полуострове показана на рис. 4.1, где рядом с пунктами наблюдений приведены численные значения $\Delta_{ступ}$ в %.

Как следует из рис.4.1, области с нестационарными моделями на территории Аравийского полуострова практически отсутствуют и нестационарная модель представлена только одной станцией на юге (Салала, Оман)

Аналогичным образом было осуществлено моделирование временных рядов среднемесячной температуры воздуха и для других месяцев. Также, если была установлена нестационарность, то оценивалась ее устойчивость путем исключения восстановленных данных, экстремумов, данных первой части ряда до 1950–1960-х гг. В результате получены следующие нестационарные модели температуры воздуха для остальных месяцев, которые приведены в Таблице 4.3.

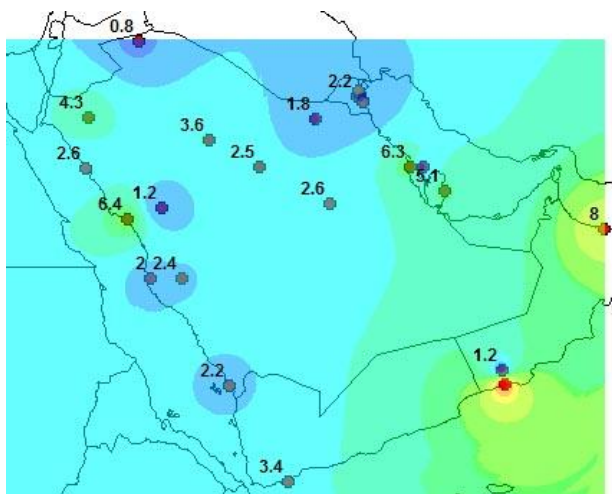


Рис. 4.1. Пространственная модель отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячной температуры января

Таблица 4.3

Эффективные нестационарные модели и их характеристики
(температура воздуха, Аравийский полуостров)

Код ВМО	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$F_{тр}$	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{стун.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
Март											
41316	16,6	19,6	1,44	1,55	3,95	4,27	1985	1941	2011	60	0,55
Апрель											
40405	7	10,5	1,16	1,25	1,29	5,07	1999	1901	2011	111	0,37
40438	10	13,3	1,24	1,33	1,4	4,41	1999	1938	2011	71	0,44
40439	13,7	12,6	1,34	1,31	1,38	3,09	1978	1967	2011	45	0,5
41316	29,9	26,4	2,03	1,84	3,1	5,45	1984	1937	2010	71	0,71
Май											
40373	13,3	17,3	1,33	1,46	1,6	5,79	1995	1902	2011	94	0,5
40394	19,9	17,8	1,56	1,48	1,91	4,54	1987	1902	2011	65	0,6
40438	25,2	25,2	1,79	1,79	2,4	4,85	1973	1923	2011	79	0,66

Код ВМО	$\Delta_{np}\%$	$\Delta_{сгун}\%$	F_{np}	$F_{сгун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
40439	6	15,2	1,13	1,39	1,7	4,13	1987	1944	2010	63	0,34
40580	14,7	14	1,37	1,35	1,43	6,12	1994	1888	2011	121	0,52
40581	13,3	11,7	1,33	1,28	2,24	4,19	1920	1888	2011	121	0,5
40582	10,9	15,3	1,26	1,39	1,39	5,96	1985	1900	2011	110	0,45
40583	14,1	16	1,36	1,42	1,64	6,61	1987	1888	2011	121	0,51
41020	6	10,9	1,13	1,26	1,76	4,51	1996	1937	2010	71	0,34
41140	5,9	18,9	1,13	1,52	2,14	-4,57	1963	1911	2011	93	-0,34
41150	23	19,3	1,69	1,53	2,29	7,54	1975	1878	2011	133	0,64
41170	19	22,3	1,52	1,66	2,07	6,72	1975	1900	2011	111	0,59
41314	14,2	16,1	1,36	1,42	1,99	4,73	1948	1906	2010	94	0,51
Июнь											
40356	11	17,7	1,26	1,48	2,83	3,59	1989	1962	2011	50	0,46
40394	14,3	22,7	1,36	1,67	1,69	4,43	1995	1962	2011	50	0,52
40405	25,6	30,4	1,81	2,07	2,61	5,28	1996	1962	2011	50	0,67
40438	18,6	24,3	1,51	1,75	2,16	5,91	1994	1941	2011	71	0,58
40439	14,2	13,1	1,36	1,32	1,49	3,2	1994	1967	2011	45	0,51
40582	0,7	10,4	1,01	1,24	4,28	-2,32	1925	1901	2011	108	0,12
41150	20,1	19,2	1,57	1,53	1,58	6,96	1995	1902	2011	110	0,6
Июль											
40356	13,3	16,6	1,33	1,44	1,84	4,47	1996	1951	2011	61	0,5
40373	13	15,6	1,32	1,4	2,36	4,58	1996	1952	2011	60	0,49
40375	5,3	10,1	1,11	1,24	1,01	4,37	1996	1923	2011	89	0,32
40400	8,1	23,7	1,18	1,72	1,74	5,25	1995	1951	2011	61	0,39
40405	17,8	23,8	1,48	1,72	2,39	4,63	1996	1962	2011	50	0,57
40416	2	12,4	1,04	1,3	1,3	3,87	1996	1949	2010	62	0,2
40430	13,1	12,9	1,32	1,32	2,53	3,69	1986	1951	2011	61	0,49
40438	30,4	26,6	2,07	1,86	8,09	4,82	1978	1941	2011	71	0,72
40439	15,4	25,2	1,4	1,79	2,24	5,65	1995	1950	2011	62	0,53

Код ВМО	$\Delta_{np}\%$	$\Delta_{стун}\%$	F_{np}	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
40581	16,2	28,4	1,42	1,95	5,06	5,08	1987	1951	2011	61	0,55
40582	37,4	35,5	2,55	2,4	9,9	4,57	1980	1951	2011	61	0,78
41020	12,4	12,4	1,3	1,3	1,69	3,85	1994	1952	2005	53	0,48
41150	22,3	31,5	1,66	2,13	2,58	7,32	1996	1939	2011	73	0,63
41170	33,3	31,1	2,25	2,1	3,15	5,33	1997	1962	2011	49	0,75
Август											
40373	26,5	31,7	1,85	2,15	3,84	4,7	1985	1954	2010	57	0,68
40375	3	16,3	1,06	1,43	1,69	4,61	1998	1951	2010	60	0,24
40394	13,9	23,2	1,35	1,69	2,06	5,44	1998	1951	2010	60	0,51
40405	18,6	30,6	1,51	2,08	2,49	6,61	1998	1951	2010	60	0,58
40416	0,3	14	1,01	1,35	5,68	-2,33	1967	1949	2010	62	-0,08
40430	24,1	25,7	1,74	1,81	2,55	6,42	1995	1941	2010	70	0,65
40438	41,7	30,7	2,95	2,08	3,42	5,73	1985	1938	2010	67	0,81
40439	29,3	29,6	2	2,02	2,42	6,4	1995	1947	2010	64	0,71
40580	14,4	24,6	1,37	1,76	4,2	4,48	1988	1957	2010	54	0,52
40582	33,4	38	2,25	2,6	3,95	6,23	1995	1958	2010	53	0,75
40583	10,6	33,5	1,25	2,26	2,54	6,73	1998	1951	2010	58	0,45
41036	20,2	24	1,57	1,73	4,05	4,2	1983	1951	2010	60	0,6
41140	15,1	15,8	1,39	1,41	1,27	2,83	1961	1906	2009	62	0,53
41150	2,8	18	1,06	1,49	1,68	4,72	1998	1951	2010	60	0,24
41170	27,5	20,6	1,91	1,59	2,31	3,81	1979	1962	2009	46	0,69
Сентябрь											
40394	15,6	14,3	1,4	1,36	2,59	3,13	1965	1951	2010	59	0,54
40405	0,1	10,2	1	1,24	7,93	2	1915	1904	2010	105	0,04
40430	13,5	16,4	1,34	1,43	1,73	3,73	1996	1963	2010	48	0,5
40438	39,4	28,3	2,73	1,94	4,47	5,56	1965	1941	2010	70	0,8
40439	28,1	39,6	1,93	2,75	9,22	4,72	1979	1931	2010	62	0,69
40581	10,9	12,4	1,26	1,3	2,93	3,35	1972	1941	2003	63	0,45

Код ВМО	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$F_{тр}$	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
41140	13,3	14,7	1,33	1,37	1,13	3,38	1995	1965	2010	46	0,5
41314	9,1	13,7	1,21	1,34	1,56	3,57	1987	1953	2010	58	0,42
Октябрь											
40373	4	10,8	1,09	1,26	1,17	3,11	1986	1952	2009	56	0,28
40430	10,3	12,9	1,24	1,32	1,13	3,31	1986	1956	2010	55	0,44
40438	21,9	22,9	1,64	1,68	1,71	4,99	1985	1941	2010	68	0,62
40439	38,8	34,7	2,67	2,35	4,28	4,1	1986	1961	2010	50	0,79
41036	7,5	10,9	1,17	1,26	2,14	3,3	1985	1951	2010	58	0,38
41170	15	17,4	1,38	1,47	1,58	3,86	1995	1963	2010	46	0,53
41316	22,3	22	1,66	1,65	2,8	5,09	1985	1943	2008	66	0,63
Ноябрь											
41036	16,5	19	1,43	1,52	3,69	4,23	1987	1952	2010	59	0,55
41140	7	10,7	1,16	1,25	1,89	3,48	1999	1961	2010	50	0,37
41314	7,6	12,4	1,17	1,3	1,33	3,35	1993	1961	2010	50	0,38
40480	12	22,7	1,29	1,67	1,14	4,58	1986	1942	2006	122	0,48

Как следует из данных табл.4.3, в зимние месяцы нестационарные модели практически отсутствуют, а их наибольшее число имеет место в июле и августе и составляет до 40-45% от всех случаев. При этом, средние по территории $\Delta_{стун}$ следующие: для мая $\Delta_{стун}=12,5\%$, для июня $\Delta_{стун}=10,5\%$, для июля $\Delta_{стун}=15,2\%$, для августа - $\Delta_{стун}=18,0\%$ и для сентября $\Delta_{стун}=10,6\%$. В сравнении с этим для зимних месяцев: $\Delta_{стун}=4,8\%$ для декабря, $\Delta_{стун}=3,3\%$ для января и $\Delta_{стун}=4,2\%$ для февраля. Практически во всех случаях нестационарность обусловлена ступенчатым ростом температуры и в большинстве случаев эта дата относится к 1980 – 1990 годам. Модель линейного тренда менее эффективна, чем ступенчатых изменений и средние значения $\Delta_{тр}\%$ за теплое полугодие составляют: 9,6% - для мая, 6,9% для июня, 11,4% для июля, 12,5% для августа и 7,7% для сентября.

На рис.4.2 приведены пространственные распределения отклонений $\Delta_{стун}$ для температуры мая, июня, июля и августа меся-

цев, имеющих наибольшее отличие от стационарной модели, где территория эффективной нестационарной модели при $\Delta_{стун} > 10\%$ представлена цветами красных оттенков, а неэффективных нестационарных моделей – синих оттенков.

Как следует из рис.4.2, нестационарные модели в летние месяцы преобладают практически на всей территории Аравийского полуострова за исключением его южной части. Наибольшее отличие от стационарности имеет место в августе, причем практически на всей территории полуострова отличия от стационарности достигают 20-30% за исключением прибрежных южных областей. В мае же области стационарности имеют место на западе полуострова в районе Красного моря и в последующие летние месяцы постепенно смещаются с запада на юг.

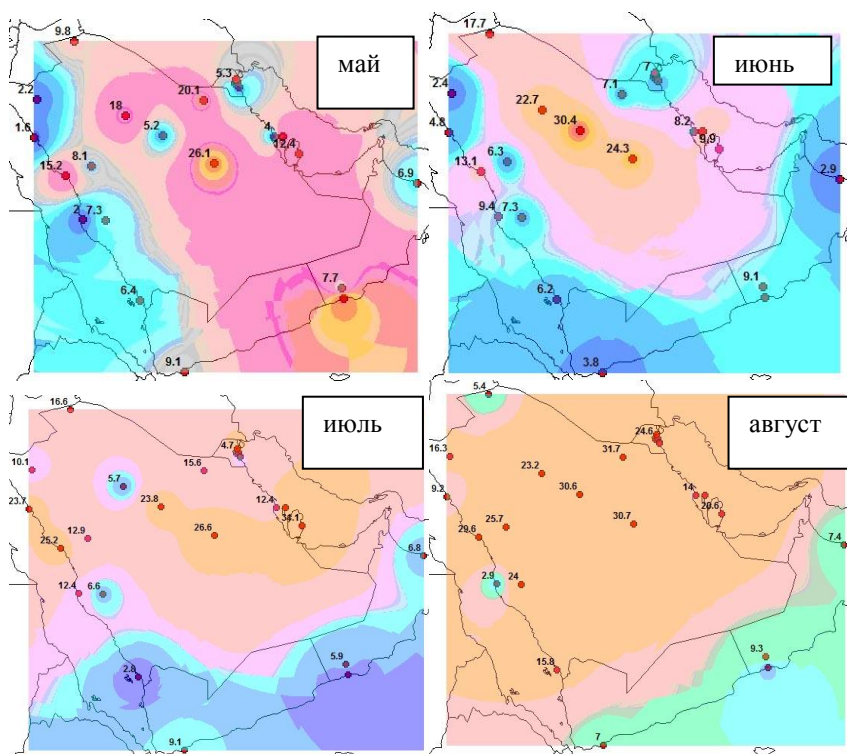


Рис. 4.2. Пространственная модель отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячной температуры мая, июня, июля и августа

На рис.4.3 приведены пространственные распределения отклонений $\Delta_{\text{стун}}$ для апреля и осенних месяцев, в которые процент нестационарности меньше. Из рисунков видно, что осенью область нестационарных моделей постепенно уменьшается и смещается на юго-запад, т.е. в прибрежные районы. В апреле, наоборот, зона нестационарности распространяется с юга в центральные районы.

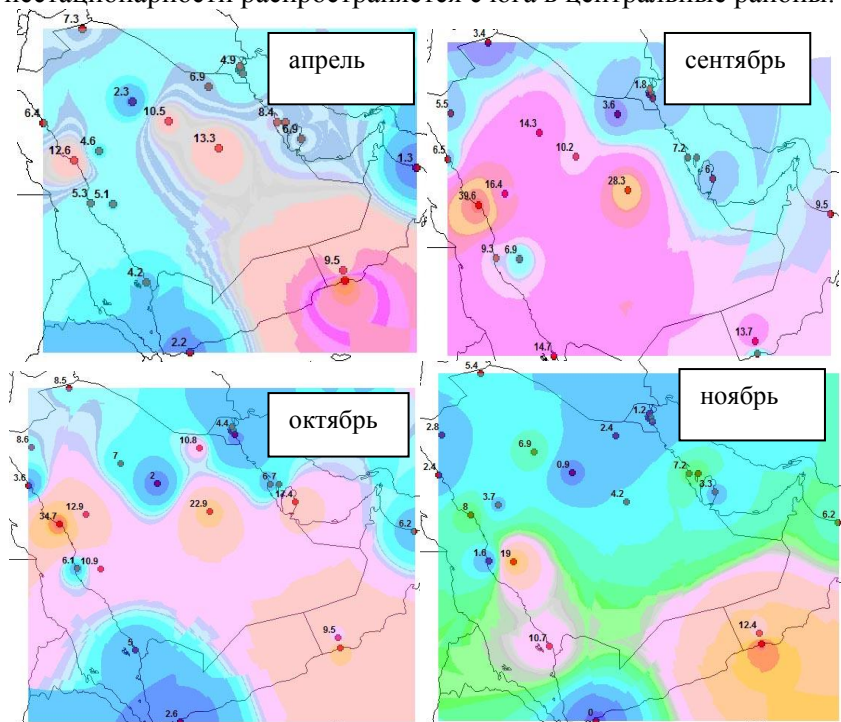


Рис. 4.3. Пространственная модель отклонений от нестационарности $\Delta_{\text{стун}}$ в % для среднемесячной температуры апреля, сентября, октября и ноября

В целом имеет место годовой ход динамики пространственной нестационарности на Аравийском полуострове. Если в зимние месяцы практически на всем полуострове температуры стационарны, то в марте нестационарность проявляется в отдельных станциях на юге; в апреле – на юге и в центре полуострова; в мае – практически на всем полуострове за исключением его западной части; в летние месяцы стационарными остаются только юг и юго-запад; в сентябре стационарность переходит на восточную часть полуострова, в октябре дополнительно стационарным становится и

юго-запад; в ноябре стационарность проявляется уже на большей части полуострова, за исключением отдельных областей юга и запада.

Зимой нестационарные модели на территории полуострова практически отсутствуют и проявляются только в одной южной станции – Салала. Начиная с весны, идет распространение и смещение нестационарности из прибрежных южных районов в центральные, причем прибрежные южные районы уже к июню становятся стационарными. В августе практически вся территория Аравийского полуострова представлена нестационарными моделями за исключением южных областей и отдельных станций на побережье Красного моря. Начиная с осени, нестационарность смещается в сторону юга, а ее место в центре полуострова занимают стационарные модели.

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.

Примеры некоторых нестационарных рядов приведены на рис.4.4, из графиков которого следует, что ступенчатый рост температуры имеет место, начиная с середины 1980-х годов.

В целом результаты моделирования рядов среднемесячных температур воздуха можно свести в общую табл.4.4, 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 равно 15-18% (с максимумами до 30-32%) в то время как эффективность модели линейного тренда составляет 11-12% (с максимумами также до 30-33%).

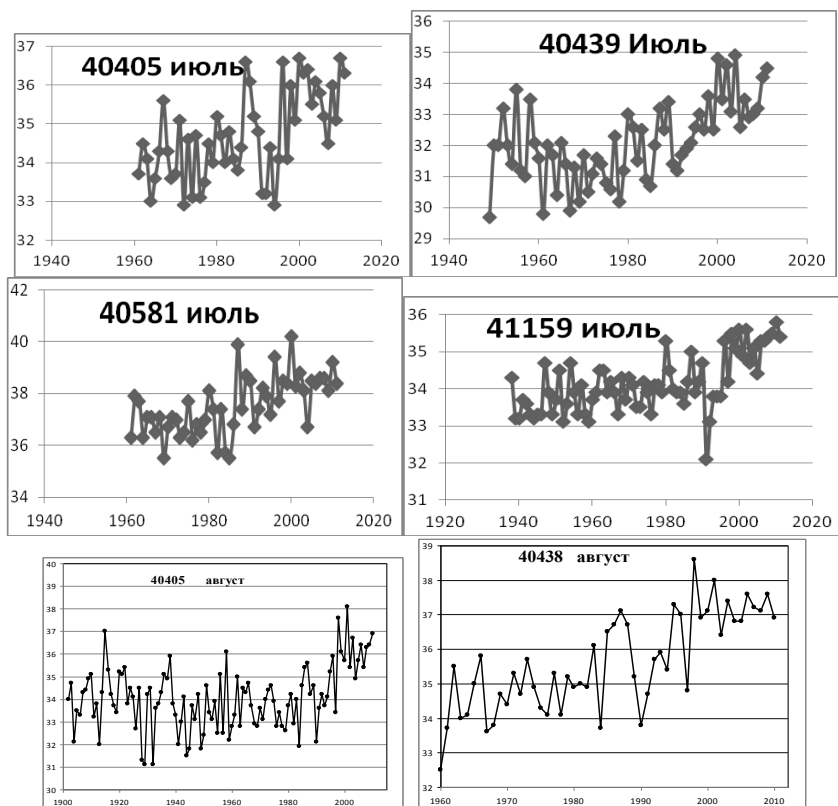


Рис. 4.4. Примеры нестационарных рядов среднемесячных температур воздуха на станциях Аравийского полуострова

Таблица 4.4

Средние территориальные значения $\Delta_{стун}$ и $\Delta_{тр}$ (в %) и процент эффективных нестационарных моделей (%н) 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

4.3. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах среднегодовой температуры воздуха

Для среднегодовой температуры воздуха результаты оценки эффективности моделирования временных рядов приведены в табл.4.4, где ярким цветом выделены Δ от 10% и более, характеризующие эффективные нестационарные модели, статистически значимые значения статистик критерия Фишера и значения коэффициентов корреляции линейного тренда.

Таблица 4.4

Характеристики моделей временных рядов
(среднегодовая температура воздуха, Аравийский полуостров)

Код ВМО	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	F_{mp}	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{стун.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
40356	18,6	15,9	1,51	1,41	2,24	5,34	1985	1923	2010	88	0,58
40373	14	19,5	1,35	1,54	1,56	5,42	1998	1930	2010	71	0,51
40375	2,5	10,6	1,05	1,25	1,25	4,3	1998	1923	2010	86	0,22
40394	30,6	26	2,08	1,83	1,94	6,97	1998	1923	2010	79	0,72
40400	3,6	11,2	1,07	1,27	1,36	5,02	1998	1910	2010	98	0,26
40405	9,6	23,2	1,22	1,7	1,74	6,41	1998	1911	2010	78	0,43
40416	0	10,6	1	1,25	1,38	3,94	1998	1937	2010	74	0
40430	19,9	22	1,56	1,65	1,72	5,32	1995	1947	2010	62	0,6
40438	36,9	31,1	2,51	2,1	2,44	7,59	1998	1938	2010	73	0,78
40439	10,1	25,8	1,24	1,81	1,84	6,24	1998	1901	2010	64	0,44
40580	16,5	18,5	1,44	1,51	1,52	6,79	1998	1900	2010	106	0,55
40581	19,7	20,6	1,55	1,59	1,71	7,2	1994	1905	2010	105	0,6
40582	13,6	18,5	1,34	1,51	1,48	6,87	1993	1900	2010	110	0,5
40583	24,1	18,6	1,73	1,51	1,55	6,58	1993	1905	2010	101	0,65
40584	4,5	11,5	1,1	1,28	2,41	3,5	1941	1907	2010	100	0,3
41020	6,8	12,3	1,15	1,3	1,91	4,61	1999	1941	2010	68	0,36
41036	9,3	15,9	1,22	1,41	1,41	5,39	1995	1920	2010	87	0,42
41140	7,5	17,3	1,17	1,46	1,5	4,71	1998	1949	2010	62	0,38

Код ВМО	$\Delta_{np}\%$	$\Delta_{стун}\%$	F_{np}	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{стун.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
41150	26,4	20,9	1,84	1,6	4,16	5,81	1946	1902	2010	109	0,68
41170	48,1	36,4	3,72	2,47	7,11	6,54	1950	1906	2010	89	0,85
41256	3,5	5,1	1,07	1,11	1,15	2,43	1993	1951	2010	60	0,26
41314	29	27,9	1,98	1,92	3,92	4,58	1976	1943	2010	68	0,7
41316	30,8	36,3	2,09	2,47	5,95	6,18	1985	1943	2009	66	0,72
41480	30,8	37,9	2,09	2,59	9,9	6,69	1926	1882	2010	120	0,72

Из результатов табл.4.4 следует, 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 можно сделать вывод, что среднегодовая температура воздуха существенно более нестационарна, чем любая из среднемесячных температур. Примеры нестационарных рядов среднегодовой температуры воздуха показаны на рис.4.5.

Из рассмотрения графиков следует, что, как правило, имеет место ступенчатый подъем температуры в 1980-1990х годах, но вместе с тем в некоторых случаях модели линейного тренда также являются не менее эффективными, чем модели ступенчатых изменений. 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 имеющихся 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 являются только «сигналы» [1, 2, 3, 13].

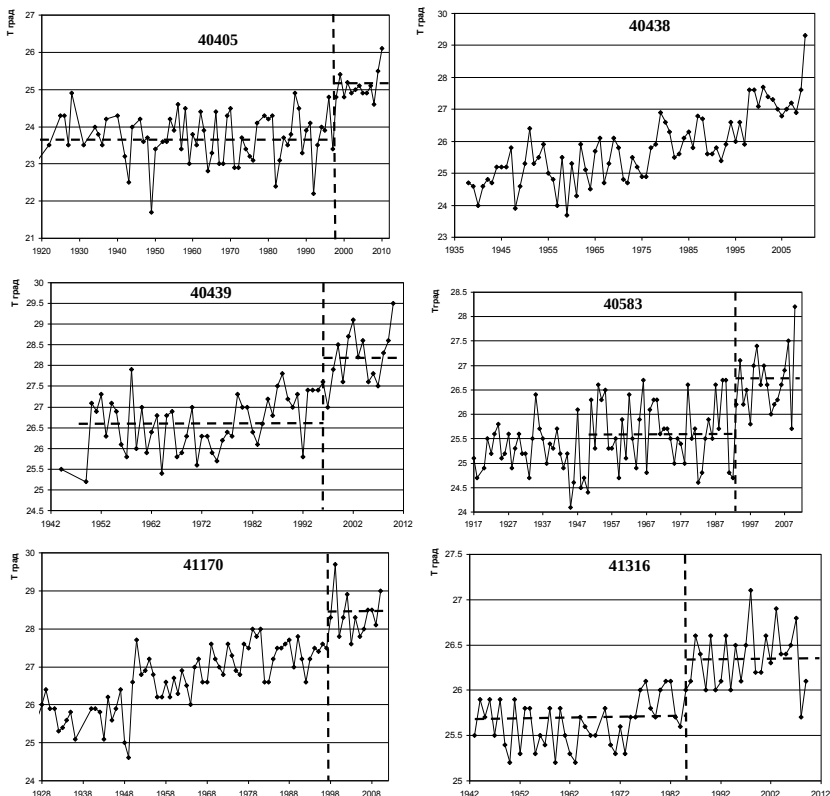


Рис. 4.5. Примеры нестационарных рядов среднегодовых температур воздуха на станциях Аравийского полуострова

Пространственное распределение отклонений $\Delta\%$ моделей ступенчатых изменений и линейного тренда от стационарной модели приведено на рис.4.6.

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.

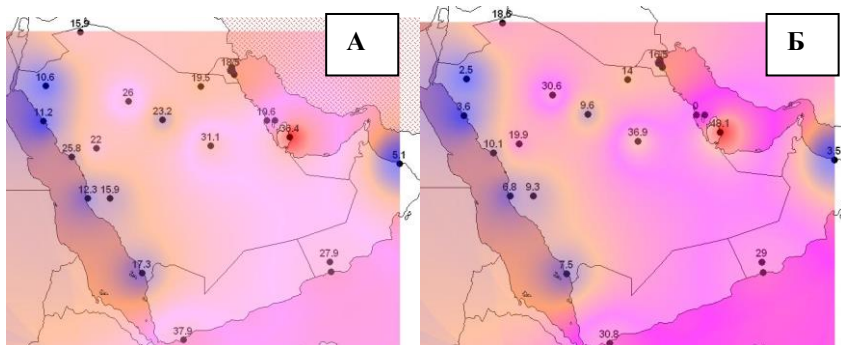


Рис. 4.6. Пространственная модель отклонений от нестационарности Δ в % для среднегодовой температуры воздуха и модели: А – ступенчатых изменений, Б – линейного тренда

4.4. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах параметров функции внутригодовых колебаний температуры воздуха

Для параметров функции внутригодовых колебаний температуры воздуха также было осуществлено моделирование временных рядов и эффективные нестационарные модели с отличием от стационарной на 10% и более приведены в табл.4.5.

Таблица 4.5

Характеристики моделей временных рядов коэффициентов функции внутригодовых колебаний

Код ВМО	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{смун}\%$	F_{mp}	$F_{смун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
Коэффициент В1											
40356	3,6	13,3	1,08	1,33	1,16	5,1	1988	1901	2010	95	0,27
40581	3,7	10,9	1,08	1,26	1,39	5,19	1982	1900	2010	111	0,27
41256	18,8	20,2	1,52	1,57	2,01	-3,98	1975	1933	2010	68	-0,58
Коэффициент В0											
41256	20,4	20,6	1,58	1,59	1,39	5,06	1988	1933	2010	68	0,61
Параметр Se											
40375	12,6	14,6	1,31	1,37	1,11	-4,3	1963	1918	2010	92	-0,49

40400	6,6	10,9	1,15	1,26	1,12	-4,16	1966	1906	2010	105	-0,36
40405	13,6	17,2	1,34	1,46	1,6	-4,59	1965	1908	2010	92	-0,5
40416	11,6	21,9	1,28	1,64	2,59	-4,03	1949	1930	2010	78	-0,47
40430	12,8	25,7	1,31	1,81	1,97	-3,05	1952	1935	2010	69	-0,49
41020	3,9	20,3	1,08	1,57	4,02	-2,95	1954	1940	2010	70	-0,28
41036	5,3	11,6	1,12	1,28	1,07	-3,78	1952	1906	2010	97	-0,32
41140	8,5	13,2	1,19	1,33	1,65	-3,24	1964	1934	2010	69	-0,4
41170	7,2	13	1,16	1,32	1,79	-4,21	1953	1903	2010	104	-0,37
41256	16,5	25	1,43	1,78	2,77	-4,17	1970	1933	2010	68	-0,55
41314	4,7	10,2	1,1	1,24	1,36	-3,45	1987	1943	2010	68	-0,3

По результатам табл.4.5 получено, что для коэффициента $B1$ среднее отклонение модели ступенчатых изменений от стационарной модели составляет 6,0%, а для модели линейного тренда – 2,3%, для коэффициента $B0$ эти же средние отклонения составляют соответственно 4,1% и 1,8% и для параметра Se – 9,7% и 5,2%, т.е. являются наибольшими. Процент нестационарных рядов составляет для коэффициента $B1$ – 12,5% и 4,2% для моделей ступенчатых изменений и линейного тренда, для коэффициента $B0$ 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%. Практически вся нестационарность в коэффициентах $B1$ и $B0$ относится к одной метеостанции 41256 Сиб (Оман), расположенной на самом юго-востоке полуострова. Метеостанции с индексами 40356 Турайф и 40581 Шуваих и нестационарными рядами коэффициента $B1$ расположены на севере и северо-востоке полуострова. Хронологические графики коэффициентов $B1$ и $B0$ для метеостанции Сиб приведены на рис.4.7, из которых видно, что ступенчатые изменения коэффициентов ($B1$ в сторону уменьшения, $B0$ – в сторону увеличения) произошли в середине 1980х годов и привели к уменьшению амплитуды годового хода и к росту среднего уровня функции. Вместе с тем интересно отметить, что среднегодовая температура на этой метеостанции остается стационарной (табл.4.4). Между коэффициентами $B1$ и $B0$ для метеостанции Сиб

имеет место высокая обратная корреляция с коэффициентом $R=-0,99$.

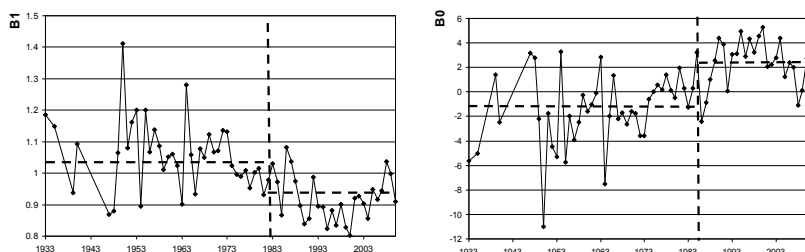


Рис. 4.7. Нестационарные временные ряды коэффициентов $B1$ и $B0$ функции внутригодовых колебаний на метеостанции Сиб

Наибольший процент нестационарных рядов имеет место для параметра Se , характеризующего интенсивность макросиноптических процессов внутри года. Причем во всех случаях нестационарности эта интенсивность уменьшается (табл.4.5). Хронологические графики основных нестационарных рядов параметра Se приведены на рис.4.8.

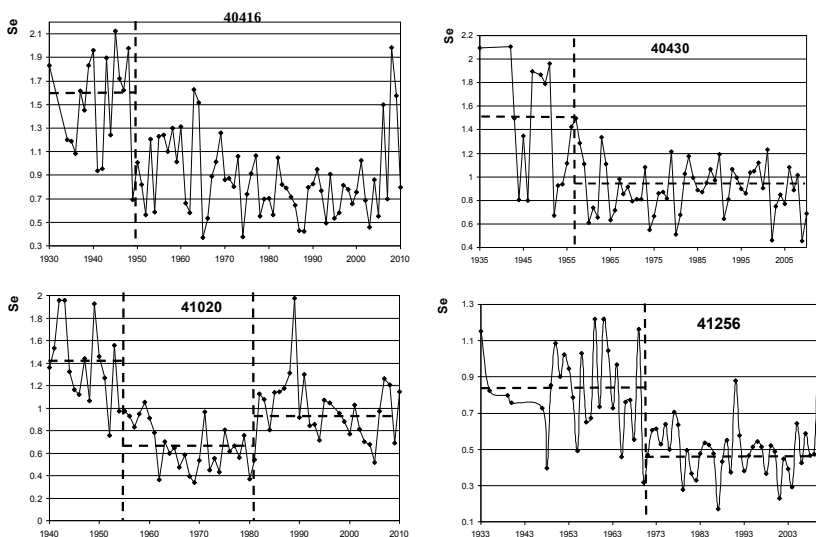


Рис. 4.8. Нестационарные ряды параметра Se внутригодовой функции температуры воздуха

Из рассмотрения и анализа графиков рис.4.8 можно видеть, что с уменьшением параметра Se не все так однозначно. Для метеостанции 40416 Дахран в последние годы даже идет увеличение Se , также и для метеостанции 41020 Джидда значения Se вновь ступенчато увеличились с начала 1980-х годов.

Пространственные распределения отклонений Δ для моделей ступенчатых изменений и линейного тренда приведены для Se на рис.4.9, из которого следует, что наибольшая нестационарность интенсивности макросиноптических процессов имеет место на юге и центральных частях полуострова, а стационарность наблюдается на крайнем юго-востоке и местами вдоль побережья Красного моря.

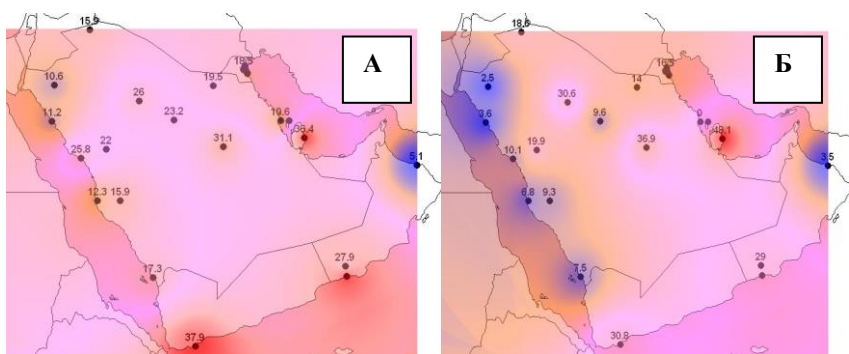


Рис. 4.9. Пространственная модель отклонений от нестационарности Δ в % для параметра Se и модели: А – ступенчатых изменений, Б – линейного тренда

4.5. Моделирование климатических изменений в многолетних рядах осадков

Для многолетних рядов сумм месячных осадков были проведены аналогичные исследования. После корректировки результатов с учетом восстановления, исключения отдельных экстремумов осадков на фоне их малых значений, были получены следующие обобщенные показатели нестационарных моделей, приведенные в табл.4.6.

Таблица 4.6

Средние территориальные значения $\Delta_{стун}$ и $\Delta_{тр}$ (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
$\Delta_{тр}$	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.4.6, 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. Характеристики нестационарных моделей осадков приведены в табл.4.7.

Таблица 4.7

Характеристики моделей временных рядов месячных сумм осадков на метеостанциях Аравийского полуострова

Код ВМО	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$F_{тр}$	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{стун}$	$T_{нач}$	$T_{кон}$	N	$R_{тр}$
январь											
40400	4	10,1	1,08	1,24	3,3	4,54	1999	1945	2011	56	0,28
41468	9,4	15,9	1,22	1,41	3,01	-2,93	1971	1955	2010	53	-0,42
41478	23,9	42,1	1,73	2,98	154,46	2,65	1990	1979	2008	24	0,65
41479	14	21,7	1,35	1,63	185,55	3,32	1986	1965	2008	41	0,51

Код ВМО	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	F_{mp}	$F_{стун}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{стун.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	R_{mp}
февраль											
41475	43,3	0	3,12	1			1971	1987	2004	12	-0,82
41480	15,1	19,5	1,39	1,54	6,05	8,6	1977	1881	2011	113	0,53
41485	5,9	11,8	1,13	1,28	1,52	-2,1	1969	1945	2010	37	-0,34
март											
40439	11,1	15	1,26	1,38	1,75	-4,06	1994	1942	2011	61	-0,46
41024	5,6	10,2	1,12	1,24	5,06	5,72	1991	1905	2007	70	0,33
июнь											
41443	2,4	13	1,05	1,32	1,05	-2,42	1922	1906	1989	54	-0,22
41475	12,8	14,5	1,32	1,37	1,46	-3,34	1963	1909	2010	47	-0,49
41480	5,8	11,4	1,13	1,27	4,77	7,42	1976	1881	2007	101	0,34
июль											
41467	9	10,7	1,21	1,25	1,93	2,74	1992	1968	2004	36	0,41
август											
41258	27,4	42,6	1,9	3,03	9,5	6,5	1994	1962	2010	45	0,69
41314	7,3	10,1	1,16	1,24	1,27	-3,1	1965	1942	2010	68	-0,38
41485	20,2	23,6	1,57	1,71	1,86	-4,51	1974	1941	1985	45	-0,6
сентябрь											
40394	13,8	13,3	1,35	1,33	1,32	-3,03	1954	1904	2010	67	-0,51
октябрь											
41288	4,1	10,6	1,09	1,25	1,47	-2,72	1942	1923	2010	79	-0,28
41471	13	16,5	1,32	1,43	5,73	3,46	1987	1961	2010	45	0,49
ноябрь											
42801	0,7	10,7	1,01	1,25	1,15	3,21	1990	1888	2009	48	0,12

Основной вывод из результатов табл.4.7 состоит в том, что нестационарных рядов осадков немного (всего 20 из 317 или 6,3%) и более, чем в половине случаев отклонение от стационарности составляет чуть больше 10%. Причем нестационарность проявляется на разных станциях в разные месяцы и в половине случаев

осадки увеличиваются, а в другой половине – уменьшаются. Временные графики нестационарных рядов, в которых отклонение Δ превышает 15-16%, приведены на рис.4.10.

Из рассмотрения графиков следует, что для осадков характерна очень большая вариация при их изменении во времени от 0 мм до нескольких сот мм. Поэтому при небольшой продолжительности ряда в среднем 30 лет, как например, для метеостанций 41478, 41479, 41475 вполне могут выявляться периоды времени с отсутствием осадков, которые и приводят к нестационарности за счет недостаточной продолжительности ряда и наличия пропусков наблюдений.

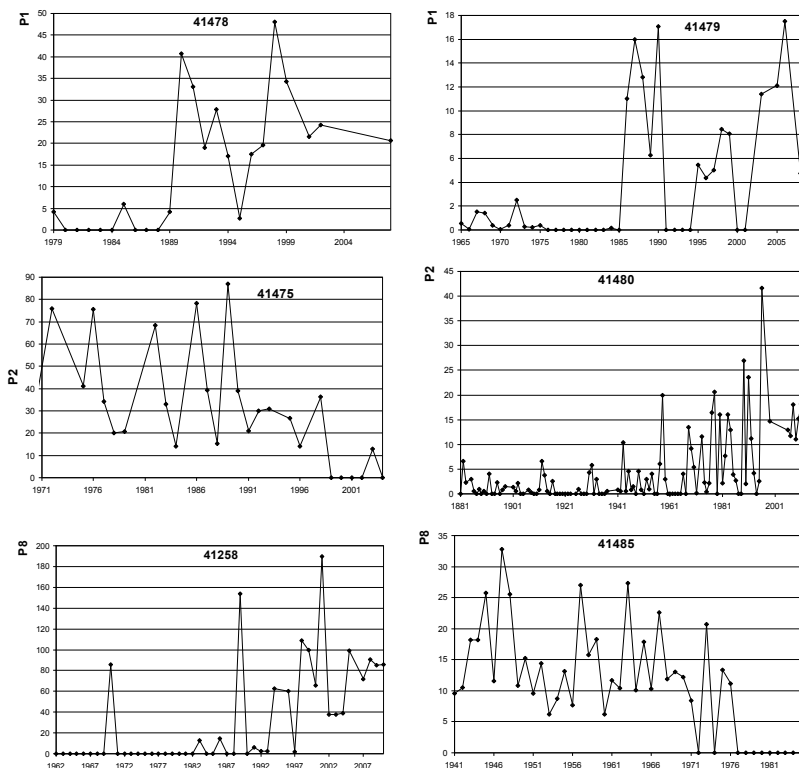


Рис. 4.10. Нестационарных ряды месячных сумм осадков на метеостанциях Аравийского полуострова, где цифра около P означает номер месяца

Локальные же особенности формирования осадков приводят к их низкой пространственной связанности, которая является препятствием для восстановления пропусков и приведения этих рядов к многолетнему периоду. К тому же метеостанции 41478 Алмхуит Кукабан, 41479 Хадджа и 41475 Даммар находятся рядом на территории Йемена и в горах. Метеостанция 41480 Аден, также находящаяся на территории Йемена, хотя и имеет достаточно продолжительный ряд наблюдений, но содержит явно неоднородные данные, что проявляется в резком увеличении осадков с конца 1950х годов, что вполне может быть обусловлено сменой регистрирующих приборов, например, при замене плuviографа на осадкомер. Поэтому на этой станции ряд наблюдений необходимо рассматривать с конца 1950х годов, что в результате приводит к значимой стационарной модели. Осадки августа на метеостанциях 41475 Ладх алФюш также на территории Йемена и 41258 Миналь-Фахал на территории Омана в одном случае увеличиваются, а в другом – уменьшаются, что, видимо, связано с локальными особенностями метеостанций.

В целом же по анализу нестационарных рядов осадков можно сделать вывод, что нестационарности формируются следующими основными причинами, имеющими не климатический, а, скорее всего, локальный характер:

- непродолжительный период наблюдений и наличие их 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.

Пример пространственных распределений $\Delta\%$ для осадков января, как месяца с наибольшим процентом нестационарных моделей, показан на рис.4.11.

Из рассмотрения рисунков видно, что вся территория полуострова находится в области стационарных моделей, какие-либо пространственные закономерности роста или уменьшения Δ отсутствуют, а проявление нестационарности выражено точечно и относится к отдельным метеостанциям на территории Йемена.

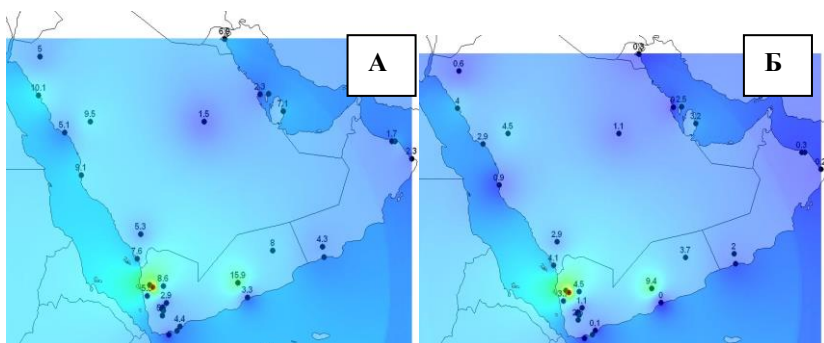


Рис. 4.11. Пространственная модель отклонений от нестационарности Δ в % для осадков января и модели: А – ступенчатых изменений, Б – линейного тренда

4.6. Оценка устойчивости полученных изменений

Особенность эмпирико-статистических моделей состоит в том, что их параметры не остаются постоянными во времени и требуют пересчета при появлении новой информации. Моделирование временных рядов температур воздуха и осадков на момент его проведения ограничивалось информацией по 2011 г. включительно. В настоящее время имеется информация по температурам воздуха для 16 метеостанций на Аравийском полуострове по 2016г. включительно и по осадкам для 17 метеостанций по 2017 г., что позволяет оценить устойчивость и эволюцию статистических моделей временных рядов по прошествии 5-6 лет. Расположение рассматриваемых метеостанций дано на рис.4.12 .

По выбранным рядам наблюдений среднемесячных температур воздуха было выполнено статистическое моделирование двух видов: за период наблюдений до 2011 г. и за период наблюдений до 2016 г. При этом, чтобы исключить неоднозначность выводов по разным рядам за счет разной их продолжительности, начальный год наблюдений был задан одинаковым – 1960 г. В этом случае решалась и вторая задача по оценке изменений климата только за последний полувековой период. Кроме того, на 16 выбранных метеостанциях большинство наблюдений начиналось именно в 1960-е годы и даже позже, а процедура восстановления пропусков и приведения к многолетнему периоду не применялась, чтобы не вносить дополнительные погрешности.

Результаты полученных показателей нестационарности за разные конечные годы наблюдений (2011 и 2016 гг.) приведены в табл.4.8 для месяцев первой половины года (январь – июнь) и в табл.4.9 для месяцев второй половины года (июль – декабрь) и для тех рядов для которых хотя бы в один из периодов $\Delta \geq 10\%$.

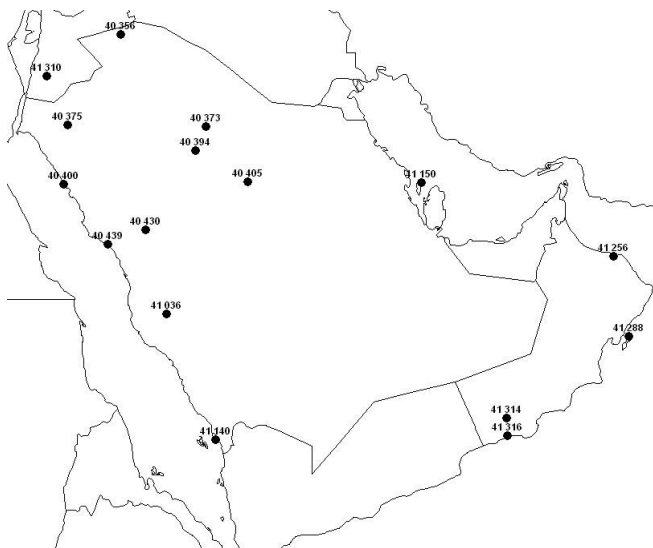


Рис.4.12. Расположение метеостанций с информацией 2016-17 гг. включительно

Таблица 4.8

Характеристики нестационарных моделей временных рядов среднемесячных температур первой половины года на метеостанциях Аравийского полуострова за разные интервалы времени

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{ступ}\%$	$T_{ступ.}$	N	$R_{тр}$
январь						
40400	2011/16	7,6/ 10,0	8,7/10,5	1994	40/45	0,38/0,44
40439	2011/16	16,2/16,0	13,8/14,6	1994	33/37	0,55/0,54
40140	2011/16	3,6/ 10,6	6,0/ 16,4	1998/2002	36/40	0,27/ 0,45
41288	2011/16	4,3/5,3	11,1/11,5	1991	34/37	0,29/0,23
41316	2011/16	10,3/9,2	14,4/13,2	1991	38/42	0,44/0,42
февраль						
40373	2010/16	7,5/8,4	9,5/ 10,7	1999/2002	32/36	0,38/0,40
40405	2010/15	11,2/14,2	16,5/19,0	1998/1999	36/39	0,46/0,51

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$T_{стун}$	N	R_{mp}
40430	2010/16	1,0/3,5	8,3/ 11,8	1999	50/55	0,14/0,26
40439	2010/16	2,0/8,5	6,3/ 17,1	1996/1999	32/37	0,20/ 0,40
41036	2010/16	5,3/7,5	16,7/21,7	1996/1999	37/39	0,32/ 0,38
41140	2010/16	0,3/3,5	5,6/ 11,8	1998/2002	35/40	0,08/0,26
41288	2011/16	14,4/10,8	21,0/19,4	1988	33/36	0,51/0,45
41316	2011/14	9,4/7,1	19,2/18,0	1985	36/38	0,42/0,37
март						
40373	2011/16	11,8/13,3	20,8/22,2	2000/2001	30/34	0,47/0,50
40394	2011/16	0,0/1,9	5,8/ 11,7	2000/2001	46/50	0,02/0,19
40400	2010/16	2,5/ 11,1	4,6/ 18,7	1998/2004	40/45	0,22/ 0,46
40405	2011/16	1,2/6,8	6,0/ 18,3	1998/2001	37/40	0,15/ 0,36
40430	2011/16	0,0/2,2	4,9/ 10,4	2000/2001	50/53	0,03/0,21
40439	2010/16	10,9/17,7	17,4/26,1	1999/2001	32/36	0,45/0,57
41036	2011/16	4,7/9,6	6,8/ 14,1	1999/2000	40/43	0,30/ 0,43
41140	2011/16	4,3/9,6	12,7/17,6	2000/2001	37/41	0,29/ 0,43
41316	2011/16	19,0/16,0	22,3/20,5	1985	40/44	0,59/0,54
апрель						
40394	2011/16	11,8/14,0	12,7/14,8	1999	49/54	0,47/0,51
40405	2010/16	21,6/22,5	20,5/26,5	1997/1998	34/35	0,62/0,63
40439	2010/16	12,8/15,4	13,3/15,2	1998	33/37	0,49/0,53
41036	2011/16	14,1/14,0	16,4/16,9	1991	39/42	0,51/0,51
41140	2010/16	0,0/3,8	2,7/ 10,3	2000/2003	36/41	0,02/0,27
41150	2011/16	4,1/8,5	14,1/18,6	1998	52/57	0,28/0,40
41316	2011/13	18,7/16,5	16,4/16,1	1984	40/42	0,58/0,55
май						
40310	2011/16	4,9/8,3	7,2/ 10,2	1994	47/52	0,31/0,40
40373	2011/16	13,8/16,2	18,0/18,3	1995/1996	30/35	0,51/0,55
40375	2010/16	10,8/16,1	10,8/13,5	1987/1995	41/46	0,45/0,54
40394	2011/14	18,3/16,7	18,9/17,7	1987	47/50	0,58/0,55
40400	2010/16	3,5/ 14,2	6,9/ 13,1	1988/2003	36/41	0,26/ 0,51
40405	2010/15	20,5/23,0	17,2/20,3	1996/1999	37/40	0,61/0,64
40439	2010/16	11,6/17,7	11,6/14,1	1989	31/36	0,47/0,57
41036	2011/12	8,2/9,7	12,0/12,8	1987/1989	39/40	0,40/0,43
41140	2011/16	4,0/ 11,9	7,0/ 23,7	1998/2006	36/41	0,28/ 0,47
41150	2011/16	18,3/24,6	21,9/27,1	1998	52/57	0,58/0,66
41316	2011/15	18,9/17,2	17,8/17,4	1993	40/44	0,58/0,56
июнь						
40310	2011/16	4,4/1,8	13,5/7,1	1995	51/55	0,29/0,19
40373	2011/16	14,3/16,2	19,2/20,0	1989	31/36	0,51/0,55
40375	2011/16	10,6/14,6	12,9/18,1	2000/2006	43/48	0,45/0,52
40394	2011/15	9,9/ 11,4	20,6/21,6	1996	49/53	0,43/0,46
40400	2011/16	6,8/ 15,0	5,1/ 18,4	1987/2003	40/44	0,36/ 0,53
40405	2011/16	37,0/39,5	38,0/40,1	1996	37/39	0,78/0,80

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$T_{стун.}$	N	R_{mp}
40430	2011/16	6,1/6,8	9,9/ 10,3	1995	52/56	0,34/ 0,36
40439	2011/16	27,1/33,8	18,9/21,4	1994/2000	31/35	0,68/0,75
41036	2011/16	14,2/13,0	14,3/13,2	1987	35/40	0,51/0,49
41140	2011/16	0,4/5,2	5,9/ 20,3	1997/2005	36/41	0,09/ 0,32
41150	2011/16	16,9/21,8	23,3/27,5	1997	52/57	0,56/0,62
41314	2011/16	0,1/4,7	1,8/ 14,7	1996/2004	26/31	0,05/ 0,30

Таблица 4.9

Характеристики нестационарных моделей временных рядов среднемесячных температур второй половины года на метеостанциях Аравийского полуострова за разные интервалы времени

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$T_{стун.}$	N	R_{mp}
июль						
40310	2011/16	6,5/8,1	14,1/15,3	1996	49/54	0,35/0,39
40356	2011/16	7,3/8,8	11,0/12,0	1996	32/37	0,38/0,41
40373	2011/16	4,5/ 11,2	9,5/ 13,8	1996	33/38	0,30/0,46
40375	2011/16	5,7/9,7	14,4/17,7	1996	45/50	0,33/0,43
40394	2011/16	3,4/8,1	10,1/14,7	1996	49/54	0,26/0,39
40400	2010/16	16,8/24,7	23,3/27,3	1995	39/44	0,55/0,66
40405	2010/16	13,5/22,3	22,7/27,7	1996	35/39	0,50/0,63
40430	2010/16	8,4/ 11,8	11,4/14,0	1986/1996	50/54	0,40/0,47
40439	2010/16	35,6/39,6	31,2/34,8	1993/1995	34/39	0,76/0,80
41036	2011/16	8,4/ 14,9	12,0/18,5	2000	38/43	0,40/0,52
41140	2010/16	1,1/6,7	3,7/ 11,0	1997/2002	35/40	0,15/ 0,36
41150	2011/16	17,5/25,4	32,5/37,8	1996	52/57	0,57/0,67
август						
40310	2011/16	8,0/ 10,7	16,9/18,4	1998	50/55	0,45/0,45
40356	2011/16	8,4/ 10,7	12,1/13,5	1998	31/36	0,40/0,45
40373	2011/16	23,6/29,4	27,2/31,3	1998	29/33	0,65/0,71
40375	2011/16	12,7/17,3	22,5/25,4	1998	44/48	0,49/0,56
40394	2011/16	23,9/28,2	27,3/30,9	1995	50/55	0,65/0,70
40400	2011/16	23,2/32,6	20,3/25,1	1987/1998	41/45	0,64/0,74
40405	2010/16	33,9/38,7	39,3/43,1	1998	37/41	0,75/0,79
40430	2009/16	13,5/16,8	22,9/25,8	1995	50/53	0,50/0,55
40439	2011/16	35,8/39,3	31,2/33,6	1995	34/37	0,77/0,79
41036	2011/16	35,5/41,6	35,8/38,7	1993	37/41	0,76/0,81
41140	2009/16	3,2/9,2	7,7/ 15,6	1996/2003	32/37	0,25/ 0,42
41150	2011/16	7,0/ 12,3	23,6/27,6	1998	52/57	0,37/0,48
сентябрь						
40373	2011/16	10,7/16,2	12,8/16,6	1998	26/31	0,45/0,55

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$T_{стун}$	N	R_{mp}
40375	2011/16	8,0/12,3	7,0/12,4	1979/2006	40/45	0,39/0,48
40394	2011/16	13,9/15,9	15,6/17,5	1997	46/50	0,51/0,54
40400	2010/16	16,7/27,6	17,8/23,8	1986/1994	38/43	0,55/0,69
40405	2010/16	13,0/21,4	25,6/30,9	1997	35/39	0,49/0,62
40430	2010/16	15,7/18,2	16,9/18,7	1996	47/51	0,54/0,58
40439	2011/16	30,2/34,1	21,0/24,3	1996	26/30	0,72/0,75
41036	2011/16	15,9/20,1	17,5/19,1	1982	38/42	0,54/0,60
41140	2011/16	18,2/27,6	17,2/23,7	1995/2006	31/36	0,58/0,69
41150	2011/16	5,3/11,1	11,9/18,4	1998/2006	52/57	0,32/0,46
41288	2011/16	1,3/5,8	2,7/13,9	1997/2006	35/40	0,16/0,34
октябрь						
40373	2011/16	11,7/10,3	12,4/11,7	1997	30/34	0,47/0,44
40394	2011/15	19,7/22,2	21,8/22,4	1986	46/50	0,60/0,63
40400	2011/16	12,1/17,1	13,6/16,7	1991/2002	41/46	0,56/0,56
40405	2010/14	10,3/15,8	14,1/15,4	1986/1993	33/36	0,44/0,54
40430	2010/16	16,0/22,9	17,6/22,4	1986/1993	48/52	0,54/0,64
40439	2010/16	26,2/24,7	22,1/22,5	1991	29/34	0,67/0,66
41036	2011/15	17,0/24,2	18,0/19,7	1987	35/39	0,56/0,65
41140	2011/16	4,3/12,3	5,0/10,9	1998/2000	32/37	0,29/0,48
41314	2011/16	11,8/22,9	14,0/17,1	1997	25/29	0,47/0,64
41316	2011/16	26,4/27,8	30,1/26,3	1987	42/46	0,68/0,69
ноябрь						
40400	2010/16	8,6/14,4	11,8/15,6	1991	41/46	0,40/0,52
40430	2010/16	6,0/7,5	10,0/11,3	1998	50/54	0,34/0,38
40439	2011/16	5,9/7,2	10,4/11,3	1987	30/34	0,34/0,37
41036	2011/16	18,8/23,3	21,4/23,5	1987	34/39	0,58/0,64
41140	2011/16	5,5/15,0	10,2/20,1	1997/2001	29/34	0,33/0,53
41288	2011/16	12,4/14,9	15,2/16,5	1989	37/41	0,48/0,53
41314	2010/16	9,7/13,2	13,0/14,6	1993	27/31	0,43/0,50
41316	2011/16	25,0/29,0	26,5/26,9	1986	41/45	0,66/0,70
декабрь						
40400	2011/16	11,5/15,2	12,6/15,1	1993	42/47	0,47/0,53
40439	2011/15	9,1/8,8	11,4/11,0	1995	33/37	0,42/0,41
41036	2011/15	8,3/9,6	12,8/13,5	1991	34/38	0,40/0,43
41140	2011/16	17,0/26,1	19,8/25,1	1989/2001	32/37	0,56/0,67
41316	2011/15	15,6/11,9	26,1/21,8	1987	40/44	0,54/0,47

Из анализа результатов, приведенных в табл.4.7 и 4.8 следуют следующие основные выводы:

- число нестационарных моделей как за период до 2011 г., так и до 2016 г. является наибольшим в теплое полугодие с мая по сентябрь

(69-75% от всех рядов каждого месяца) и наименьшим – в холодную часть года с ноября по февраль (31-50%);

- наибольшее число нестационарных моделей летом имеет место во внутренних областях полуострова, где температуры и так достаточно высоки, а зимой нестационарность более всего проявляется на юго-востоке полуострова и меньше в центральной части;

- число эффективных нестационарных моделей увеличилось при привлечении информации с 2012 по 2016 гг. почти на 24%, т.е. в последние годы нестационарность стала проявляться значительно и, особенно в марте, где она возросла более, чем в 2 раза;

- годы ступенчатого роста температур остаются практически неизменными при привлечении информации с 2012 по 2016 гг., если $\Delta_{стун}$ достаточно велико (более 15-18%) и число таких случаев 80%; а если $\Delta_{стун}$, как правило, невелико (10-15%), то с привлечением новой информации дата ступенчатого перехода смещается в будущее.

В целом модели, построенные с привлечением новой информации за последние 5 лет, подтверждают полученные ранее закономерности, что внутренние области теплеют больше и в летний сезон, а внешние прибрежные - в холодный сезон. При этом привлечение информации за последние годы показало, что потепление это стало более статистически значимым.

Некоторые временные ряды, для которых нестационарность стала эффективной с привлечением информации последних 5 лет наблюдений, приведены на рис.4.13.

Из рассмотрения временных рядов на рис.4.13 следует, что добавление 5 последних лет наблюдений явилось существенным для вывода об эффективности нестационарности, т.к. год перехода к новым стационарным условиям относится, как правило, к началу 2000х. Поэтому, если использованы данные до 2012 г., то продолжительность нового нестационарного периода была менее 10 лет и для таких условий применяемая процедура объективного разбиения выборки на две стационарные подвыборки, основанная на минимизации суммы квадратов отклонений от каждого среднего, не работает. Поэтому главный вывод при моделировании временных рядов температур воздуха состоит в том, что параметры этих моделей и их характеристики необходимо пересчитывать с привлечением новой информации, т.е. вести постоянных мониторинг.

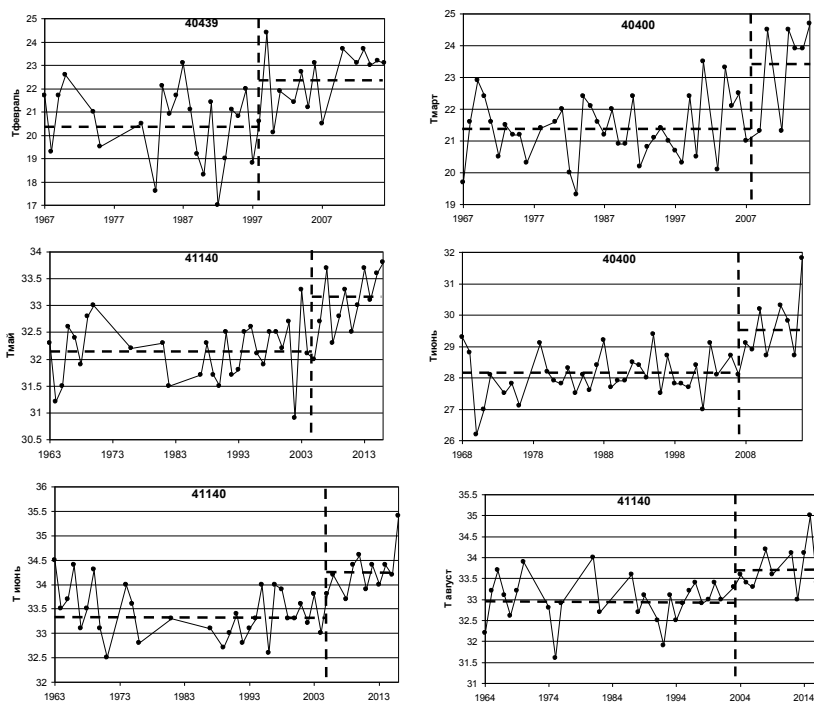


Рис.4.13. Примеры новых эффективных нестационарных моделей при добавлении информации с 2012 по 2016 гг.

Результаты статистического моделирования для полученных нестационарных рядов осадков за разные интервалы времени (1960-2011 гг. и 1960-2017 гг.) приведены в табл.4.10.

Таблица 4.10

Характеристики моделей временных рядов месячных сумм осадков на метеостанциях Аравийского полуострова за разные интервалы времени

Код ВМО	Посл. годы	$\Delta_{mp}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$T_{стун.}$	N	R_{mp}
январь						
40400	2011/17	15,2/11,6	15,3/13,7	1992	31/36	0,53/0,47
март						
40439	2010/2017	2,2/3,8	9,4/ 10,7	1994	25/28	-0,21/-0,27
апрель						
40394	2011/2017	6,0/7,5	10,4/11,4	1990	36/41	-0,34/-0,38
40405	2010/2017	0,6/2,2	8,8/ 11,2	1997	32/34	-0,11/-0,21
40439	2010/2017	2,4/3,6	12,5/13,5	1993	28/32	-0,22/-0,26

ноябрь						
40375	2011/2015	14,4/7,5	6,7/4,7	1991	25/28	-0,52/-0,38
40439	2011/2016	8,6/8,9	9,5/ 10,2	1994	24/28	-0,41/-0,41
41150	2011/2016	1,5/9,4	3,9/ 14,7	1998/2002	42/46	0,17/ 0,42

Результаты, представленные в табл.4.10 приводят к аналогичным выводам, что и результаты табл.4.7 о том, что осадки значительно более стационарны, чем температуры воздуха. Количество нестационарных рядов как за весь период наблюдений и за последнюю его часть очень мало и составляет всего 6,3% и 3,9% соответственно. Если же сравнивать эти величины за 1960-2011 гг. и 1960-2017 гг. (табл.4.10), то число нестационарных моделей в первом случае – 4, а во втором – 7. Это может и свидетельствует о некотором росте нестационарности осадков, но сами Δ едва превышают 10% и относительное их число также изменяется всего от 2% до 3,9%. Кроме того, знаки коэффициентов корреляции трендов разные, т.е. изменения разнонаправленные и связаны, скорее всего, с индивидуальными особенностями наблюдений на конкретных метеостанциях, включая и пропуски наблюдений и ограниченный объем выборки и погрешности измерений. Временные графики некоторых нестационарных рядов приведены на рис.4.14 и на нем же показаны многолетние ряды осадков по метеостанции 41150 за разные интервалы времени: с начала наблюдений (с 1934 г.) и только за последний период - с 1960 г.

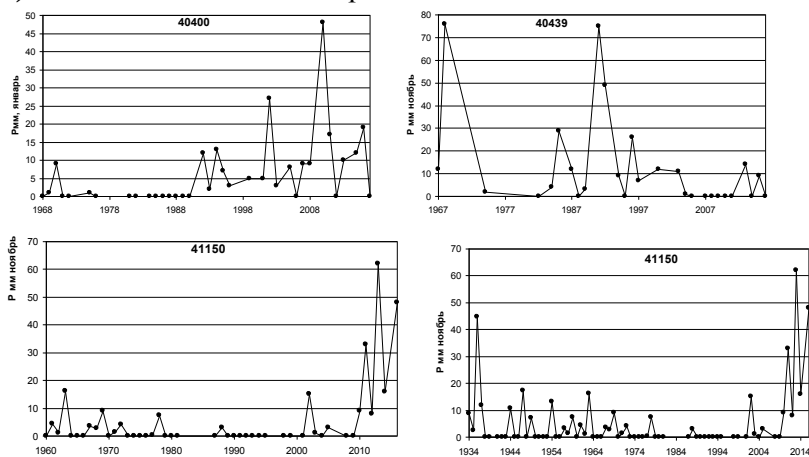


Рис.4.14. Примеры нестационарных моделей осадков при добавлении информации с 2012 по 2017 гг.

Из рассмотрения графиков рис.4.14 следует, что при очень высокой естественной вариации осадков практически невозможно выделить и оценить их долгопериодные климатические изменения. Показательно, что для метеостанции 41150 при рассмотрении ряда только с 1960 г. $\Delta_{стун}=14,7\%$, а за весь период наблюдений с 1934 г. - $\Delta_{стун}=10,7\%$, т.к. здесь имели место большие осадки и в начале наблюдений.

Можно сделать общий вывод, что осадки на Аравийском полуострове пока еще можно считать стационарными и поэтому оценка их будущих проекций не осуществлялась.

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА АРАВИЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

5.1. Методика пространственной классификации климатических изменений и пространственного моделирования

После того, как в предыдущей главе были установлены виды моделей для каждого временного ряда и осуществлено их исследование по территории, появляется возможность для пространственного обобщения климатических характеристик для прикладных целей. Методика определения расчетных климатических характеристик и их обобщения по территории включает две основные части [27]:

- 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).

Наиболее распространенной расчетной климатической характеристикой является климатическая норма, которая определяется как среднее значение за многолетний период [33, 57]. Если ряд стационарен, то норма и среднее квадратическое отклонение могут быть определены за продолжительный период наблюдений, т.к. чем больше продолжительность ряда, тем меньше случайная погрешность среднего значения и дисперсии [9, 14, 28]. Если же ряд нестационарен, как например, для глобальной температуры воздуха, то ВМО предложено определять климатические нормы за последний условно стационарный период 1961 – 1990 гг. [57, 131]. Помимо норм и стандартных отклонений в прикладной климатологии для строительного и других видов проектирования [33] практический интерес представляют климатические характеристики редкой повторяемости, которые происходят, например, 1 раз в 100 лет и 1 раз в 200 лет [21]. Причем эти климатические характеристики могут быть как максимальными (редкие наибольшие температуры), так и минимальными (редкие наименьшие температу-

ры). Такие климатические характеристики редкой повторяемости называются расчетными характеристиками [30].

Определение расчетных характеристик при наличии данных наблюдений достаточной продолжительности осуществляется путем применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения - кривых обеспеченностей. При этом теоретически следует, что чем продолжительнее ряд наблюдений, тем меньше случайная погрешность параметров и квантилей распределения.

Эмпирическая ежегодная вероятность превышения P_m климатических характеристик определяется по формуле:

$$P_m = \frac{m}{n+1} 100\% , \quad (5.1)$$

где m - порядковый номер членов ряда климатической характеристики, расположенного в убывающем порядке; n - общее число членов ряда.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения, как правило, применяются трехпараметрические распределения: Крицкого-Менкеля при любом отношении C_s/C_v и распределение Пирсона III типа (биномиальная кривая) при $C_s/C_v \geq 2$, а также лог-нормальное распределение при $C_s \geq 3C_v + C_v^3$ и другие распределения.

Оценки параметров аналитических кривых распределения: среднее многолетнее значение $\bar{Q}$, коэффициент вариации C_v и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v , устанавливаются по рядам наблюдений за рассматриваемой климатической характеристикой методом приближенно наибольшего правдоподобия и методом моментов.

Коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s для трехпараметрического гамма-распределения эффективнее определять методом приближенно наибольшего правдоподобия в зависимости от статистик λ_2 и λ_3 , вычисляемых по формулам:

$$\lambda_2 = \left(\sum_{i=1}^n \lg k_i \right) / (n-1), \quad (5.2)$$

$$\lambda_3 = \left(\sum_{i=1}^n k_i \lg k_i \right) / (n-1), \quad (5.3)$$

где k - модульный коэффициент рассматриваемой климатической характеристики, определяемый по формуле:

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}, \quad (5.4)$$

где Q_i - погодичные значения климатической характеристики; $\bar{Q}$ - среднее арифметическое значение, определяемое в зависимости от числа лет наблюдений по формуле:

$$\bar{Q} = \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) / n. \quad (5.5)$$

По полученным значениям статистик λ_2 и λ_3 определяют коэффициенты вариации и асимметрии по специальным таблицам, номограммам [30] или на основе вычислительной программы.

Коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s определяются методом моментов по формулам:

$$C_v = (a_1 + a_2 / n) + (a_3 + a_4 / n) \tilde{C}_v + (a_5 + a_6 / n) \tilde{C}_v^2, \quad (5.6)$$

$$C_s = (b_1 + b_2 / n) + (b_3 + b_4 / n) \tilde{C}_s + (b_5 + b_6 / n) \tilde{C}_s^2 \quad (5.7)$$

где $a_1, \dots, a_6; b_1, \dots, b_6$ - коэффициенты, определяемые по [12], $\tilde{C}_v$ и $\tilde{C}_s$ - соответственно смещенные оценки коэффициентов вариации и асимметрии, определяемые по формулам:

$$\tilde{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n-1}}, \quad (5.8)$$

$$\tilde{C}_s = \left[n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3 \right] / [\tilde{C}_v^3 (n-1)(n-2)] \quad (5.9)$$

Случайные средние квадратические погрешности выборочных средних определяются по приближенной зависимости:

$$\sigma_{\bar{Q}} = \left(\frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}} \right) \sqrt{\frac{(1+r)}{(1-r)}}, \quad (5.10)$$

которая применяется при коэффициенте автокорреляции между смежными членами ряда r , меньшем 0.5. При больших коэффициентах автокорреляции используется формула:

$$\sigma_{\bar{Q}} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1 + \frac{2r}{n(1-r)} \left(n - \frac{1-r^n}{1-r} \right)}{1 - \frac{2r}{n(n-1)(1-r)} \left(n - \frac{1-r^n}{1-r} \right)}} \quad (5.11)$$

Случайные средние квадратические ошибки коэффициентов вариации при $C_s = 2C_v$ определяются по зависимости:

$$\sigma_{C_v} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}} \left(1 + \frac{3C_v r^2}{1+r} \right) \quad (5.12)$$

Для следующего шага, т.е. пространственной интерполяции был использован, реализованный в ГИС MapInfo метод треугольников и его усовершенствованный вариант – метод полигонов [40, 129]. Суть метода полигонов состоит в том, что территория, по которой осредняются данные, разбивается на ряд многоугольников по числу станций, находящихся в ее пределах. Внутри каждого многоугольника заключена одна станция. В качестве весов при осреднении используются коэффициенты, пропорциональные площадям соответствующих многоугольников. Для построения многоугольников полигонов станции соединяются между собой прямыми линиями и через середины отрезков между станциями проводятся перпендикуляры. Многоугольники образуются пересечением этих перпендикуляров, как на рис.5.1, где изображено разбиение некоторого контура на такие полигоны.

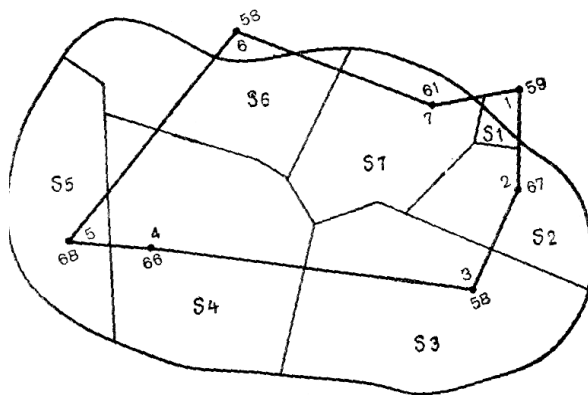


Рис. 5.1. Схема построения полигонов на площади осреднения (количество осадков, июль)

Легко видеть, что, так как перпендикуляр к центру отрезка является геометрическим местом точек, равноудаленных от его концов, то все точки внутри каждого полигона наиболее близки к той станции, к которой относится данный полигон, точки же вне полигона ближе к другим станциям.

Величина площади многоугольников определяется планиметрированием. Для станций, лежащих вне контура заданной площади осреднения, определяется площадь лишь той части полигона, которая заключена внутри контура.

Веса a_i , с которыми осредняются значения элемента на станциях, определяются как отношение площади данного полигона (или его части) s_i , ко всей площади осреднения s . При этом выполняется условие:

$$\sum a_i = 1 \quad (5.13)$$

Точность осреднения количественно оценивается по относительной средней квадратической ошибке осреднения («мере ошибки осреднения») ε , вычисляемой по формуле, полученной в предположении однородности и изотропности поля [129]:

$$\varepsilon = E^2 / \sigma_f^2 \quad (5.14)$$

где E^2 - дисперсия погрешности, равная $(f_s - f_{scp})^2$; f_{scp} и σ_f^2 - среднее взвешенное по площади и дисперсия точечных значений осредняемой величины.

При отсутствии ошибок в исходных данных или при малых ошибках и при сравнительно равномерном расположении станций метод полигонов дает почти ту же точность, что и метод оптимального осреднения [4, 5, 12] и различия не превышают 10%, а точность метода средней арифметической значительно меньше. Поэтому при не слишком большой неравномерности и достаточной точности исходных данных целесообразно использовать метод полигонов, так как в отличие от метода оптимального осреднения он не требует сведений о структуре полей.

Следующим видом пространственного обобщения является построение пространственных статистических моделей на основе методики, приведенной в работах [17, 24] и представляющих собой погодичные зависимости между полем климатической характеристики данного года и многолетним климатическим полем. Среднее многолетнее или климатическое поле образуется на осно-

ве средних многолетних значений климатической характеристики на каждой станции, представленных на географическом пространстве. Это климатическое поле характеризует географию климата на рассматриваемой территории и существует всегда, но в каждый год его границы и параметры изменяются в зависимости от совместного влияния факторов климата и адвекции данного года. Связь между многолетним климатическим полем и полем каждого года можно представить линейным уравнением:

$$Y_{ij} = A_{1j}Y_{cpi} + A_{0j} \pm E_{ij}, \quad (5.15)$$

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_{1j}, A_{0j} – коэффициенты уравнения, определяемые по МНК;

E_{ij} – случайные отклонения.

Линейность модели (5.15) постулируется наличием единой функции климатического поля, как за каждый год, так и за многолетний период, что требует эмпирической проверки. Отличие полей проявляется в коэффициентах, из которых A_{1j} характеризует градиент, а A_{0j} – уровень или положение пространственного поля, которое связано со средним по территории значением климатической характеристики. Если выразить случайные отклонения E_{ij} через их стандарт S_{Ej} , то этот параметр будет характеризовать внутреннюю неоднородность поля в каждый j -ый год. Таким образом, всю пространственную динамику поля можно выразить в виде многолетних рядов трех параметров A_{1j}, A_{0j} и S_{Ej} .

Еще одна особенность уравнения (5.15) состоит в том, что оно позволяет разделить поле климатической характеристики каждого года на две однородные составляющие Y_1 и Y_2 , где $Y_1 = A_{1j}Y_{cpi} + A_{0j}$ – климатическая составляющая поля, $Y_2 = E_{ij}$ – адвективная составляющая поля, которая характеризует проявление синоптических особенностей данного года по территории.

Для исследования параметров A_{1j}, A_{0j} и S_{Ej} во времени были применены три модели временных рядов, как и в третьей главе:

стационарная выборка, модель линейного тренда и модель ступенчатых изменений.

5.2. Пространственная изменчивость расчетных характеристик среднемесячной температуры воздуха на Аравийском полуострове

Климатическая норма или среднее многолетнее значение температуры воздуха является одной из основных расчетных климатических характеристик. Климатические нормы температур воздуха рассчитывались за период, рекомендованный ВМО (1961-1990 гг.) [57] и за весь имеющийся период, включающий как наблюдаемые данные, так и восстановленные пропуски наблюдений, составляющий в среднем около 100 лет. Помимо норм определялась также и изменчивость временных рядов, выраженная в виде среднего квадратического отклонения (σ) и его нормированного на среднее значения – коэффициента вариации (C_v), а также расчетные предельные температуры повторяемостью 1 раз в 100 лет, что соответствует обеспеченностям 1,0% для максимальных и 99% для минимальных температур и 1 раз в 200 лет, что соответствует обеспеченности 0,5% и 99,5% [30, 33] соответственно для наибольшего и наименьшего значения. Пример результатов расчета для температур января, которые являются наиболее стабильными во времени, как показано в главе 3, приведен в табл.5.1.

Таблица 5.1

Параметры распределений (норма и изменчивость) и значения повторяемостью в 100 и 200 лет для среднемесячных температур января на метеостанциях Аравийского полуострова

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				C_v	σ	C_v	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
1	40356	7,1	7,2	0,21	1,5	0,20	1,4	10,3	3,3	10,7	3,7	10,6	2,8	11,1	3,3
2	40373	11,5	11,6	0,14	1,6	0,14	1,5	15,0	7,3	15,3	7,6	15,3	6,8	15,7	7,2
3	40375	10,8	10,4	0,19	2,0	0,20	2,1	16,3	6,6	15,5	5,7	17,1	6,3	16,0	5,2

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Сv	σ	Сv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
4	40394	10,2	9,99	0,14	1,4	0,15	1,5	13,1	6,2	13,1	6,1	13,3	5,6	13,4	5,7
5	40400	18,4	18,7	0,1	1,8	0,11	2,0	22,9	15,2	23,7	13,8	23,5	15,0	24,5	13,2
6	40405	12,2	12,4	0,11	1,3	0,11	1,4	14,6	8,3	15,5	8,6	14,7	7,8	15,8	8,1
7	40416	15,2	15,8	0,1	1,5	0,1	1,6	18,5	11,7	18,9	12,5	18,9	11,3	19,2	12,1
8	40430	17,6	17,8	0,08	1,4	0,08	1,4	20,1	13,4	21,1	14,3	20,2	12,8	21,5	13,9
9	40438	14,0	14,5	0,12	1,7	0,12	1,7	17,3	9,4	18,4	10,6	17,5	8,8	18,8	10,2
10	40439	19,7	20,2	0,08	1,6	0,07	1,4	23,0	15,5	23,5	16,5	23,2	14,9	23,8	16,1
11	40580	12,5	12,4	0,16	2	0,15	1,9	16,1	6,8	16,2	7,2	16,3	6,0	16,5	6,5
12	40581	12,8	12,7	0,19	2,4	0,16	2,0	16,1	4,9	16,2	6,4	16,2	3,5	16,4	5,5
13	40582	12,5	12,6	0,13	1,6	0,12	1,5	15,7	7,9	15,9	8,7	15,9	7,2	16,1	8,2
14	40583	12,7	12,8	0,14	1,8	0,14	1,8	16,4	7,8	16,5	8,0	16,6	7,1	16,8	7,4
15	40584	13,3	13,5	0,14	1,8	0,11	1,5	16,7	8,1	16,8	9,5	16,9	7,4	17,1	9,0
16	41020	23,2	23,1	0,06	1,4	0,06	1,4	25,7	18,7	26,2	19,3	25,8	18,0	26,5	18,8
17	41036	15,3	15,2	0,07	1,1	0,09	1,4	18,2	13,0	18,7	12,3	18,6	12,8	19,2	12,0
18	41140	25,8	25,9	0,02	0,5	0,02	0,5	27,3	24,6	27,3	24,8	27,5	24,5	27,5	24,7
19	41150	17,1	16,9	0,08	1,4	0,07	1,2	19,4	12,9	19,6	13,8	19,5	12,3	19,8	13,4
20	41170	17,3	17,2	0,07	1,2	0,08	1,4	20,0	14,2	20,0	13,6	20,3	13,8	20,2	13,1
21	41256	22,1	22,0	0,03	0,6	0,05	1,1	23,4	19,9	24,3	18,7	23,5	19,5	24,4	18,2
22	41314	18,9	18,8	0,07	1,3	0,07	1,3	22,0	15,8	21,9	16,0	22,3	15,4	22,2	15,7
23	41316	22,7	22,5	0,04	0,9	0,04	0,9	24,6	20,6	24,8	20,1	24,8	20,4	25,0	19,8
24	41480	25,5	25,3	0,03	0,8	0,03	0,7	27,1	23,9	27,1	23,7	27,3	23,7	27,3	23,6
Ср,		16,2	16,2		1,44		1,44	19,2	12,3	19,5	12,6	19,4	11,8	19,9	12,1

Из таблицы видно, что нормы температур января на Аравийском полуострове изменяются от 7°С на севере (40356 Турайф) практически до 26°С на южном побережье Красного моря и у Аденского пролива (41140 Джизан, 41480 Аден), а если рассматривать температуры редкой повторяемости раз в 100 и 200 лет, то их наименьшие значения могут быть около 3°С на севере, а

наибольшие – около $27,5^{\circ}\text{C}$ на юго-западе. Пространственное распределение норм и средних квадратических отклонений для температур воздуха января приведено на рис.5.2.

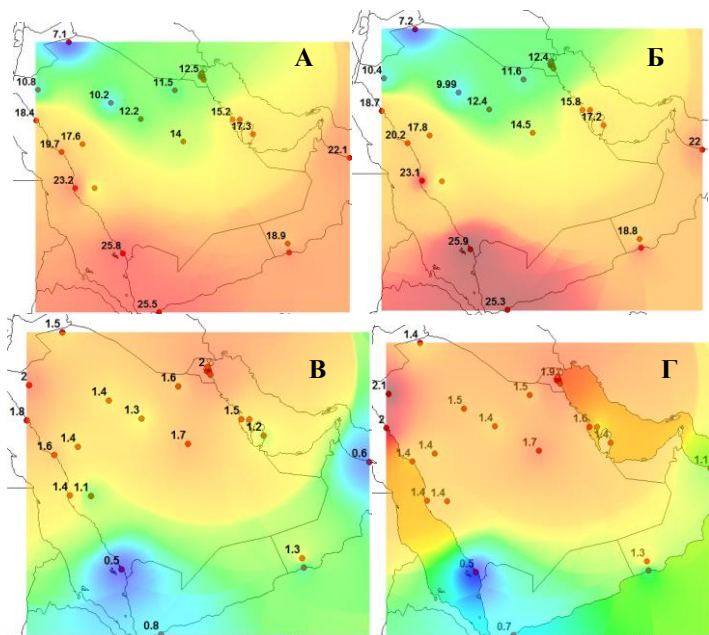


Рис. 5.2. Пространственная изменчивость параметров распределения температур января на Аравийском полуострове (А, Б - норма температуры за период ВМО и за весь период наблюдений; В,Г - среднее квадратическое отклонение за период ВМО и за весь период наблюдений)

Из анализа и сопоставления пространственных распределений параметров, приведенных на рис.5.2 установлены следующие закономерности:

- общая пространственная структура изменений остается практически одинаковой как за период ВМО, так и за весь период наблюдений и для норм температур характеризует их уменьшение с юга на север, а для средних квадратических отклонений наоборот – их увеличение с юга на север;

- за весь период наблюдений наиболее эффективно выделяется область с наибольшими температурами до $25-26^{\circ}\text{C}$ на юго-западе Аравийского полуострова и с наименьшими - $7-9^{\circ}\text{C}$ на северо-западе;

- аналогичным образом для среднего квадратического отклонения области пространственных минимумов и максимумов также более выражены при обобщении данных за весь период, чем за более короткий период ВМО и больше соответствуют пространственным климатическим закономерностям.

Поэтому обобщать данные, если конечно они стационарны, за более продолжительный период надежнее, чем за 30-летний период, рекомендованный ВМО. Этот способ обобщения имеет и статистическую обоснованность, т.к. случайные погрешности любого параметра распределения тем меньше, чем больше объем выборочных данных [9 , 14, 28]. В Табл.5.1 приводятся также и средние территориальные значения за весь период наблюдений и период ВМО, из анализа которых следует, что территориальные средние значения и стандартные отклонения полностью совпадают, что свидетельствует об одинаковости этих параметров, полученных за разные интервалы времени. Вместе с тем, расчетные значения средних температур января редкой повторяемости отличаются уже на 0,3-0,5°C, причем как расчетные максимумы, так и минимумы, полученные за весь период наблюдений систематически больше, чем за период ВМО. Все эти особенности необходимо учитывать при получении расчетных климатических характеристик для строительного и других видов проектирования.

Оценка устойчивости климатических норм на примере температур января показана в табл. 5.2, где приведены средние значения за 4 последовательных 30-летних интервала времени, а также общее изменение нормы за весь период, как разность между максимальным и минимальным ее значением.

Таблица 5.2

Климатические нормы температур января (в °C), полученные
за различные периоды

Код станции	Климатические нормы за периоды				Изменение нормы
	1901-1930	1931-1960	1961-1990	1982-2011	
40356	6,9	7,5	7,2	7,2	0,6
40373	11,3	11,5	11,5	11,8	0,5
40375	9,9	10,1	10,8	10,7	0,9
40394	9,5	9,8	10,2	10,2	0,7

Код	Климатические нормы за периоды				Изменение
40400	18,7	18,5	18,4	19,1	0,7
40405	11,7	12,5	12,2	12,6	0,9
40416	16,1	16,2	15,2	15,2	1,0
40430	18,1	17,6	17,6	17,8	0,5
40438	15,2	14,6	13,9	14,5	1,3
40439	19,9	20,3	19,7	20,8	0,9
40580	12,0	11,9	12,5	12,9	1,0
40581	12,6	12,5	12,8	12,5	0,3
40582	12,0	12,6	12,5	13,0	1,0
40583	12,3	12,7	12,8	13,1	0,8
40584	13,2	13,4	13,3	13,4	0,2
41020	22,6	22,9	23,2	23,1	0,6
41036	15,0	14,9	15,3	15,3	0,4
41140	26,1	25,9	25,8	25,9	0,3
41150	16,6	17,0	17,1	16,9	0,5
41170	16,7	16,6	17,3	17,4	0,7
41256		21,4	22,1	22,5	0,9
41314		18,6	18,8	18,7	0,2
41316	22,0	22,7	22,7	23,2	1,2
41480	24,6	25,6	25,5	25,7	1,1

Если считать, что случайная погрешность климатической нормы (σ_{cp}) определяется по формуле:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5.16)$$

где: σ – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений, n – объем выборки ($n=30$ лет), то при значении $\sigma=1-2^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{cp}= 0,2-0,4^{\circ}\text{C}$.

В табл. 5.2 ярким цветом выделены изменения нормы, которые явно превышают ее удвоенную среднюю случайную погрешность, т.е. изменения составляют более $0,5-0,6^{\circ}\text{C}$, и поэтому их можно считать значимыми. Как следует из результатов, из 24 станций таких случаев, когда изменения нормы больше случайных, 14 и графики изменения их норм показаны на рис.5.3.

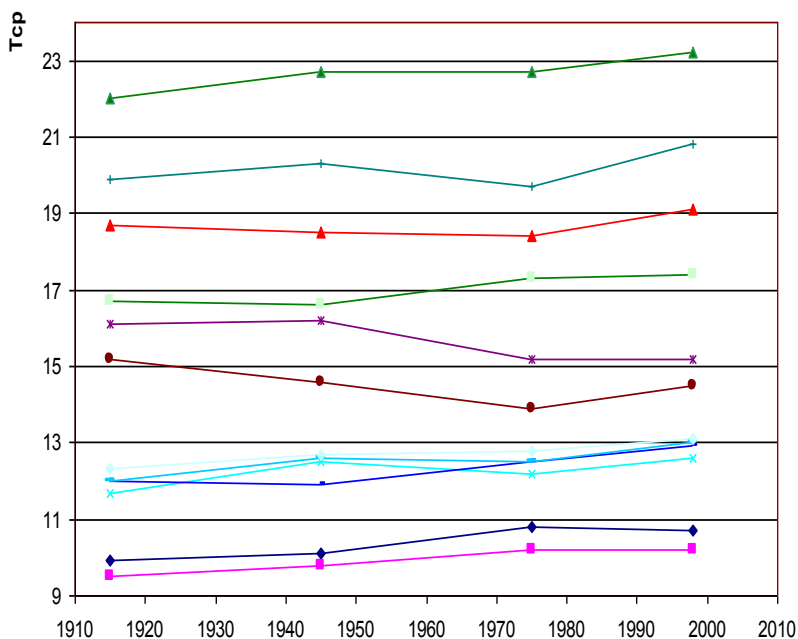


Рис. 5.3. Значимые изменения климатических норм температур января на метеостанциях Аравийского полуострова

Из рассмотрения графиков следует, что направленный рост средних значений имеет место не на всех станциях и проявляется в основном или для высоких температур (метеостанции 41256 Сиб, 41316 Салала) или для низких (метеостанции 40375 Табук, 40394 Хайль), что имеет место в прибрежных районах и на севере. Поэтому можно считать, что центральная часть Аравийского полуострова имеет более стабильные нормы январских температур, чем остальные районы.

Аналогичные расчеты проведены для температуры июля как наибольшей температуры года и наименее стационарной и результаты представлены в табл.5.3.

Таблица 5.3

Параметры распределений (норма и изменчивость) и значения повторяемостью в 100 и 200 лет для среднемесячных температур июля на метеостанциях Аравийского полуострова

№	Код	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
1	40356	28,4	28,4	0,05	1,4	0,05	1,4	32,2	26,1	32,4	26,2	32,7	26,0	33,0	26,1
2	40373	36,1	36,0	0,02	0,7	0,03	1,1	38,3	34,6	39,1	33,9	38,5	34,4	39,5	33,7
3	40375	30,8	30,8	0,03	0,9	0,04	1,2	32,4	28,2	33,4	28,0	32,5	27,9	33,7	27,6
4	40394	31,9	32,7	0,04	1,3	0,7	2,3	36,3	29,8	39,5	29,3	37,0	29,7	40,5	29,2
5	40400	28,9	29,3	0,02	0,6	0,03	0,9	30,5	27,6	31,3	27,8	30,7	27,4	31,6	27,6
6	40405	34,3	34,3	0,03	1,0	0,04	1,4	36,8	32,7	37,2	31,2	37,1	32,5	37,5	30,9
7	40416	35,5	35,7	0,02	0,7	0,02	0,7	37,5	33,7	37,9	33,8	37,8	33,6	38,1	33,6
8	40430	35,8	35,6	0,03	1,1	0,04	1,4	38,0	33,6	39,0	33,0	38,2	33,3	39,4	32,8
9	40438	35,2	34,8	0,03	1,0	0,04	1,4	37,1	31,7	38,9	31,6	37,2	31,2	39,4	31,3
10	40439	31,4	31,6	0,03	0,9	0,04	1,3	33,9	29,4	35,1	29,0	34,1	29,2	35,5	28,8
11	40580	36,5	36,8	0,02	0,7	0,03	1,1	38,4	35,3	40,2	34,8	38,6	35,2	40,7	34,6
12	40581	37,0	37,1	0,03	1,1	0,03	1,1	39,9	35,4	39,9	35,3	40,4	35,3	40,3	35,1
13	40582	37,3	37,4	0,02	0,7	0,03	1,1	40,1	36,2	40,2	34,6	40,5	36,1	40,5	43,3
14	40583	36,6	36,3	0,03	1,1	0,04	1,4	38,1	32,5	39,4	33,4	38,1	31,8	39,7	33,0
15	40584	35,9	36,1	0,03	1,1	0,03	1,1	37,7	32,7	38,8	33,2	37,8	32,2	39,0	32,8
16	41020	32,1	32,0	0,02	0,6	0,04	1,3	33,7	31,0	34,5	28,8	33,9	30,9	34,7	28,3
17	41036	28,5	28,1	0,03	0,8	0,04	1,1	30,5	26,1	30,5	24,8	30,6	25,8	30,7	24,3
18	41140	33,3	33,4	0,02	0,6	0,02	0,6	34,8	31,1	34,7	31,1	34,9	30,8	34,8	30,7
19	41150	34,0	33,7	0,01	0,3	0,03	1,0	35,3	33,2	36,0	31,9	35,5	33,2	36,2	31,7
20	41170	35,4	35,4	0,02	0,7	0,02	0,7	37,4	34,6	37,3	33,5	37,8	34,6	37,5	33,3
21	41256	27,6	27,6	0,03	0,8	0,03	0,8	30,0	25,5	29,6	25,2	30,3	25,3	29,7	24,9
22	41314	29,7	30,1	0,04	1,2	0,04	1,2	33,8	27,8	33,1	27,4	34,4	27,7	33,4	27,2
23	41316	26,4	25,8	0,04	1,0	0,04	1,0	29,4	24,4	28,1	23,0	29,8	24,2	28,3	22,6
24	41480	32,4	31,7	0,02	0,6	0,03	0,9	34,5	30,9	33,8	29,5	34,8	30,8	34,0	29,2
ср		32,9	32,9		0,87		1,15	35,3	31,0	35,8	30,5	35,6	30,8	36,2	30,5

Из данных таблицы следует, что норма температур июля изменяется по полуострову от 26-27°C на метеостанциях 41316 (Салала), 41170 (Доха), 40400 (Эль-Ваджх), находящихся на побережьях до 37°C на метеостанции 40581 (Шуваих), 40582 (Кувейт), находящихся в пустыне. Вместе с тем пространственный градиент норм температур в 2 раза меньше, чем зимой и составляет около 10°C. Температуры редкой повторяемости 1 раз в 100 и 200 лет, могут достигать и чуть более 40°C. Изменчивость температур июля варьирует от 0,3°C в Бахрейне до 1,4°C на севере полуострова. Причем за более короткий период ВМО средняя по территории изменчивость меньше и составляет 0,9°C, чем за весь период наблюдений за который равна 1,1°C. Здесь же можно отметить, что в январе естественная вариация температуры даже несколько выше и составляет в среднем 1,4°C причем как за период ВМО, так и за весь период наблюдений. Пространственные распределения норм температур июля и средних квадратических отклонений показаны на рис.5.4.

Общие территориальные закономерности норм температур состоят в том, что наименьшие их значения наблюдаются на юго-востоке и северо-западе, а максимальные – в центральной части полуострове и особенно вблизи Персидского залива. Естественная изменчивость наименьшая на юге полуострове, а наибольшая – в центральной и северной частях.

В среднем по территории нормы за период ВМО и весь период наблюдений практически одинаковы и составляют 32,9°C. Наибольшие отличия на отдельных станциях достигают 0,7°C как в одну, так и другую сторону. Причем температура за период ВМО выше, чем за общий период в основном на прибрежных станциях, а ниже – внутри полуострова, то в целом такая устойчивая закономерность отсутствует. Оценка устойчивости климатических норм июля приведена в табл.5.4.

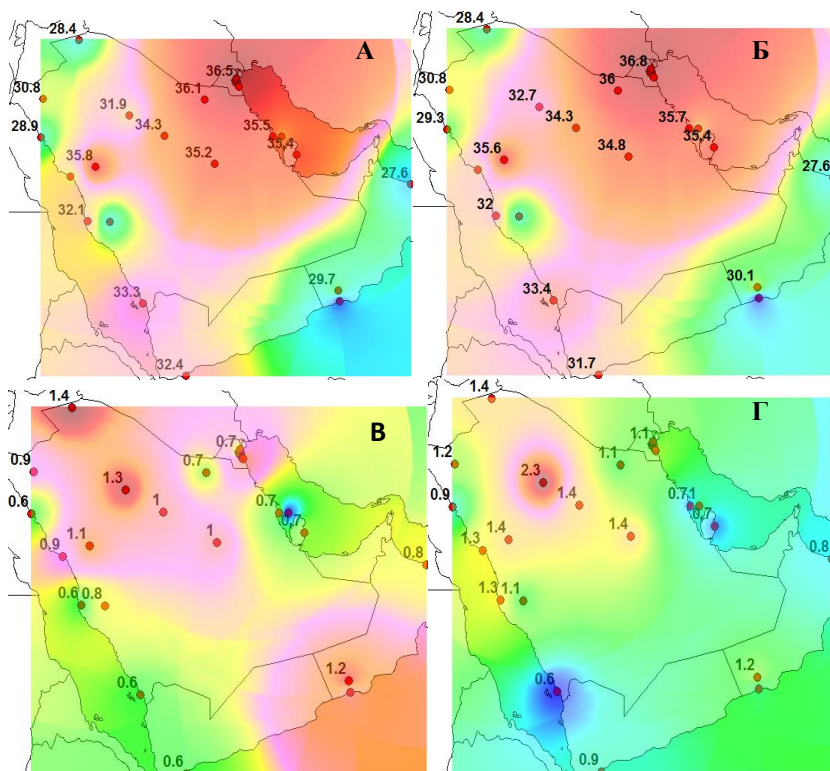


Рис. 5.4. Пространственная изменчивость параметров распределения температур июля на Аравийском полуострове (А, Б - норма температуры за период ВМО и за весь период наблюдений; В, Г - среднее квадратическое отклонение за период ВМО и за весь период наблюдений)

Таблица 5.4

Климатические нормы температур июля ($^{\circ}\text{C}$), полученные за различные периоды

Код станции	Климатические нормы за периоды				Изменение нормы
	1901-1930	1931-1960	1961-1990	1982-2011	
40356	27,8	28,0	28,4	29,4	+1,6
40373	35,4	35,6	36,1	36,7	+1,3
40375	30,5	30,6	30,8	31,3	+0,8
40394	34,0	32,8	31,9	32,4	-1,6

Код станции	Климатические нормы за периоды				Изменение нормы
	1901-1930	1931-1960	1961-1990	1982-2011	
40400	29,2	29,2	28,9	29,7	+0,8
40405	33,9	33,8	34,3	35,1	+1,3
40416		35,8	35,5	36,1	0,6
40430	33,7	34,8	35,8	36,4	+2,7
40438	33,5	33,9	35,2	36,4	+2,9
40439	31,3	31,1	31,4	32,8	+1,7
40580	37,0	36,6	36,5	37,3	+0,8
40581	36,5	36,9	37,0	37,9	+1,4
40582	37,2	36,6	37,7	38,7	+2,1
40583	36,1	35,7	36,6	37,1	+1,4
40584	36,6	36,3	35,9	35,7	-0,9
41020		31,0	32,1	32,7	+1,7
41036	27,4	27,6	28,5	28,8	+1,4
41140		33,3	33,3	33,5	0,2
41150	33,0	33,5	34,0	34,5	+1,5
41170	35,1	35,0	35,4	36,0	+1,0
41256	27,7	27,7	27,6	27,2	-0,5
41314	30,5	30,6	29,7	29,6	-1,0
41316	25,1	25,7	26,4	26,1	+1,3
41480	31,2	31, 7	32,4	32,6	+1,4

Если принять, что предельная случайная погрешность среднего значения примерно такая же, как и в январе, то значимое изменение норм превышающее случайные погрешности ее расчета будет уже практически для всех метеостанций и причем в подавляющем числе случаев нормы июльских температур растут (знак “-” в табл.5.4 свидетельствует об уменьшении нормы, “+” – об ее увеличении). Причем наибольший рост норм до 3,1°С имеет место в цен-

тре полуострова и у Персидского залива, где температуры и так очень высокие.

В отличие от нормы, стандартные отклонения за период ВМО и весь период наблюдений отличаются и в среднем равны: $0,9^{\circ}\text{C}$ и $1,2^{\circ}\text{C}$ (Табл.5.3), что приводит к различию в расчетных температурах редкой повторяемости на $0,3\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$, причем расчетные максимумы за весь период наблюдений всегда больше, чем за период ВМО, а минимумы ведут себя по-разному и отличаются всего на $0,3^{\circ}\text{C}$.

Аналогичные исследования пространственно-временного изменения климатических норм температур воздуха, их изменчивости и расчетных величин редкой повторяемости были выполнены и для других месяцев года. На рис.5.5 показаны пространственные модели норм температур, полученных за весь период наблюдений, сразу же для всех месяцев года.

Из анализа рисунков следует, что 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, а затем, начиная с октября снова смещаются на юго-запад, достигая там максимума в январе – феврале.

Из проведенного пространственно-временного анализа естественной изменчивости получено, что:

- изменчивость многолетних колебаний температур воздуха в холодный период года наименьшая на юге и наибольшая в центре и на севере и изменяется по территории в 4 раза: примерно от $0,5^{\circ}\text{C}$ до $2,0^{\circ}\text{C}$ и чуть более;
- изменчивость многолетних колебаний температур воздуха в теплый период года также наименьшая на юго-западе, а наибольшая в центре и на севере, но изменяется по территории меньше, чем зимой (примерно в 2 раза, а не в 4): от $0,6^{\circ}\text{C}$ до $1,3^{\circ}\text{C}$.

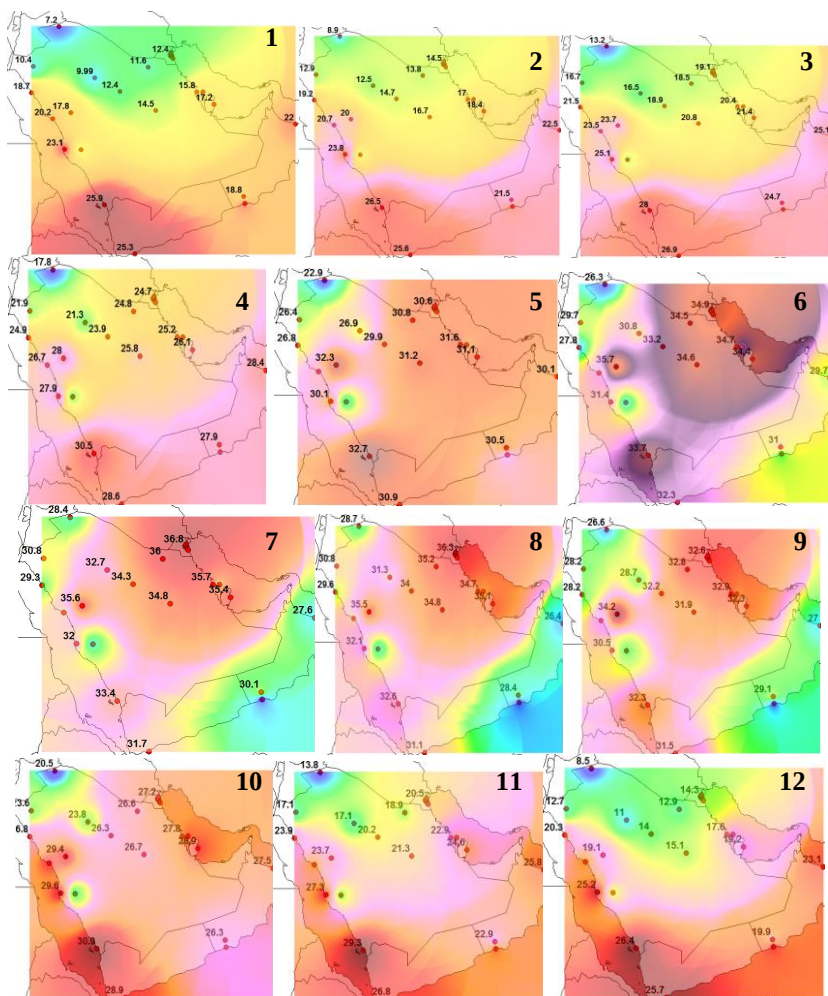


Рис. 5.5. Пространственная изменчивость норм среднемесячных температур на Аравийском полуострове за весь период наблюдений (номер на рисунке, соответствует номеру календарного месяца)

Между климатическими нормами (T_{cp}) и расчетными температурами повторяемостью 1 раз в 100 лет ($T_{1\%}$) (квантилями распределений) для температур января получены следующие территориальные зависимости вида $T_{p\%} = b/T_{cp} + b_0$:

$$\text{весь период } T_{1\%} = 0,897 T_{1cp} + 4,9 \quad R=0,99 \quad (5.17)$$

$$\text{период ВМО } T1_{1\%} = 0,883 T1_{\text{ср}} + 4,9 \quad R=0,99 \quad (5.18)$$

$$\text{весь период } T1_{99\%} = 1,138 T1_{\text{ср}} - 5,9 \quad R=0,99 \quad (5.19)$$

$$\text{период ВМО } T1_{99\%} = 1,171 T1_{\text{ср}} - 6,6 \quad R=0,98 \quad (5.20)$$

Для остальных месяцев и повторяемостей 1 раз в 100 лет (обеспеченность $P=1\%$ для максимальных значений и 99% - для минимальных) и 1 раз в 200 лет (обеспеченность $P=0,5\%$ для максимальных значений и $99,5\%$ - для минимальных) коэффициенты территориальных зависимостей $b1$ и $b0$ и коэффициенты корреляции R приведены в табл.5.5.

Таблица 5.5

Коэффициенты территориальных уравнений для определения расчетных климатических характеристик температур на Аравийском полуострове

м-ц	повт, раз в лет	Максимум ($P=1\%, 0,5\%$)						Минимум ($P=99\%, 99,5\%$)					
		Весь период			Период ВМО			Весь период			Период ВМО		
		$b1$	$b0$	R	$b1$	$b0$	R	$b1$	$b0$	R	$b1$	$b0$	R
1	100	0,897	4,9	0,99	0,883	4,9	0,99	1,138	-5,9	0,99	1,172	-6,6	0,98
	200	0,889	5,4	0,99	0,876	5,2	0,98	1,155	-6,6	0,99	1,195	-7,5	0,98
2	100	0,905	5,5	0,96	0,840	6,5	0,97	1,096	-5,4	0,98	1,194	-7,1	0,99
	200	0,896	6,0	0,94	0,830	7,0	0,96	1,108	-6,0	0,98	1,022	-4,8	0,92
3	100	0,799	7,6	0,98	0,874	5,5	0,99	1,150	-6,2	0,98	1,158	-6,4	0,99
	200	0,775	8,5	0,97	0,863	6,0	0,98	1,169	-6,9	0,98	1,178	-7,1	0,98
4	100	0,795	8,6	0,95	0,713	10,1	0,88	1,143	-6,9	0,96	1,093	-5,1	0,96
	200	0,772	9,5	0,94	0,661	11,7	0,82	1,158	-7,6	0,94	1,090	-5,3	0,95

м-ц	повт., раз в лет	Максимум ($P=1\%, 0,5\%$)						Минимум ($P=99\%, 99,5\%$)					
		Весь период			Период ВМО			Весь период			Период ВМО		
		b_1	b_0	R	b_1	b_0	R	b_1	b_0	R	b_1	b_0	R
5	100	0,994	3,3	0,93	0,989	-2,5	0,97	0,963	-2,1	0,90	0,935	-1,0	0,92
	200	0,986	3,9	0,92	0,984	2,8	0,96	0,950	-2,0	0,87	0,975	-2,6	0,91
6	100	1,074	0,7	0,93	0,915	4,8	0,96	0,869	1,3	0,92	0,908	0,8	0,96
	200	1,078	0,9	0,91	0,898	5,6	0,95	0,858	1,4	0,91	0,880	1,4	0,94
7	100	1,036	1,7	0,96	0,925	4,8	0,97	1,022	-3,2	0,99	1,003	-2,1	0,97
	200	1,043	1,8	0,94	0,914	5,4	0,96	1,180	-8,4	0,91	0,996	-2,0	0,96
8	100	1,125	-0,8	0,96	0,970	3,3	0,96	0,943	-1,2	0,94	1,002	-2,4	0,96
	200	1,148	-1,2	0,96	0,956	4,0	0,94	0,945	-1,6	0,92	0,999	-2,5	0,95
9	100	0,964	4,3	0,91	0,910	5,0	0,95	0,903	0,05	0,93	0,942	-0,6	0,95
	200	0,950	5,1	0,89	0,896	5,6	0,94	0,873	0,7	0,90	0,925	-0,3	0,93
10	100	0,927	4,9	0,91	0,949	3,7	0,95	1,047	-4,4	0,87	1,097	-5,5	0,94
	200	0,934	4,9	0,90	0,941	4,2	0,93	1,076	-5,6	0,87	1,117	-6,4	0,92
11	100	0,894	5,5	0,94	0,926	3,9	0,97	1,170	-6,7	0,99	1,307	-10,	0,99
	200	0,887	6,1	0,92	0,879	5,3	0,98	1,191	-7,5	0,98	1,342	-11,	0,98
12	100	0,817	7,0	0,98	0,852	5,6	0,98	1,196	-6,9	0,99	1,164	-6,2	0,99
	200	0,801	7,7	0,97	0,840	6,2	0,97	1,217	-7,6	0,99	1,186	-7,0	0,99

Из анализа результатов табл.5.5 следует, что территориальные взаимосвязи между средними значениями и температурами редкой повторяемости очень тесные и в подавляющем большинстве случаев коэффициенты корреляции более 0,9. Причем, в ме-

сяцы холодного периода коэффициенты корреляции выше и часто достигают значений 0,99.

Полученные территориальные зависимости имеют большое практическое значение для прикладной климатологии, т.к. с одной стороны позволяют получить расчетные климатические характеристики повторяемостью в 100 и 200 лет для рассматриваемых станций, а с другой стороны на основе пространственных интерполяций норм (рис.5.5) и этих регрессионных зависимостей можно получить расчетные климатические характеристики в любой точке Аравийского полуострова, где наблюдения отсутствуют.

5.3. Пространственная изменчивость расчетных характеристик среднегодовой температуры и параметров функции сезонных изменений на Аравийском полуострове

Среднегодовая температура воздуха, как следует из результатов главы 4, является наиболее нестационарной характеристикой, но вместе с тем климатические нормы, определенные за период ВМО и весь период наблюдений (табл. 5.6) практически не отличаются и средние территориальные их значения в обоих случаях равны 25,4°C. Между нормами за весь период наблюдений (Y) и период ВМО (X) имеет место прямолинейная зависимость с коэффициентом корреляции $R=0,996$ и с коэффициентами $b1=0,996$, т.е. практически не отличается от 1 или линия является биссектрисой прямого угла, и $b0=0,14$, т.е. практически близок к 0.

Таблица 5.6

Параметры распределений (норма и изменчивость) и значения повторяемостью в 100 и 200 лет для среднегодовых температур на метеостанциях Аравийского полуострова

№	Код	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
1	40356	18,5	18,4	0,03	0,5	0,04	0,7	19,9	16,8	20,5	16,6	20,0	16,5	20,7	16,5
2	40373	24,7	24,8	0,03	0,7	0,03	0,7	25,9	22,6	26,5	22,9	26,0	22,3	26,7	22,7

№	Код	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		БМО	Весь	БМО		Весь		БМО		Весь		БМО		Весь	
				Сv	σ	Сv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
3	40375	21,7	21,8	0,03	0,6	0,08	1,7	22,9	19,5	23,1	20,3	23,0	19,8	23,2	20,1
4	40394	21,9	21,9	0,02	0,4	0,03	0,6	23,5	21,0	24,0	20,3	23,7	20,9	24,3	20,2
5	40400	24,5	24,7	0,02	0,5	0,02	0,5	25,8	23,5	26,0	23,4	25,9	23,4	26,1	23,3
6	40405	23,6	23,9	0,03	0,7	0,03	0,7	25,2	22,2	25,8	21,9	25,4	22,1	26,0	21,7
7	40416	26,0	26,5	0,02	0,5	0,03	0,8	27,5	24,7	28,4	24,8	27,7	24,5	28,6	24,6
8	40430	27,9	28,1	0,02	0,5	0,02	0,5	28,9	26,2	29,7	26,2	29,0	26,0	29,8	26,0
9	40438	25,6	25,7	0,03	0,7	0,04	1,0	27,3	23,9	28,6	23,6	27,1	23,7	28,9	23,4
10	40439	26,5	27,0	0,02	0,5	0,04	1,1	27,9	25,1	29,7	25,2	28,1	25,0	30,1	25,0
11	40580	25,3	25,3	0,02	0,5	0,03	0,7	26,6	24,0	27,1	23,7	26,8	23,9	27,3	23,6
12	40581	26,0	25,9	0,02	0,5	0,03	0,7	27,5	24,7	27,9	24,4	27,6	24,5	28,2	24,2
13	40582	25,7	25,6	0,02	0,5	0,03	0,8	26,9	24,3	27,4	24,1	27,0	24,1	27,6	24,0
14	40583	25,7	25,5	0,02	0,5	0,03	0,7	27,2	24,3	27,7	23,7	27,3	24,1	28,0	23,5
15	40584	25,4	25,3	0,02	0,5	0,03	0,7	26,8	24,3	26,9	23,6	27,0	24,2	27,1	23,4
16	41020	28,0	28,2	0,01	0,3	0,02	0,5	29,0	27,1	29,7	27,2	29,1	27,0	29,8	27,1
17	41036	22,3	22,5	0,02	0,4	0,02	0,4	23,4	21,3	24,0	21,2	23,5	21,1	24,2	21,1
18	41140	30,1	30,2	0,01	0,3	0,01	0,3	30,7	29,5	31,0	29,4	30,9	29,5	31,1	29,4
19	41150	26,5	26,2	0,02	0,5	0,02	0,5	27,8	25,5	28,0	24,9	27,9	25,4	28,2	24,8
20	41170	27,1	26,7	0,02	0,5	0,04	1,1	28,2	25,8	29,3	24,3	28,3	25,6	29,5	24,0
21	41256	26,3	26,3	0,01	0,3	0,01	0,3	27,0	25,5	27,1	25,6	27,1	25,4	27,2	25,5
22	41314	25,7	25,7	0,02	0,5	0,02	0,5	26,8	24,7	26,9	24,3	26,9	24,6	27,0	24,2
23	41316	25,7	25,9	0,01	0,2	0,02	0,5	26,8	25,1	27,2	25,0	27,0	25,0	27,3	25,1
24	41480	28,9	28,7	0,01	0,03	0,02	0,6	29,6	28,2	29,9	27,8	29,6	28,2	30,0	27,6
Ср.		25,4	25,4		0,46		0,69	26,6	24,2	27,2	23,9	26,7	24,0	27,4	23,8

Между другими параметрами табл.5.6, определенными за период БМО и за весь период наблюдений существуют следующие территориальные зависимости:

$$\sigma(\text{весь}) = 0.909 \sigma(\text{БМО}) + 0,27 \quad R=0,46 \quad (5.21)$$

$$T100\max (\text{весь})= 1,03 T100\max (\text{ВМО}) -0,21 \quad R=0,98 \quad (5.22)$$

$$T100\min (\text{весь})= 0,970 T100\min (\text{ВМО}) +0,49 \quad R=0,99 \quad (5.23)$$

$$T200\max (\text{весь})= 1,02 T200\max (\text{ВМО}) -0,20 \quad R=0,98 \quad (5.24)$$

$$T200\min (\text{весь})= 0,969 T200\min (\text{ВМО}) +0,49 \quad R=0,99, \quad (5.25)$$

где σ (весь), σ (ВМО) – стандартные отклонения за весь период наблюдений и период ВМО; $T100\max$, $T100\min$ – расчетные значения среднегодовой температуры повторяемостью 1 раз в 100 лет для максимума (обеспеченность 1%) и минимума (обеспеченность 99%); $T200\max$, $T200\min$ – расчетные значения среднегодовой температуры повторяемостью 1 раз в 200 лет для максимума (обеспеченность 0,5%) и минимума (обеспеченность 99,5%).

Из анализа территориальных средних значений для каждого параметра (табл.5.6) и полученных территориальных зависимостей (5.21)-(5.25), можно сделать вывод, что стандартные отклонения за весь период наблюдений в 1,5 раза больше, чем за период ВМО. Расчетные значения максимумов редкой повторяемости, полученные на весь период наблюдений в среднем на 0,3-0,4°C выше, чем полученные за период ВМО, в то же время минимумы 0,4-0,6°C ниже. Это обстоятельство следует учитывать при строительном проектировании и использовать расчетные значения годовых температур, полученных за весь период наблюдений, т.к. они дают более страховочные значений расчетных климатических характеристик.

Пространственное распределение норм и стандартных отклонений среднегодовых температур на Аравийском полуострове приведено на рис.5.6 из которого 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 стан-

дартных отклонений во всей 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.

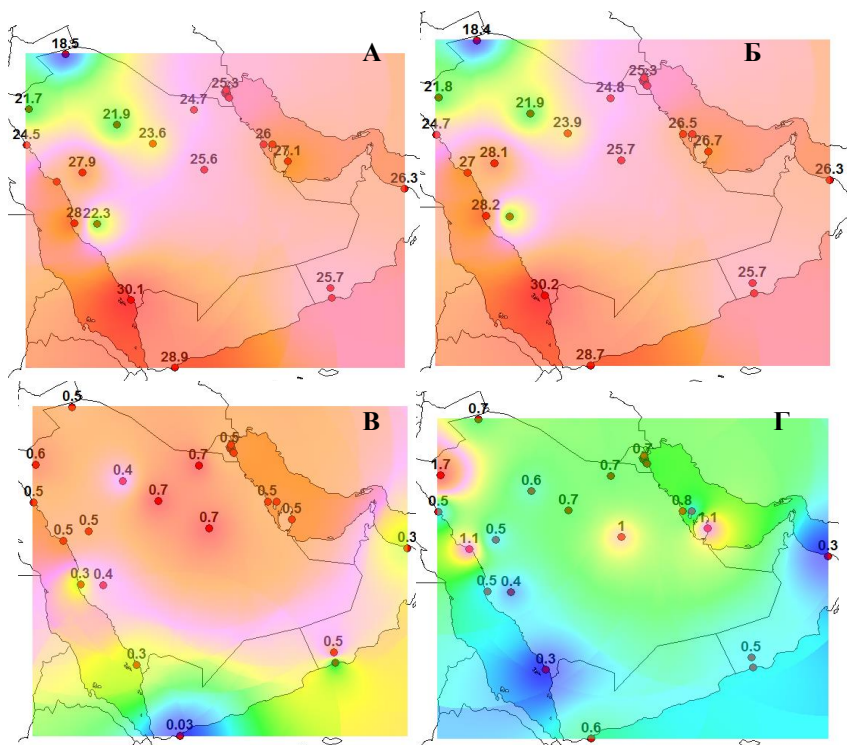


Рис. 5.6. Пространственная изменчивость параметров распределения среднегодовых температур на Аравийском полуострове (А, Б - норма температуры за период ВМО и за весь период наблюдений; В,Г - среднее квадратическое отклонение за период ВМО и за весь период наблюдений)

Рассчитанные значения только основных параметров (норма и изменчивость) для коэффициентов функции сезонных изменений температуры приведены в табл.5.7.

Таблица 5.7

Норма и изменчивость для параметров функции сезонных изменений
на метеостанциях Аравийского полуострова

№	Код	Коэффициент B_I						Коэффициент B_0				Параметр Se			
		среднее		изменчивость											
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		норма		σ		норма		σ	
				C_V	σ	C_V	σ	ВМО	весь	ВМО	весь	ВМО	весь	ВМО	весь
1	40356	0,9	1,0	0,05	0,04	0,07	0,07	-0,01	-0,07	0,7	1,4	1,18	1,18	0,27	0,
2	40373	0,9	0,9	0,06	0,05	0,06	0,05	0,2	-0,04	1,4	1,4	1,2	1,2	0,3	0,3
3	40375	0,9	1,0	0,05	0,04	0,1	0,1	0,2	-0,09	1,1	1,7	0,99	1,2	0,26	0,4
4	40394	1,0	0,9	0,06	0,06	0,06	0,05	0,5	0,05	1,3	1,3	1,1	1,1	0,3	0,3
5	40400	1,0	1,0	0,07	0,07	0,1	0,1	-0,4	0,003	2,0	2,5	0,81	0,88	0,3	0,32
6	40405	1,0	1,0	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,14	-0,08	1,7	1,8	1,1	1,2	0,3	0,4
7	40416	0,9	0,9	0,06	0,05	0,05	0,4	-0,36	-0,22	2,0	1,7	0,8	1,0	0,2	0,4
8	40430	1,0	0,9	0,06	0,06	0,07	0,06	-0,04	-0,14	0,2	2,2	0,8	1,0	0,2	0,3
9	40438	1,0	1,0	0,06	0,06	0,8	0,08	-0,74	-0,35	1,8	2,0	1,0	1,1	0,3	0,33
10	40439	0,9	0,9	0,09	0,08	0,1	0,09	-0,11	0,12	2,5	3,4	0,8	0,9	0,2	0,3
11	40580	0,9	1,0	0,05	0,04	0,05	0,05	0,34	0,01	1,7	1,3	1,0	1,0	0,3	0,3
12	40581	1,0	0,9	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	1,8	1,7	1,0	1,1	0,44	0,33
13	40582	1,0	1,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	1,4	1,2	0,9	0,9	0,27	0,3
14	40583	1,0	1,0	0,05	0,05	0,06	0,06	-0,17	-0,03	1,8	1,7	1,2	1,2	0,4	0,4
15	40584	0,9	1,0	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,005	1,8	1,8	0,9	1,1	0,27	0,33
16	41020	0,9	1,0	0,1	0,09	0,1	0,1	0,7	0,005	3,0	2,6	0,7	0,9	0,3	0,4
17	41036	1,0	1,0	0,05	0,05	0,06	0,06	-0,08	-0,02	1,2	1,8	0,8	0,9	0,2	0,4
18	41140	1,0	1,0	0,06	0,06	0,07	0,07	-0,23	-0,01	2,0	2,1	0,5	0,5	0,2	0,2
19	41150	1,0	1,0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-0,04	1,9	1,5	0,7	0,6	0,3	0,2
20	41170	0,9	0,9	0,06	0,05	0,06	0,05	0,4	0,07	1,5	1,6	0,7	0,9	0,2	0,3
21	41256	1,0	1,0	0,08	0,08	0,1	0,1	-0,49	-0,04	2,4	3,2	0,5	0,6	0,2	0,2
22	41314	1,0	0,9	0,1	0,1	0,1	0,09	-0,21	-0,01	2,6	4,2	1,0	0,9	0,3	0,3

№	Код	Коэффициент $B1$						Коэффициент $B0$				Параметр Se			
		среднее		изменчивость											
				ВМО		Весь		норма		σ		норма		σ	
		ВМО	Весь	C_v	σ	C_v	σ	ВМО	весь	ВМО	весь	ВМО	весь	ВМО	весь
23	41316	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,25	0,007	3,2	2,7	0,6	0,6	0,2	0,2
24	41480	1,0	1,0	0,05	0,05	0,08	0,08	-1,22	-0,04	1,7	2,3	0,6	0,4	0,2	0,1
Ср.		1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,08	-0,04	1,8	2,0	0,9	0,9	0,3	0,3

Из данных таблицы видно, что средние территориальные значения коэффициентов $B1$ равны 1, т.е. являются как устойчивыми во времени, так и несмещенными. Средние территориальные значения коэффициента $B0$ имеют небольшое отрицательное смещение для территории и во времени отличаются в 2 раза, в то же время значения параметра Se стабильны во времени и в среднем равны $0,9^{\circ}\text{C}$. Изменчивость же для всех этих коэффициентов остается стабильной.

Пространственные распределения коэффициентов $B1$ и $B0$ и параметра Se показаны на рис.5.7 для данных за весь период наблюдений.

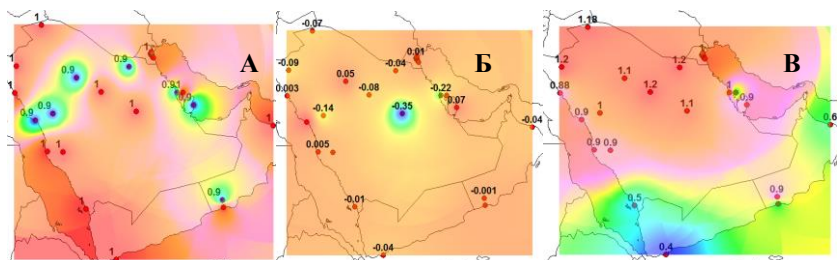


Рис. 5.7. Пространственная изменчивость норм коэффициентов функции внутри-годовых колебаний, где А – коэффициент $B1$, Б – коэффициент $B0$, В – параметр Se за весь период наблюдений

Из рисунков следует, что пространственные распределения $B1$ и $B0$ практически однородны, а отдельные их локальные минимумы имеют место для $B1$ на севере, у Персидского залива и на юге, а для коэффициента $B0$ – в центральной части полуострова. Распределение параметра Se имеет пространственные законо-

мерности 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.

Между параметрами распределений установлены следующие территориальные зависимости:

$$Se_{cp}(\text{весь}) = 0.987 Se_{cp}(\text{ВМО}) + 0,07 \quad R=0,89 \quad (5.26)$$

$$Se_{cp}(\text{весь}) = 0,267 \sigma_{se}(\text{весь}) + 0,055 \quad R=0,80 \quad (5.27)$$

$$Se_{cp}(\text{ВМО}) = 0,202 \sigma_{se}(\text{ВМО}) + 0,092 \quad R=0,66 \quad (5.28)$$

где Se_{cp} – среднее значение параметра Se , σ_{se} – среднее квадратическое отклонение параметра Se .

Зависимости (5.26) – (5.28) свидетельствуют, что нормы параметра Se за весь период и период ВМО достаточно тесно связаны и не имеют смещений, нормы также связаны и со стандартным отклонением прямолинейной зависимостью, но за весь период наблюдений эта зависимость эффективнее, чем за период ВМО.

5.4. Пространственная изменчивость расчетных характеристик месячных сумм осадков на Аравийском полуострове

В соответствии с выводами Главы 4 осадки являются практически стационарной климатической характеристикой и поэтому для них эффективнее определять климатические нормы и квантили распределения вероятностей редкой повторяемости по рядам, приведенным к многолетнему периоду. Пример результатов расчета параметров и квантилей для осадков января приведен в табл.5.8.

Таблица 5.8

Параметры распределений (норма и изменчивость) и значения повторяемости в 100 и 200 лет для сумм осадков января на метеостанциях Аравийского полуострова

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
1	40375	4,9	8,9	1,2	5,9	1,0	8,9	26,2	0	42,9	0,0	30,6	0	49,9	0,0
2	40400	2,7	5,3	1,8	4,9	1,5	7,9	23,6	0	38,3	0,0	28,8	0	45,7	0,0
3	40416	11,4	31,3	1,2	13,7	1,1	34,4	64,7	0	153	0	76,1	0	177	0
4	40430	10,2	13,9	1,6	16,3	1,2	16,7	74,8	0	78,6	0	89,5	0	92,3	0
5	40438	18,3	20,5	1,4	25,6	1,0	20,5	86,9	0	93,1	0	120	0	106	0
6	40439	14,1	16,6	1,2	17,0	1,1	18,3	83,2	0,5	86,1	2,2	89,4	0,5	101	2,1
7	40582	26,4	33,0	0,7	18,5	0,7	23,1	79,6	0	130	11,9	87,4	0	150	11,8
8	41024	15,3	25,5	1,5	22,9	1,3	33,1	108	0	157	0	129	0	186	0
9	41114	14,9	22,7	1,2	17,8	1,0	22,7	83,8	0	112	1,8	98,6	0	131	1,8
10	41140	17,3	28,5	1,3	22,5	1,2	34,2	109	1,0	167	4,9	130	1,0	198	4,9
11	41150	17,9	17,3	1,3	23,3	1,3	22,5	111	0	104	0	132	0	123	0
12	41168	11,8	25,2	1,7	20,0	1,2	30,2	96,5	0	142	0	117	0	168	0
13	41256	19,1	24,5	1,3	24,8	1,2	29,4	117	0	140	0	139	0	164	0
14	41258	34,8	75,3	1,1	38,2	1,1	82,8	177	0	379	0	206	0	441	0
15	41268	35,0	37,9	1,5	52,5	1,5	56,8	252	0	288	2,1	301	0	348	2,1
16	41314	1,2	1,9	1,2	1,4	1,7	3,2	6,6	0	17,0	0,5	7,7	0	21,6	0,5
17	41316	0,7	1,2	3,2	2,2	2,2	2,6	11,1	0	13,4	0	14,5	0	16,9	0
18	41443	9,4	7,5	0,5	4,7	0,6	4,3	22,0	0	19,8	0	23,5	0	21,5	0
19	41466	7,1	5,8	1,2	8,5	1,3	7,5	40,0	0	34,4	0	46,7	0	40,4	0
20	41467	5,0	6,9	1,7	8,5	1,2	8,3	40,7	0	39,6	0	49,0	0	46,3	0
21	41468	11,6	17,3	1,4	16,2	1,5	26,0	77,5	0	130	0	92,2	0	157	0
22	41469	24,7	30,4	1,2	29,6	1,2	36,4	136	0	167	1,9	160	0	197	1,8
23	41470	12,2	26,1	1,9	23,1	1,4	36,5	113	0,1	177	0	139	0,1	211	0
24	41471	9,9	12,9	2,1	20,7	1,3	16,7	101	0,03	79,6	0	126	0,03	93,9	0
25	41472	10,1	15,4	0,8	8,0	1,0	15,4	40,0	0	74,1	2,6	45,1	0	86,7	2,6

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
26	41474	6,6	14,6	1,0	6,6	0,8	11,7	29,9	0	57,5	0	34,0	0	64,9	0
27	41476	15,5	18,8	1,4	21,7	1,1	20,6	99,0	0	99,4	1,2	118	0	117	1,2
28	41478	21,3	34,2	1,2	25,5	0,9	31,0	110	0	122	0,1	126	0	132	0,1
29	41479	4,4	10,4	2,4	10,5	1,6	16,6	52,7	0	79,5	0	67,1	0	95,1	0
30	41480	10,4	8,2	1,2	12,5	1,4	11,5	57,8	0,6	54,1	0	68,2	0,6	64,5	0
31	41485	4,2	7,2	0,7	2,9	1,1	7,9	12,7	0	45,1	4,4	13,8	0	57,3	4,4
32	42801	26,4	31,1	0,7	18,4	0,5	15,5	79,5	0	75,3	0	87,3	0	81,1	0
33	40250	13,5	14,5	0,9	12,1	0,8	11,6	55,4	0	54,7	0	62,8	0	61,7	0
34	40310	7,1	10,9	1,2	8,5	0,9	9,8	39,1	0,6	42,9	0	46,0	0,3	48,6	0
35	40608	63,5	74,3	0,6	38,1	0,6	44,6	181	3,6	243	24,1	199	0,8	275	23,8
36	40621	68,0	81,5	1,0	68,0	0,8	65,2	355	21,4	349	28,6	419	21,4	408	28,6
37	40642	20,1	19,5	0,6	12,1	0,7	13,6	56,3	0	60,4	0	61,5	0	66,8	0
38	40650	28,3	28,2	0,6	17,0	0,7	19,7	76,7	3,5	96,8	0	84,3	2,4	108	0
Ср,		16,7	22,6	1,3	18,5	1,1	23,0	86,5	0,8	112	2,3	102	0,7	130	2,2

Из данных таблицы следует, что в среднем по полуострову осадки за весь период наблюдений больше, чем за период ВМО, также как и средние квадратические отклонения и квантили, обеспеченностью 1% и 0,5%. В тоже время квантили обеспеченностью 99% и 99,5%, полученные за весь период наблюдений выше, чем за период ВМО. Получены следующие территориальные зависимости между параметрами и квантилями за период ВМО и за весь период наблюдений:

$$P_{cp}(\text{весь}) = 1,194P_{cp}(\text{ВМО}) + 2,8 \quad R=0,92 \quad (5.29)$$

$$\sigma(\text{весь}) = 1,113\sigma(\text{ВМО}) + 2,6 \quad R=0,88 \quad (5.30)$$

$$P_{1\%}(\text{весь}) = 1,135P_{1\%}(\text{ВМО}) + 13,4 \quad R=0,90 \quad (5.31)$$

$$P_{0,5\%}(\text{весь}) = 1,123P_{0,5\%}(\text{ВМО}) + 16,1 \quad R=0,89 \quad (5.32)$$

где: P_{cp} , $P_{1\%}$, $P_{0.5\%}$ - норма осадков и максимальные осадки повторяемость 1 раз в 100 и 200 лет.

Зависимости (5.29) – (5.32) имеют значение для практики, т.к. позволяют при определении параметров и расчетных климатических характеристик осадков перейти от периода ВМО к многолетнему периоду. Эффективные территориальные зависимости между обеспеченными минимальными осадками за весь период и период ВМО отсутствуют, т.к. более, чем для половины метеостанций минимальные расчетные осадки равны 0, а на остальных могут достигать и 20-30 мм.

При этом, нормы осадков изменяются по территории значительно: практически от 1 мм до 70-80 мм. Пространственные распределения норм и стандартных отклонений осадков января приведены на рис.5.8.

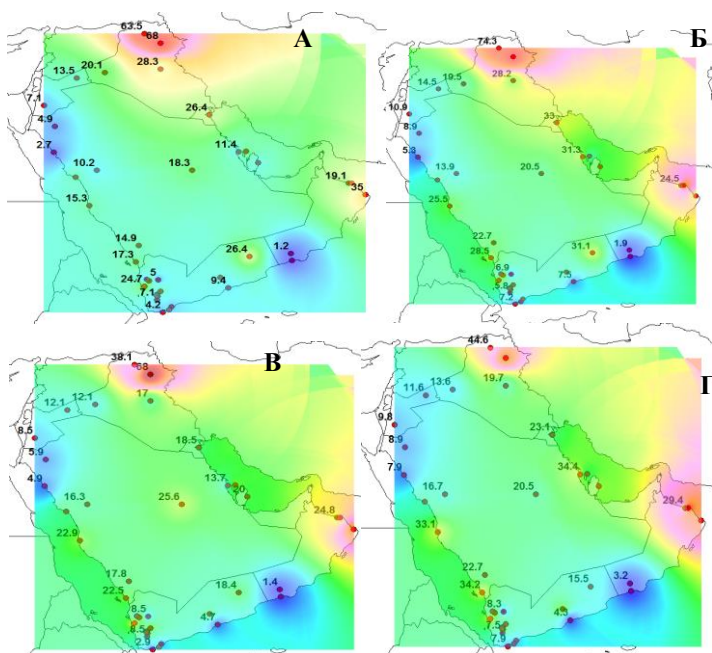


Рис. 5.8. Пространственное распределение норм и стандартных отклонений осадков января на Аравийском полуострове (А, Б - норма осадков за период ВМО и за весь период наблюдений; В, Г - среднее квадратическое отклонение за период ВМО и за весь период наблюдений)

Из рассмотрения рисунков следует, что нормы осадков января и их стандартные отклонения имеют некоторую тенденцию увеличения с юга на север. Эта тенденция в большей степени проявляется для параметров, полученных за период ВМО, а за весь период наблюдений выделяется еще дополнительный максимум вблизи Персидского залива.

Еще один пример определения расчетных климатических характеристик приведен в табл.5.9 для августа, который является месяцем с наибольшими в году осадками для Аравийского полуострова.

Таблица 5.9

Параметры распределений (норма и изменчивость) и значения повторяемости в 100 и 200 лет для сумм осадков августа на метеостанциях Аравийского Полуострова

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
1	40394	0,4	0,6	2,3	0,9	2,3	1,4	4,8	0	6,8	0	6,1	0	8,7	0
2	41024	3,9	2,5	2,6	10,1	3,0	7,5	50,1	0	38,2	0	64,4	0	49,9	0
3	41114	41,9	49,8	0,6	25,1	0,6	29,8	129	3,2	142	5,6	143	1,9	157	3,8
4	41258	8,9	31,8	3,5	31,1	1,4	44,5	158	0	205	0	206	0	242	0
5	41268	4,5	5,2	2,3	10,3	2,4	12,5	59,2	0	62,3	0	76,0	0	79,6	0
6	41314	8,4	16,7	1,5	12,6	1,4	23,4	61,3	0,1	111	0	73,6	0,1	132	0
7	41316	24,4	26,7	0,6	14,6	0,5	13,3	69,1	5,8	69,7	4,7	76,7	5,3	76,4	3,7
8	41443	3,9	4,3	0,5	1,9	0,7	3,0	9,4	0	15,1	0	10,2	0	16,9	0
9	41466	74,4	72,4	0,4	30,0	0,4	29,0	171	13,2	162	12,0	185	9,5	174	7,7
10	41467	48,8	59,0	0,9	43,9	0,7	41,3	186	0	201	0	208	0	223	0
11	41468	25,8	41,1	1,0	25,8	0,9	37,0	117	0	176	0	134	0	201	0
12	41469	12,4	21,6	1,0	12,4	0,8	17,3	56,4	0	82,8	0	64,5	0	93,6	0
13	41470	157	172	0,3	47,1	0,3	51,6	266	55,6	337	82,1	277	45,2	362	77,6
14	41471	168	173	0,9	0,8	138	151	835	49,3	769	76,6	986	49,2	903	76,5
15	41472	271	270	0,5	135	0,5	135	755	70,7	711	60,1	873	65,4	782	51,8
16	41473	265	343	0,7	185	0,5	171	917	105	901	10,1	1050	105	979	0

№	Код станции	Норма за период		Изменчивость				1 раз в 100 лет				1 раз в 200 лет			
		ВМО	Весь	ВМО		Весь		ВМО		Весь		ВМО		Весь	
				Cv	σ	Cv	σ	1,0%	99%	1,0%	99%	0,5%	99,5%	0,5%	99,5%
17	41475	94,3	99,5	0,6	56,5	0,5	50	310	44,3	270	42,0	356	44,4	300	41,3
18	41476	65,9	81,2	0,4	26,4	0,4	32,5	129	0	162	14,8	135	0	172	8,8
19	41477	187	235	0,5	93,5	0,5	117	449	0	544	26,9	484	0	587	11,9
20	41478	122	162	0,5	61	0,5	81	287	11,1	401	30,4	310	3,1	437	23,9
21	41479	119	136	0,5	59,5	0,5	68	268	0	364	19,7	284	0	400	14,2
22	41480	4,6	2,4	0,9	4,1	1,7	4,1	16,4	0	18,9	0	18,1	0	22,7	0
23	41482	7,1	8,6	0,8	5,7	0,7	6,0	25,3	0	29,8	2,3	28,3	0	33,9	2,3
24	41483	83,2	111	0,8	66,5	0,6	66,6	294	0	287	0	329	0	311	0
25	41484	24,6	28,2	0,6	15,0	0,6	17,0	67,3	0	75,4	2,4	72,9	0	82,6	1,1
26	41485	9,6	17,3	1,0	9,6	0,8	13,8	41,6	0	60,9	0	46,8	0	86,3	0
Ср.		70,6	83,4	1,0	37,9	6,2	47,1	220	13,7	238	14,9	250	12,6	266	12,4

Из данных таблицы следует, что в среднем по полуострову осадки за весь период наблюдений больше, чем за период ВМО, как и средние квадратические отклонения и квантили, обеспеченностью 1% и 0,5%, также, как и для января. Получены следующие территориальные зависимости между параметрами и квантилями за период ВМО и за весь период наблюдений:

$$P_{\text{ср}}(\text{весь}) = 1,131P_{\text{ср}}(\text{ВМО}) + 3,6 \quad R=0,99 \quad (5.33)$$

$$\sigma(\text{весь}) = 0,860\sigma(\text{ВМО}) + 14,5 \quad R=0,79 \quad (5.34)$$

$$P_{1\%}(\text{весь}) = 0,954P_{1\%}(\text{ВМО}) + 28,2 \quad R=0,99 \quad (5.35)$$

$$P_{0.5\%}(\text{весь}) = 0,913P_{0.5\%}(\text{ВМО}) + 37,7 \quad R=0,98 \quad (5.36)$$

Зависимости (5.33) – (5.36) являются даже более эффективными, чем для января. Изменение норм и стандартных отклонений осадков августа по территории Аравийского полуострова показано на рис.5.9 по данным за весь многолетний период, т.к. между параметрами имеются тесные взаимосвязи и пространственные кар-

тины распределения параметров подобны как за весь период, так и за период ВМО.

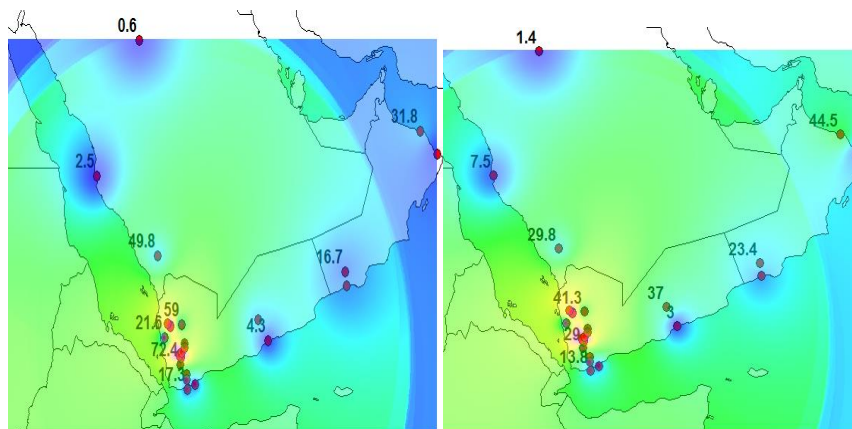


Рис. 5.9. Пространственное распределение норм и стандартных отклонений осадков августа на Аравийском полуострове, полученных по данным за многолетний период (левый рисунок – нормы осадков, правый – средние квадратические отклонения)

Из рассмотрения пространственных распределений следует, что осадки незначительны на всем полуострове, а все максимумы сосредоточены на юго-западе.

В целом же осадки очень неравномерно распределены по полуострову и по сезонам. Общая информация о пространственно-временной неравномерности осадков приведена в Табл.5.10.

Таблица 5.10

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

Из полученных результатов следует, что средние территориальные нормы осадков и их месячные максимумы имеют некоторый годовой ход с максимумами в июле – августе и минимумами в декабре – январе. В тоже время минимальные по территории месячные осадки практически мало изменяются внутри года: от 0,1 мм до 7,4 мм.

В целом по пространственному анализу параметров распределения осадков (норма и среднее квадратическое отклонение) 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.

По аналогии с температурами воздуха для осадков также были получены расчетные территориальные зависимости, связывающие нормы и значения осадков редкой повторяемости: раз в 100 и 200 лет. Коэффициенты региональных зависимостей и оценка их эффективности даны в табл. 5.11.

Из рассмотрения полученных расчетных пространственных моделей следует, что 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.

Таблица 5.11

Коэффициенты территориальных уравнений для определения расчетных климатических характеристик осадков на Аравийском полуострове

м-ц	повт, раз в лет	Максимум (P=1%, 0,5%)						Минимум (P=99%, 99,5%)					
		Весь период			Период ВМО			Весь период			Период ВМО		
		b1	b0	R	b1	b0	R	b1	b0	R	b1	b0	R
1	100	4184	17,4	0,92	4,115	19,2	0,88	0,231	- 2,4	0,70	0,165	- 1,9	0,68
	200	4,837	21,5	0,90	4,738	24,4	0,86	0,229	- 3,0	0,70	0,147	- 1,8	0,61
2	100	3,896	36,6	0,75	4,567	22,4	0,78	0,059	- 0,3	0,52	0,059	- 0,3	0,41
	200	4,451	46,9	0,70	5,313	29,7	0,75	0,047	- 0,2	0,48	0,054	- 0,3	0,41
3	100	3,534	39,8	0,85	2,865	62,9	0,66	0,130	- 1,7	0,65	0,116	- 1,3	0,50
	200	3,967	51,2	0,82	3,130	80,4	0,60	0,120	- 1,6	0,64	0,111	- 1,2	0,50
4	100	2,254	91,6	0,69	2,101	67,9	0,80	0,226	- 2,1	0,72	0,057	0,2	0,39
	200	2,420	117,7	0,62	2,212	84,5	0,74	0,192	- 1,4	0,64	0,052	0,1	0,42
5	100	3,152	32,1	0,84	3,160	39,5	0,81	0,104	- 0,6	0,77	0,064	- 0,5	0,56
	200	3,523	40,3	0,81	3,519	50,8	0,77	0,065	- 0,2	0,58	0,054	- 0,4	0,53
6	100	2,462	40,6	0,80	2,282	26,0	0,76	0,221	- 0,9	0,73	0,153	- 0,4	0,74

м-ц	повт, раз в лет	Максимум (P=1%, 0,5%)						Минимум (P=99%, 99,5%)					
		Весь период			Период ВМО			Весь период			Период ВМО		
		b1	b0	R	b1	b0	R	b1	b0	R	b1	b0	R
	200	2,673	53,6	0,75	2,497	32,3	0,71	0,183	- 0,6	0,67	0,089	0,3	0,52
7	100	2,554	23,3	0,96	2,598	25,1	0,92	0,178	- 2,4	0,82	0,185	- 2,6	0,68
	200	2,790	29,2	0,96	2,840	31,2	0,90	0,142	- 1,9	0,76	0,170	- 2,5	0,64
8	100	2,532	27,2	0,95	2,914	14,7	0,93	0,164	1,3	0,63	0,279	- 5,9	0,82
	200	2,756	35,7	0,94	3,303	16,7	0,91	0,130	1,6	0,52	0,264	- 6,0	0,80
9	100	3,420	21,6	0,88	3,677	3,9	0,95	0,177	0,1	0,94	0,123	- 0,2	0,89
	200	3,869	28,4	0,86	4,199	4,9	0,94	0,157	0,1	0,95	0,099	- 0,2	0,84
10	100	4,229	46,2	0,84	4,803	27,8	0,73	0,204	- 2,0	0,92	0,050	0,0	0,41
	200	4,880	62,4	0,80	5,687	32,7	0,70	0,200	- 2,0	0,92	0,048	0,0	0,39
11	100	4,862	7,6	0,95	5,182	18,2	0,84	0,045	- 0,8	0,48	0,041	0,0	0,31
	200	5,638	9,1	0,94	5,839	28,0	0,80	0,043	- 0,8	0,48	0,039	0,0	0,31
12	100	3,969	32,4	0,67	3,025	44,3	0,63	0,112	- 1,4	0,59	0,222	- 3,1	0,70
	200	4,613	39,8	0,62	3,367	58,2	0,54	0,089	- 1,0	0,48	0,215	- 3,0	0,69

5.5. Пространственные статистические модели температур воздуха и осадков

В Табл. 5.12 приведены результаты оценки эффективности моделей временных рядов для аппроксимации полученных параметров пространственных моделей A_{1j} , A_{0j} и S_{Ej} полученных по зависимости (5.15) для территории Аравийского полуострова, где:

$\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ступ}}$ – относительные отклонения или отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; $F_{\text{тр}}$, $F_{\text{ст}}$ – статистики критерия Фишера для оценки статистической значимости отличия от стационарной модели, $T_{\text{ст}}$ – год ступенчатых изменений, определенный по минимуму остаточных дисперсий двух частей временного ряда, $T_{\text{нач}}$, $T_{\text{кон}}$ – годы начала и окончания наблюдений, n – период наблюдений (в годах), R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Причем пространственное моделирование осуществлялось за разные периоды: весь период наблюдаемых и восстановленных данных, откорректированный период с исключением неоднородных восстановленных значений и последний 50-летний период, включающий 1960 -2011 гг. В табл.5.12 приведены результаты моделирования за последний 50-летний период.

Помимо среднемесячных температур моделировались также среднегодовые температуры ($T_{\text{год}}$) и параметры модели внутригодовых колебаний ($B1$, $B0$, Se), полученные в соответствии с методикой [17, 23, 24]. Ярким цветом в табл.5.12 выделены эффективные статистические модели для которых отличие от стационарной составляет 10% и более, а также статистически значимые расчетные значения статистик критерия Фишера и коэффициенты корреляции линейного тренда.

Таблица 5.12

Характеристики моделей временных рядов для параметров пространственных моделей температур воздуха на Аравийском полуострове за период 1960-2011 гг.

Месяц	$\Delta_{\text{тр}}, \%$	$\Delta_{\text{ст}}, \%$	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ст}}$	$T_{\text{ст}}$	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	n	R
Параметр A1									
1	1,6	7,2	1,03	1,16	1972	1960	2011	52	0,18
2	0,6	4,9	1,01	1,11	1980	1960	2011	52	0,11
3	0	6,7	1	1,15	2001	1960	2011	51	-0,01
4	2,9	6,5	1,06	1,14	1972	1960	2011	52	-0,24
5	0,5	2,6	1,01	1,05	2000	1960	2010	51	0,1
6	10	12,4	1,23	1,3	1994	1960	2010	51	0,44

Месяц	Δтр, %	Δст, %	Fтр	Fст	Tст	Tнач	Tкон	n	R
7	17,1	15,2	1,46	1,39	1980	1960	2010	51	0,56
8	13,9	25,4	1,35	1,8	1996	1960	2010	51	0,51
9	0,6	2,4	1,01	1,05	1997	1960	2010	51	0,11
10	2,7	4,7	1,06	1,1	1991	1960	2010	51	-0,23
11	0,7	2,6	1,01	1,05	1971	1960	2010	51	0,12
12	1,2	5,3	1,02	1,11	1970	1960	2010	51	0,16
Тгод	0,4	5,5	1,01	1,12	1938	1928	2011	84	-0,09
B1	2,2	5,2	1,05	1,11	1951	1906	2011	100	-0,21
B0	0,7	5,4	1,01	1,12	2001	1941	2011	70	-0,12
Se	1,3	2,5	1,03	1,05	1972	1938	2011	70	-0,16
Параметр A0									
1	0,3	4,2	1,01	1,09	1972	1960	2011	52	-0,08
2	0	2,6	1	1,05	1999	1960	2011	52	-0,01
3	0,3	8,4	1,01	1,19	2001	1960	2011	51	0,07
4	5,8	8,8	1,13	1,2	1972	1960	2011	52	0,34
5	0,6	3,4	1,01	1,07	1988	1960	2010	51	0,11
6	5,6	7,4	1,12	1,17	1996	1960	2010	51	-0,33
7	12,8	12	1,31	1,29	1980	1960	2010	51	-0,49
8	8,2	17,9	1,19	1,48	1996	1960	2010	51	-0,4
9	0,1	2,1	1	1,04	1979	1960	2010	51	0,04
10	7	8,8	1,16	1,2	1991	1960	2010	51	0,37
11	0	1,4	1	1,03	1971	1960	2010	51	0,01
12	0	2	1	1,04	1970	1960	2010	51	0
Тгод	7,5	10,7	1,17	1,26	1998	1944	2010	64	0,38
B1	1,8	5,6	1,04	1,12	1963	1934	2010	73	-0,19

Месяц	$\Delta t_p, \%$	$\Delta t_c, \%$	Fтр	Fст	Tст	Tнач	Tкон	n	R
B0	0,2	3,5	1	1,07	1948	1934	2010	74	-0,06
Se	2,1	5,9	1,04	1,13	1993	1942	2010	69	-0,2
Параметр ASe									
1	0,5	3	1,01	1,06	1970	1960	2011	52	-0,1
2	0,1	1,7	1	1,04	2001	1960	2011	52	0,04
3	1,6	7,1	1,03	1,16	2000	1960	2011	51	0,18
4	0	3,1	1	1,06	1999	1960	2011	52	0
5	1,1	8,9	1,02	1,2	1999	1960	2010	51	0,15
6	1,9	10,4	1,04	1,25	1998	1960	2010	51	0,19
7	3,8	5,7	1,08	1,13	1996	1960	2010	51	0,27
8	2,1	6,2	1,04	1,14	1995	1960	2010	51	0,2
9	2,4	5,7	1,05	1,12	1999	1960	2010	51	0,22
10	5,6	8,5	1,12	1,19	1972	1960	2010	51	-0,33
11	0	2,5	1	1,05	2000	1960	2010	51	0
12	0	0,9	1	1,02	1970	1960	2010	51	0,01
Tгод	0,6	6,2	1,01	1,14	1963	1944	2010	64	-0,11
B1	6,5	14,1	1,14	1,35	1963	1934	2010	73	-0,36
B0	7,1	13,1	1,16	1,32	1963	1934	2010	74	-0,37
Se	5,1	13	1,11	1,32	1966	1942	2010	69	-0,32

Из данных табл.5.12 следует, что нестационарность в параметрах пространственных моделей имеет место в летние месяцы и иногда это сказывается на нестационарность среднегодовых температур, как для параметра $A0$ и на коэффициенты модели внутри-годовых колебаний как для параметра ASe. Хронологические графики нестационарных рядов параметров пространственной модели для температур летних месяцев показаны на рис.5.10

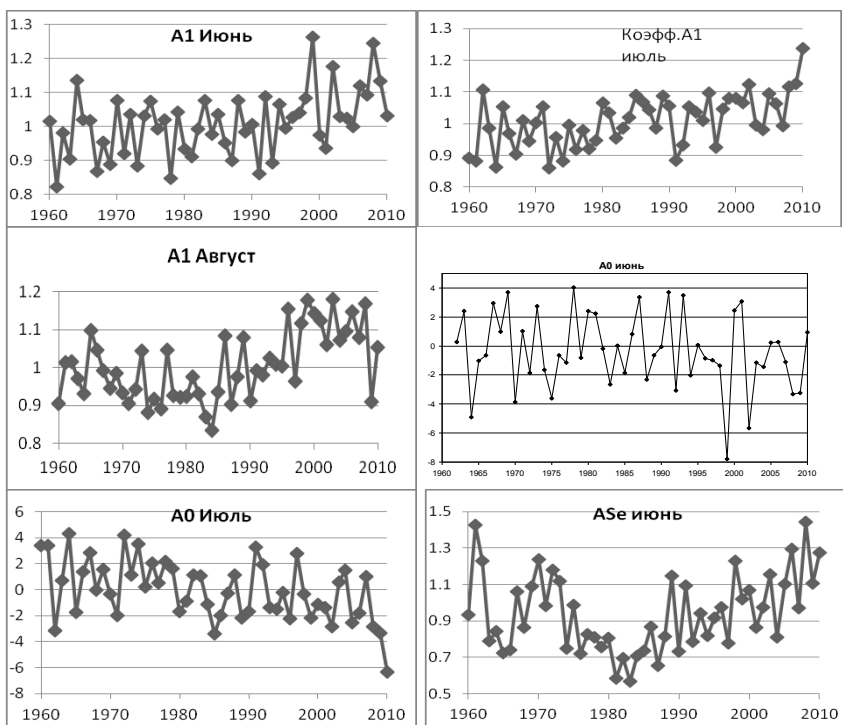


Рис. 5.10. Нестационарные ряды коэффициентов $A1$, $A0$ и ASe для температур летних месяцев на Аравийском полуострове

Нестационарность параметра $A1$ для летних температур обусловлена его ступенчатым ростом в начале 1990 годов, что особенно проявляется для июня и августа, для июля же в большей степени характерен линейный тренд примерно с 1980 г. и значительное увеличение в последние годы. Поэтому можно считать, что для летних месяцев в последние годы градиент пространственного поля температур стал больше. Параметр же $A0$ для июля, характеризующий среднюю региональную температуру, наоборот уменьшился с начала 1980х годов и особенное его уменьшение имело место в 2008-2010 гг., а для июня и августа он ступенчато уменьшился в середине 1990х годов. Уменьшение средней региональной температуры в летние месяцы вместе с тем компенсируется ее ростом в апреле и октябре, что практически мало сказалось на среднегодовой температуре, которая имеет ступенчатый рост, но всего

при $\Delta\text{ст}=10,7\%$. Наиболее существенные нестационарности имеют место в параметре внутренней неоднородности поля $A\text{Se}$ для июня, который растет (рис.5.10), но в тоже время для коэффициентов функции внутригодовых колебаний нестационарность связана с их уменьшением, что свидетельствует о формировании их более однородного поля в последние годы (табл.5.12).

Здесь же можно отметить, что если строить пространственные модели за весь период наблюдений, включая и восстановленные данные, то число нестационарных временных рядов их параметров будет существенно больше за счет отдельных экстремумов в восстановленных данных, имеющих большие погрешности. Если же рассматривать весь период, но с учетом корректировки, т.е. исключения восстановленных экстремумов с существенными погрешностями, то результаты по оценке стационарности параметров будут практически такими же, как и в табл.5.12 для последнего периода наблюдений.

Пространственные статистические модели были построены также и для сумм осадков каждого месяца и результаты оценки стационарности их параметров $A1$, $A0$ и $A\text{se}$ во времени приведены в табл.5.13 для последнего 50-летнего периода.

Таблица 5.13

Характеристики моделей временных рядов для параметров пространственных моделей осадков на Аравийском полуострове за период 1960-2011 гг.

Месяц	$\Delta\text{тр},\%$	$\Delta\text{ст},\%$	Fтр	Fст	Tст	Tнач	Tкон	n	R
Параметр A1									
1	0,8	6	1,02	1,13	1994	1960	2005	45	0,12
2	11,4	19	1,27	1,52	1975	1961	2010	38	-0,46
3	0,1	2	1	1,04	1992	1960	2011	48	-0,05
4	0	3,4	1	1,07	1995	1960	2010	50	0,03
5	2,9	10,2	1,06	1,24	1997	1960	2010	49	0,24
6	0,2	0,9	1	1,02	1978	1960	1999	34	0,06
7	0	4,2	1	1,09	1973	1960	2003	39	-0,02

Месяц	Δтр, %	Δст, %	Фтр	Фст	Тст	Тнач	Ткон	n	R
8	0	2,9	1	1,06	1995	1960	2010	46	0,02
9	1,8	7,4	1,04	1,17	1973	1960	1999	32	-0,19
10	7,1	10,5	1,16	1,25	1976	1960	2009	46	0,37
11	5,3	14	1,12	1,35	1970	1960	2009	48	-0,32
12	4,1	6,8	1,09	1,15	1993	1960	2009	45	0,28
Параметр A0									
1	0,8	4,2	1,02	1,09	1994	1960	2005	45	-0,12
2	10,5	19,3	1,25	1,54	1975	1961	2010	38	0,45
3	1	4,5	1,02	1,1	1992	1960	2011	48	0,14
4	4,6	12,6	1,1	1,31	1995	1960	2010	50	-0,3
5	2,6	6,9	1,05	1,15	1986	1960	2010	49	-0,23
6	1,6	1,3	1,03	1,03	1982	1960	1999	34	-0,18
7	0,6	3,2	1,01	1,07	1971	1960	2003	39	-0,11
8	0,1	1,7	1	1,04	1989	1960	2010	46	0,04
9	0,1	5,7	1	1,12	1971	1960	1999	32	0,05
10	0,1	1,2	1	1,02	1977	1960	2009	46	-0,05
11	4,4	7,8	1,09	1,18	1970	1960	2009	48	0,29
12	1,4	2	1,03	1,04	1976	1960	2009	45	-0,16
Параметр ASe									
1	0,6	4,4	1,01	1,09	1985	1960	2003	44	-0,11
2	1,8	3,6	1,04	1,08	1981	1961	2010	38	-0,19
3	0,4	1,2	1,01	1,03	1985	1960	2011	48	0,09
4	4	3,6	1,09	1,08	1984	1960	2010	50	-0,28
5	0,8	3,6	1,02	1,08	1991	1960	2010	49	-0,13
6	0,2	0,6	1	1,01	1978	1929	1999	35	0,07

Месяц	$\Delta \text{тр}, \%$	$\Delta \text{ст}, \%$	Fтр	Fст	Tст	Tнач	Tкон	n	R
7	0,2	1,6	1	1,03	1973	1960	2003	39	-0,06
8	0,2	3,5	1	1,07	1995	1960	2010	46	0,06
9	2,1	5,6	1,04	1,12	1982	1960	1999	32	-0,2
10	2,9	6,2	1,06	1,14	1977	1960	2009	46	0,24
11	2,5	6	1,05	1,13	1980	1960	2009	48	-0,22
12	0,4	3,5	1,01	1,07	1971	1960	2009	45	-0,09

Из результатов табл.5.13 следует, что нестационарность пространственного градиента осадков (параметр $A1$) имеет место в основном в феврале и ноябре и связано с его уменьшением, т.е. поле осадков в эти месяцы становится более равномерным. Временные графики параметра $A1$ для этих месяцев показаны на рис.5.11, из которых видно, что с начала 1980х годов ступенчато уменьшилось как среднее значение (практически в 2 раза), так и дисперсия.

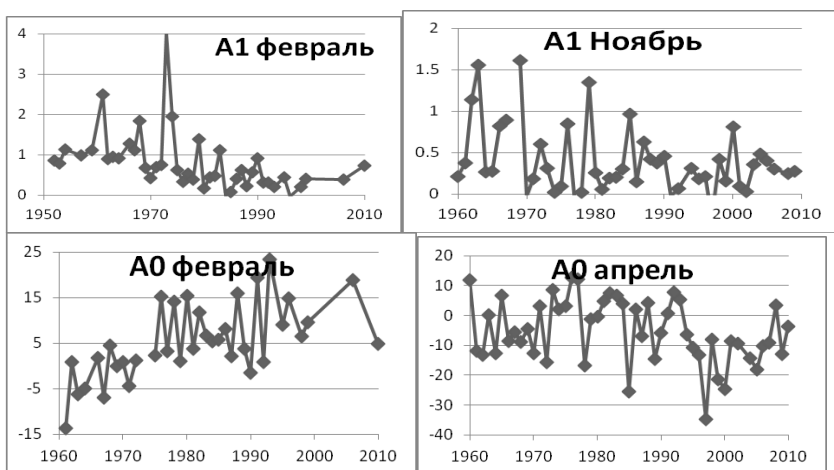


Рис. 5.11. Нестационарные ряды коэффициентов $A1$ и $A0$ для осадков на Аравийском полуострове

Наиболее существенно значение параметра A_0 увеличилось только в феврале, а в апреле произошло его не столь значимое ступенчатое уменьшение также в 1980х годах. Временные ряды параметра A_{Se} , связанного с неоднородностью поля осадков, являются стационарными.

В целом из проведенного исследования и моделирования можно сделать следующие основные выводы:

- помимо подтверждения известных климатических закономерностей, что на Аравийском полуострове зимой теплее прибрежные области, а летом – внутренние пустынные, получены численные значения пространственного градиента нормы температуры, составляющие до 20°C зимой и до 10°C 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 числа станций и в основном в летний период;

- осадков чуть больше в прибрежных, особенно холмистых и горных частях полуострова, чем во внутренних; 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;

- 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.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА БУДУЩЕГО КЛИМАТА АРАВИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА

6.1. Методика оценки будущего климата

Проекции будущих температур воздуха, приведенные на рис.1.9 из 5-го доклада МГЭИК показывают практически равномерное повышение температур на всем Аравийском полуострове и не учитывают локальных особенностей за счет азональных факторов, влияние которых может быть существенным [35]. Вместе с тем, как следует из рис.5.5, пространственное распределение норм температур в каждый месяц является неоднородным и включает локальные экстремумы, которые также следует учитывать в проекциях климата. Поэтому для оценки будущих норм температур воздуха на отдельных метеостанциях Аравийского полуострова, когда учитываются как зональные, так и азональные климатические особенности, предлагается методика, включающая следующие основные этапы:

- выбор наиболее эффективной климатической модели для территории полуострова путем сравнения данных наблюдений и моделирования за совместный период;
- оценку систематической погрешности «наилучшей» модели для каждой метеостанции за счет недоучета локальных особенностей;
- оценку достоверности перехода от данных наблюдений последнего периода к будущим проекциям.

В качестве данных наблюдений были выбраны среднемесячные температуры воздуха на 18 метеостанциях Аравийского полуострова за весь период наблюдений, названия и координаты которых приведены в табл.6.1. Результатами климатического моделирования явились наборы данных проекта CMIP5, находящиеся в свободном доступе в Интернете, для двух основных экспериментов [25, 36, 128, 142]:

- исторического эксперимента за период 1850-2005 гг.;
- проекций среднемесячных температур воздуха с 2011 по 2100 гг. в узлах регулярной сетки для трех основных сценариев: RCP: 2,6, 4,5 и 8,5 Вт/м².

Из всего набора климатических моделей [48,68] результаты экспериментов были представлены в свободном доступе только

для 10 следующих (выделены сокращенные названия моделей, которые будут использованы в дальнейшем):

1. Модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, **HadCM3** Model).
2. Модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics, Russia, **INM** CM4.0 Model).
3. Модель метеорологического института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / **MPI** OM).
4. Модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, **BCC** Model).
5. Французская модель CM4 V1 института Лапласа (**IPSL**/LMD/LSCE, France, CM4 V1).
6. Модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, **CNRM**, CM3 Model).
7. Модель Бьеркнессовского центра климатических исследований, Норвегия (Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, **BNU-ESM**, BCM2.0 Model).
8. Модель канадского центра моделирования и анализа климата с разрешением T63 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, **CanESM2**, CGCM3.1 Model, T63 resolution).
9. Японская модель MIROC3.2 с высоким разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3.2, high resolution), **MIROC-ESM**.
10. Модель института метеорологических исследований, Япония (Meteorological Research Institute, Japan, CGCM2.3.2a), **MRI-ESM1**.

Таблица 6.1

Коды ВМО, названия и координаты метеостанций на Аравийском полуострове

Код ВМО	Название	Широта	Долгота	Период наблюдений
40405	Гассим	26,3	43,77	1967-2011
40430	Медина	24,55	39,7	1956-2011
40438	Эр-Риад	24,72	46,73	1941-2011
40439	Янбу	24,02	38,22	1967-2011

40580	Кувейт	29,28	47,93	1961-1980
40581	Шуваих	29,33	48,05	1961-1980
40582	Кувейт 2	29,52	47,98	1956-2011
40583	Эль-Ахмади	29,1	48,13	1961-1980
40584	Мина Эль-Ахмади	29,05	48,15	1961-1980
41036	Эт-Таиф	21,48	40,55	1961-2011
41150	Бахрейн	26,27	50,65	1902-2011
41170	Доха	25,25	51,57	1962-2011
41314	Тумрайт	17,6	54	1982-2009
41316	Салала	17,03	54,08	1942-2009
41404	Санаа	15,31	44,11	1983-2006
41452	Айбиби	14	44,2	1990-2006
41466	Таиз	13,41	44,8	1983-2006
41480	Аден	12,83	45,03	1881-2005

Расположение выбранных метеостанций показано на рис.6.1.

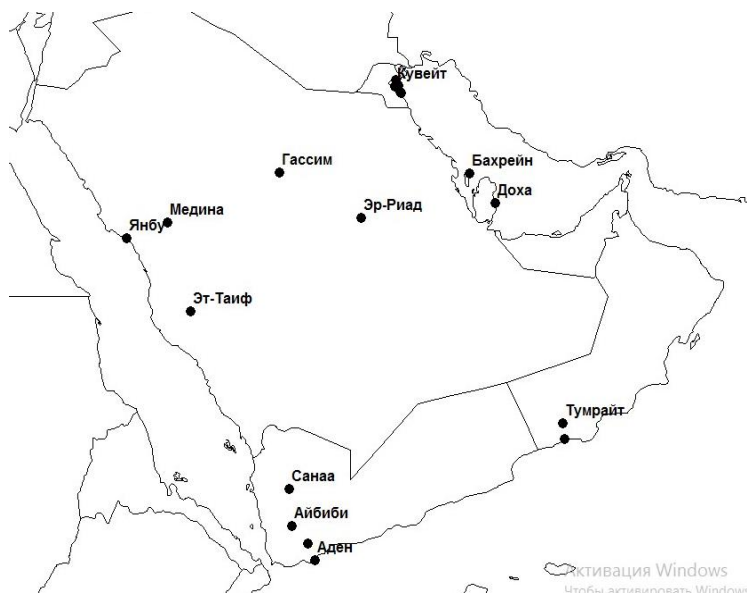


Рис. 6.1. Расположение метеостанций на Аравийском полуострове

Результаты климатических моделей интерполировались в узлы сетки размером $1^\circ \times 1^\circ$, и затем выбирался узел, ближайший к метеостанции. Год начала наблюдений на станциях варьировал в широком диапазоне: от 1881г. для метеостанции Аден до 1990 г. на станции Айбиби и в среднем составлял 44 года за совместный период с данными моделирования.

6.2. Выбор эффективной климатической модели для оценки будущего климата

В связи с тем, что климатические модели не предназначены для надежного воспроизведения погодичных данных, что выражается в крайне низких коэффициентах корреляции между многолетними рядами наблюденных и смоделированных среднемесячных температур ($R < 0,5$), было осуществлено сравнение только на уровне климатических норм. В качестве примера в табл.6.2 показаны разности климатических норм между данными моделирования и наблюдений для двух метеостанций Гассим и Медина, находящихся в северной части полуострова. В табл.6.2 приведены разности норм температур за совместный период наблюдений и моделирования для 10 климатических моделей за каждый месяц и за год как средняя разность по модулю из модулей разностей за каждый месяц года. Жирным шрифтом выделены наименьшие значения разностей по климатической модели за год, а в последней строке после всех моделей приведены наблюденные средние многолетние температуры («Ср год»).

Таблица 6.2

Разности норм температур между смоделированными и наблюденными значениями (тмод – тнабл.) за совместный период (в °C)

Мо- дель	месяцы												Ср год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. Метеостанция 40405 Гассим (1967-2005 гг.)													
HadG-EM	-5,9	-3,4	-2,4	-1,2	-2,0	-2,0	-2,8	-4,0	-5,8	-3,9	-4,1	-5,9	3,6
INM	-8,7	-7,3	-4,8	-3,5	-3,8	-3,2	-2,7	-4,3	-5,9	-8,7	-10,6	-10,0	6,1
MPI	-2,0	-1,4	-0,3	-0,2	-1,4	-0,4	-0,3	-0,6	-1,4	-1,9	-0,5	-1,9	1,0
BCC	-3,0	-2,2	-2,0	-2,0	-3,8	-1,1	-0,2	-0,8	1,9	-2,3	-3,2	-2,9	2,1
IPSL	-4,5	-4,0	-3,4	-3,3	-3,8	-2,1	-1,9	-1,8	-3,7	-5,0	-4,6	-5,2	3,6
CNRM	-3,3	-0,9	-0,9	-1,8	-2,8	-1,4	-2,4	-3,0	-2,7	-2,9	-3,3	-4,2	2,5

Мо- дель	месяцы												Ср год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BNU	-1,9	-2,0	-1,4	-1,9	-1,9	1,2	2,8	1,4	-0,8	-2,2	-2,9	-2,3	1,9
CanESM	-2,8	-1,8	-0,6	-0,9	-1,1	1,1	1,6	1,3	-0,3	-1,8	-2,0	-3,8	1,6
MIROC	-1,1	-0,3	-0,1	-0,7	-2,6	-1,5	1,2	1,1	-0,8	-3,7	-3,1	-2,4	1,6
MRI- ESM	-4,5	-2,8	-2,6	-2,8	-3,6	-2,1	-1,3	-2,7	-3,1	-4,2	-4,5	-4,7	3,2
среднее	12,6	14,5	19,0	24,3	30,2	33,4	34,6	34,6	31,8	26,5	19,0	13,8	24,5
2. Метеостанция 40430 Медина (1968-2005 гг.)													
HadGEM	-5,2	-4,0	-3,1	-2,5	-2,8	-2,5	-3,2	-4,3	-5,5	-4,8	-4,8	-6,0	4,0
INM	-	-	-8,0	-6,5	-6,2	-5,8	-3,9	-5,6	-8,8	-	-	-	8,6
	11,3	10,3								11,2	12,4	12,6	
MPI	-5,0	-4,7	-3,9	-3,2	-3,1	-1,9	-0,8	-1,7	-3,6	-3,7	-3,8	-5,1	3,4
BCC	-5,0	-5,2	-5,4	-5,5	-6,0	-4,7	-3,3	-3,6	-2,3	-4,4	-5,0	-5,3	4,6
IPSL	-7,2	-7,4	-7,3	-6,7	-6,7	-6,1	-4,9	-5,6	-7,0	-7,2	-7,1	-8,0	6,8
CNRM	-7,7	-6,1	-6,0	-6,2	-6,3	-5,1	-4,9	-6,0	-6,5	-6,9	-8,0	-8,8	6,5
BNU	-5,0	-5,2	-4,8	-4,9	-4,4	-2,2	0,2	-1,0	-3,8	-4,8	-5,8	-6,0	4,0
CanESM	-5,3	-4,8	-3,9	-3,6	-3,3	-2,0	-1,4	-1,6	-3,3	-4,0	-4,4	-6,1	3,6
MIROC	-3,6	-3,1	-3,2	-3,4	-3,9	-3,0	-0,3	-1,2	-3,3	-5,0	-5,0	-4,5	3,9
MRI-ESM	-7,8	-7,0	-6,8	-6,8	-7,5	-7,0	-4,1	-5,4	-7,1	-7,6	-7,8	-8,6	7,0
среднее	17,7	19,8	23,7	27,9	32,5	35,9	35,9	36,1	34,8	29,8	23,5	19,4	28,1

Из приведенных в табл.6.2 данных следует, что все модели и практически по все месяцы года занижают нормы температур, причем наибольшее занижение составляет 11°-12°C в зимние месяцы по модели INM. В среднем же за год занижения нормы температур варьируют от 1,0°C для модели MPI до 8,6°C для модели INM, причем для двух этих станций наилучшей оказалась модель MPI. Систематическое занижение температуры даже по «наилучшей» модели зимой может составлять до 5°C, как раз и характеризующее вклад азональных факторов, которые дают температуру зимой выше в данной местности. Причина систематического занижения температур по моделям связана с климатическими особенностями полуострова, главным образом, с наличием пустынь, что формирует температурную аномалию с наиболее высокими температурами на Земном шаре.

Аналогичные расчеты были выполнены для всех 18 метеостанций и обобщенные результаты приведены на рис.6.2, где около каждой станции представлены диаграммы отклонений норм, вычисленных по моделям от наблюдаемой нормы температуры в °C, порядок моделей аналогичен табл.6.2. Врезкой выделены столбчатые диаграммы для 5 близко расположенных метеостанций в районе Кувейта. Как следует из рис.6.2, наименьшее значение отклонений соответствует 3-ей модели, т.е. модели MPI, которая является наилучшей для 11 метеостанций из 18. Для остальных 7 метеостанций в трех случаях наилучшей была модель CNRM, и по одному случаю модели: MIROC, HadGEM, BCC и IPSL. Отклоне-

ния этих 7 моделей от МРІ не такое большое и варьирует для норм годовых температур от 0,1°С на метеостанции Санаа до 1,7°С на метеостанции Эт-Таиф. Отклонения же норм годовых температур модели МРІ от наблюдаемых норм имеют закономерные изменения по территории от наименьших значений в 0,7-0,8°С на востоке до 2,6-2,7°С и 3,4°С (метеостанция Медина) – на западе. В результате проведенного исследования сделан вывод, что климатическая модель МРІ является наиболее подходящей из 10 рассмотренных и может быть применена для оценки будущих норм температур воздуха на Аравийском полуострове.

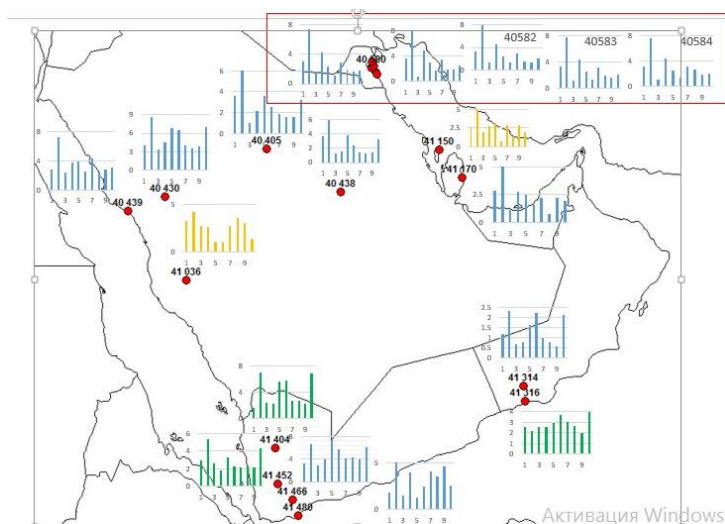


Рис. 6.2. Отклонения по модулю норм среднегодовых температур, полученных по 10 климатическим моделям и по данным наблюдений, в°С

6.3. Результаты оценки будущих норм температур на станциях Аравийского полуострова

Если рассматривать абсолютные отклонения норм температур модели МРІ от наблюдаемых за каждый месяц, то они будут несколько больше и достигают 5-6°С для метеостанций на востоке (Медина, Эт-Таиф) и юго-востоке (Сана, Айбиби) полуострова. Полученные систематические отклонения, как за весь совместный

период, так и за последний с 1980 г., характеризуют систематические погрешности моделирования, связанные с локальными климатическими особенностями каждой метеостанции. Как правило, эти отклонения норм за весь период и последний с 1980 г. совпадали, а если разница составляла более 0,5°C, предпочтение отдавалась норме температур за последний период наблюдений. В табл. 6.3 приведены разницы климатических норм для каждой метеостанции и за каждый месяц, которые являются систематическими погрешностями и должны быть учтены при корректировке норм будущих температур. В связи с тем, что это систематические поправки, которые следует добавлять к будущим сценарным температурам, то они рассчитывались как разность между наблюдаемыми и модельными нормами: $t_{\text{набл}} - t_{\text{мод.}}$.

Таблица 6.3

Систематические погрешности расчетных норм по модели МРІ в °С ($t_{\text{набл}} - t_{\text{мод.}}$)

Код станции	месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40405	1,9	1,4	0,1	0,2	1,7	1,8	0,5	0,8	1,5	1,8	0,2	1,6
40430	4,6	4,2	3,5	3,2	3,2	2,6	0,9	1,9	3,5	3,6	3,7	4,6
40438	2,5	2,3	0,4	0,4	1,9	0,0	0,0	0,8	1,7	1,9	1,8	2,4
40439	3,4	2,8	0,9	0,6	-0,5	-4,0	-4,6	-4,1	-2,2	0,0	2,3	3,5
40580	-1,8	-1,0	-0,8	-0,8	0,1	-0,8	-1,7	-2,2	-1,5	-1,7	-2,2	-1,5
40581	-1,2	-0,4	-0,1	-0,3	0,9	-0,3	-1,1	-1,3	-0,6	-0,9	-1,6	-1,0
40582	-2,3	-2,2	-1,4	0,2	2,1	1,0	0,0	-0,9	-1,3	-1,2	-3,2	-3,0
40583	-1,7	-0,6	-0,5	-0,9	0,4	-0,4	-1,2	-1,7	-1,0	-1,0	-2,3	1,0
40584	-0,7	-0,4	-1,0	-1,5	-0,9	-1,1	-2,0	-2,2	-1,3	-1,1	-1,1	-0,2
41036	0,0	-1,0	-2,7	-3,1	-3,5	-4,1	-4,5	-3,5	-2,9	-3,2	-2,0	-0,5
41150	-2,4	-2,0	-1,7	-1,0	-0,5	-2,1	-2,9	-3,3	-2,7	-1,6	-2,1	-2,5
41170	-2,5	-1,7	-1,0	-0,1	1,2	0,1	-1,4	-2,1	-1,9	-1,3	-1,8	-2,7
41314	-0,3	1,3	1,8	1,7	1,3	-0,3	-0,6	-0,3	0,4	0,4	-0,6	-0,9
41316	4,2	4,0	3,2	1,5	-0,4	-1,0	0,0	-1,0	-0,9	0,1	2,2	3,6
41404	6,2	5,6	3,5	1,4	0,5	-0,3	1,1	2,3	0,6	0,1	2,0	4,6
41452	2,2	2,2	0,9	-1,3	-2,8	-4,0	-3,0	-4,0	-4,6	-2,2	-0,3	1,8
41466	4,8	5,0	4,8	4,0	2,5	0,8	1,8	1,4	0,7	2,3	3,3	4,0
41480	3,3	2,6	2,4	1,0	0,2	-1,0	0,2	0,1	-0,6	0,5	1,6	3,0

Как следует из данных табл.6.3, систематические поправки в основном положительны, т.е, модель занижает температуры на большинстве станций, причем иногда даже до 5-6°C в основном в зимние месяцы (метеостанция 41404 Санаа, 41466 Таиз). Однако, есть метеостанции, для которых модель завышает данные до 4-4,5°C (40439 Янбу, 41036 Эт-Таиф, 41452 Айбиби) в основном в летние месяцы. Эти метеостанции находятся на востоке полуост-

рова ближе к Красному морю и за счет близости водоема летом здесь фактические температуры ниже средних зональных. Вместе с тем на метеостанциях вдоль Персидского залива (коды станций: 40580, 40581, 40582, 40583, 40584, 41036, 41150, 41170) наблюдаемая температура меньше, чем по модели, т.е. локальный климат за счет близости залива прохладнее, чем дают расчеты по модели.

В следующей части исследования были получены многолетние ряды сценарных значений среднемесячных температур с 2011 по 2100 гг., проинтерполированы из узлов регулярной сетки в каждую метеостанцию и рассчитаны нормы температур за три тридцатилетних периода: 2011-2040 гг., 2041-2070 гг., и 2071-2100 гг. В полученные нормы внесены систематические поправки из табл.6.3. Однако, при анализе динамики норм температур, в ряде случаев получено, что разность между нормой последнего периода наблюдений (1981-2010 гг.) и первого сценарного периода (2011-2040 гг.) существенно больше, чем средняя разность между сценарными нормами за соседние 30-летние периоды (рис.6.3, левый график). Очевидно, что такой резкий переход от наблюдений к проекции обусловлен погрешностями и сценарные нормы должны быть скорректированы, чтобы уменьшить этот градиент. Другая ситуация (рис.6.3, правая часть) имела место, когда первая (и остальные) сценарные нормы были меньше, чем последняя наблюдаемая норма, что также следует корректировать.

Поэтому была введена вторая поправка на градиент норм температур. Рассчитывался средний градиент между сценарными нормами за 30-летний будущий период и если градиент между нормами за 1980-2010 гг. и 2011-2040 гг. отличался от сценарного градиента более, чем на 1°C , то он корректировался на средний сценарный и сценарные нормы на столько же уменьшались (рис.6.3 слева). При противоположной ситуации, когда норма за первый сценарный период была ниже, чем за последний наблюдаемый, то сценарные нормы увеличивались на эту разность плюс средний градиент (рис.6.3 справа).

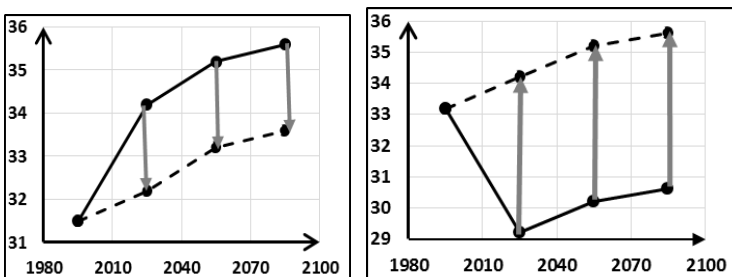


Рис. 6.3. Ситуации корректировки сценарных норм: градиент перехода к первой сценарной норме большой (слева) или первая сценарная норма меньше последней наблюдаемой (справа), стрелками показано направление корректировки, пунктиром – линия откорректированных норм

Средний сценарный градиент норм температуры (dT) вычислялся по формуле:

$$dT = (T_{н3} - T_{н1})/2, \quad (6.1)$$

где $T_{н1}$, $T_{н3}$ – нормы температур за периоды 2011-2040 гг. и 2071-2100 гг., а градиент между наблюдаемыми и сценарными нормами (dT') рассчитывался как:

$$dT' = (T_{н1} - T_{н0}), \quad (6.2)$$

где $T_{н0}$ - нормы температур за последний наблюдаемый период 1981-2010 гг.

И, если $dT' - dT > 1^\circ\text{C}$, то сценарные нормы уменьшались на эту разность, а если $T_{н1} - T_{н0} < 0$, т.е. сценарные нормы были меньше наблюдаемых, то градиентная поправка рассчитывалась как: $T_{н0} - T_{н1} + dT$ и на нее сценарные нормы увеличивались. Значения суммарной поправки (систематической и градиентной) приведены в табл.6.4.

Таблица 6.4

Суммарная (систематическая и градиентная) поправка к сценарным нормам температур

Код станции	месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40405	1,4	0,6	-0,1	-0,5	0,4	-0,7	-1,0	-0,3	0,4	0,7	-0,5	0,9
40430	4,1	3,9	3,3	2,4	2,2	1,1	-0,1	0,7	2,6	2,9	3,0	4,2

Код станции	месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40438	1,9	1,3	0,2	0,2	0,5	-0,7	-1,2	-0,5	-0,2	0,9	1,6	1,8
40439	3,2	2,0	0,8	-0,3	-1,1	-4,0	-5,2	-4,8	-2,9	-0,5	1,7	3,3
40580	-2,8	-2,3	-1,6	-2,5	-1,5	-2,7	-3,6	-3,6	-3,1	-3,0	-3,4	-3,2
40581	-2,0	-1,7	-0,9	-2,1	-0,7	-2,2	-2,5	-2,8	-2,2	-2,1	-2,8	-2,7
40582	-2,5	-2,7	-1,9	-1,1	0,3	-0,6	-1,3	-1,8	-2,1	-2,6	-3,5	-3,4
40583	-2,6	-2,0	-0,9	-1,7	-1,1	-2,2	-3,2	-3,2	-2,8	-2,2	-3,5	-1,0
40584	-1,5	-1,7	-1,8	-3,3	-2,5	-3,0	-3,9	-3,8	-2,9	-2,3	-2,2	-1,9
41036	-1,0	-1,3	-2,7	-3,1	-3,9	-4,1	-4,5	-3,9	-3,0	-3,6	-2,7	-1,6
41150	-1,6	-2,0	-3,2	-3,4	-2,7	-4,3	-4,9	-5,2	-3,8	-1,6	-1,4	-1,5
41170	-2,5	-1,8	-2,2	-2,0	-1,2	-2,7	-3,9	-4,5	-3,3	-1,7	-1,8	-2,1
41314	-0,3	0,7	5,3	1,3	4,8	0,2	0,2	0,8	1,2	0,4	2,1	1,9
41316	4,2	3,9	3,0	1,2	-0,8	-2,1	-3,1	-3,1	-1,2	0,1	3,1	3,6
41404	6,0	5,6	3,5	1,3	-0,1	-0,3	0,5	1,0	0,3	0,1	2,0	4,6
41452	2,2	3,0	1,3	-0,7	-2,8	-4,0	-4,8	-5,0	-4,6	-1,3	0,6	1,8
41466	4,8	4,8	4,5	3,3	2,1	0,8	1,2	0,7	0,7	2,3	3,3	4,0
41480	1,4	2,6	2,4	1,0	-0,1	-0,3	0,0	-0,8	0,1	1,2	1,6	3,0

Из сопоставления данных табл.6.3 и табл.6.4 следует, что обе поправки не компенсируют друг друга, а скорее всего дополняют и особенно в средних ситуациях. Поэтому предельные значения суммарной поправки остаются примерно такими же, как и для систематической - 5-6°C, а для средних условий суммарная поправка обычно выше систематической по модулю на 1,0-1,5°C. Динамика скорректированных норм температур в современный и будущие периоды приведена на рис.6.4 для сценария RCP 4,5 для двух метеостанций, находящихся в разных климатических условиях: Аден на юге у моря и Эр-Риад в центре полуострова.

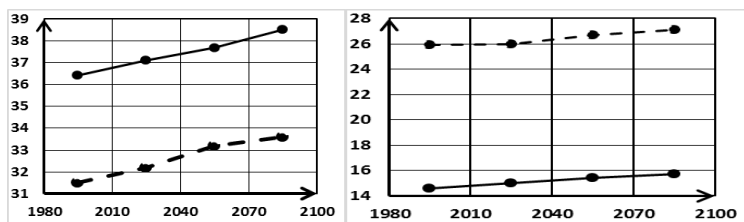


Рис. 6.4. Динамика откорректированных норм температур июля (слева) и января (справа) для метеостанций 41480 Аден (пунктирная линия) и 40438 Эр-Риад (сплошная линия) в °С.

Как следует из рисунков, в центре полуострова в июле температура и так высокая и равная сегодня в среднем 36,4°C, в

конец 21 века еще увеличится, и ее норма будет составлять 38,5°C. Норма температуры января для этой метеостанции достаточно низкая в наше время и равная 14,6°C, увеличится к концу века всего на 1,1°C. В тоже время температура в Адене в январе равная 25,9°C - одна из самых высоких на полуострове в этот сезон и увеличится к концу века еще на 1,2°C, а в июле – на 2,1°C. В результате по всем станциям получено, что летние температуры на полуострове и сейчас высокие и будут расти больше, чем зимние – в среднем на 2°C, в то время как зимние температуры в среднем вырастут на 1°C.

Пространственные закономерности изменения норм летних температур за четыре 30-летних периода общей продолжительностью 120 лет до конца 21 века по сценарию RCP 4,5 приведены в виде интерполяционных схем на рис.6.5.

Основные выводы по оценке будущих температур состоят в следующем:

- для оценки будущих проекций климата необходимо выбирать наиболее подходящую для рассматриваемого региона климатическую модель и для метеостанций Аравийского полуострова такой наиболее эффективной моделью оказалась немецкая модель MPI;
- в сценарные значения климатических характеристик при их приложении к конкретным метеостанциям необходимо вносить как систематическую поправку за счет индивидуальных особенностей метеостанции, так и градиентную поправку при переходе от наблюдаемых норм к будущим сценарным и суммарные значения этих поправок для метеостанций Аравийского полуострова достигают 5-6°C;
- для метеостанций Аравийского полуострова были получены наиболее обоснованные будущие нормы температур до конца 21 века и их динамика свидетельствует, что уже современные высокие летние температуры в среднем могут вырасти еще на 2°C, а зимние - на 1°C до конца этого столетия.

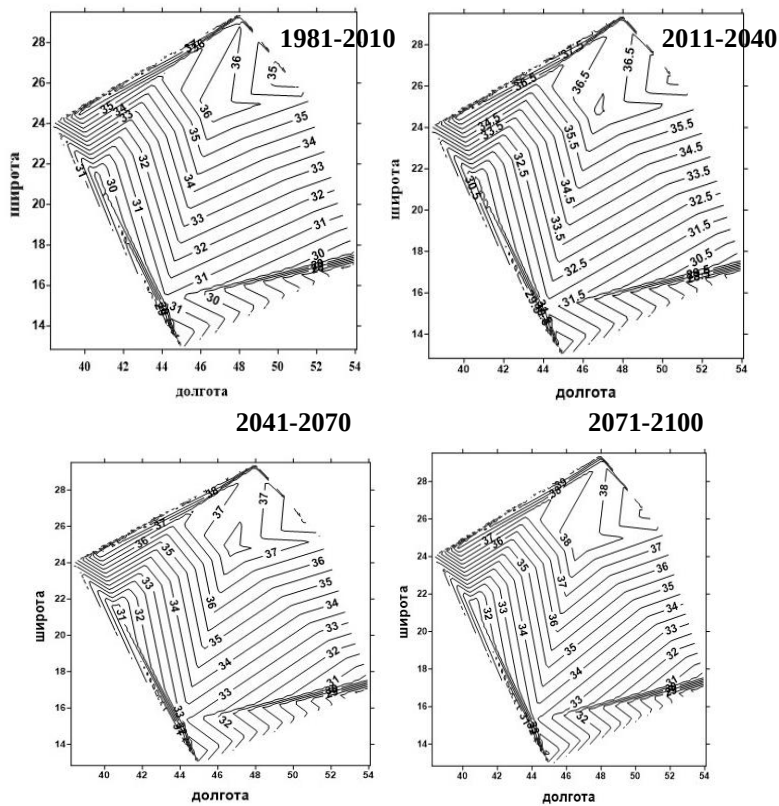


Рис. 6.5. Схемы пространственных распределений норм температур воздуха июля на Аравийском полуострове по сценарию RCP 4,5 за четыре 30-летних периода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного регионального климатического исследования для территории Аравийского полуострова получены следующие основные научные и практические результаты.

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 нестациональности 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. В последние годы число нестационарных моделей увеличивается, как в летние месяцы, так и особенно в марте.

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 теплого 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 $B1$ – 12,5% и 4,2% для моделей ступенчатых изменений и линейного тренда, для коэффициента $B0$ 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. Помимо подтверждения известных климатических закономерностей, что на Аравийском полуострове зимой теплее прибрежные области, а летом – внутренние пустынные, получены численные значения пространственного градиента нормы температуры, составляющие до 20°C зимой и до 10°C 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.

8. 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

9. 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 ред-

кой повторяемости 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.

10. 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.

11. 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 $A0$ для июля, характеризующий среднюю региональную температуру, наоборот уменьшился с начала 1980х годов. Нестационарность пространственного градиента осадков (параметр $A1$) имеет место в основном в феврале и ноябре и связано с его уменьшением, т.е. поле осадков в эти месяцы становится более равномерным.

12. Для оценки будущих температур воздуха на метеостанциях Аравийского полуострове была разработана методика, в которой учитываются как зональные, так и азональные факторы и осуществляется выбор наиболее эффективной климатической модели. Для метеостанций Аравийского полуострова такой наиболее

эффективной моделью оказалась немецкая модель MPI. Установлены значения поправок в сценарные значения климатических характеристик при их приложении к конкретным метеостанциям, которые в сумме достигают 5-6°C. В результате были получены наиболее обоснованные будущие нормы температур до конца 21 века и установлено, что уже современные высокие летние температуры в среднем могут вырасти еще на 2°C, а зимние - на 1°C до конца этого столетия. Сценарные оценки осадков не рассматривались из-за их практической стационарности в настоящее время и большой неопределенности в выделении «климатического сигнала», связанной с высокой естественной изменчивостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
3. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 379 с.
4. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 365 с.
5. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистическая структура метеорологических полей и ее приложения. – В кн.: Современные фундаментальные и прикладные исследования ГГО, Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 142-150.
6. Н.Дрейпер, Г.Смит Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. – 392 с.
7. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. Климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
8. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений. – М.: Наука, 2006. – 173 с.
9. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. – 598 с.
10. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2013 году. WMO Bul. № 1130 Chair, Publications Board World Meteorological Organization (WMO) 7 bis, avenue de la Paix P.O. Box 2300 CH-1211 Geneva 2, Switzerland ISBN 978-92-63-41130-3, – 24 pp.
11. Информация о многолетних рядах среднемесячной температуры воздуха и сумм осадков за месяц // KNMI [Электронный ресурс] / The Royal Netherlands Meteorological Institute. – Амстердам, Нидерланды, 2010. – Режим доступа: http://www.knmi.nl/about_knmi/
12. Каган Р.Л. Характеристика статистической структуры метеорологических полей. – В кн.: Статистическая структура метеорологических полей. – Будапешт, 1976, с. 33-47.
13. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.
14. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций в задачах гидрометеорологии / Д. И. Казакевич. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 230 с.
15. Климатические данные // CDIAC [Электронный ресурс] / Carbon Dioxide Information Analysis Center/ – Washington, USA .– Режим доступа: http://cdiac.ornl.gov/by_new/bysubjec.html#climate
16. Кобышева Н.В., Наровлинский Г.Я. Климатологическая обработка метеорологической информации. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 295 с.
17. Лобанов, В.А., Анисимов, О.А., 2003 Современные изменения температуры воздуха на территории Европы. Метеорология и гидрология, № 2, с. 5–14.
18. В.А.Лобанов, Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха. Сборник работ по гидрологии, №27, 2004, С.-Петербург, Гидрометеиздат, с. 54-68.
19. В.А.Лобанов, Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. Метеорология и гидрология, №2, 2005, с. 5-14.

20. Лобанов В.А., И.А.Смирнов, А.Е.Шадурский. Практикум по климатологии. Часть 1. (учебное пособие). Санкт-Петербург, 2011. – 144 с.
21. 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.
22. Лобанов В.А., И.А. Смирнов, А.Е. Шадурский. Практикум по климатологии. Часть 2. (учебное пособие). Санкт-Петербург, 2012. – 141 с.
23. Лобанов В.А., Тощакова Г.Г. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области. Монография. ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», Кострома. 2013 – 171 с.
24. Лобанов В.А., А.Е.Шадурский Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. Санкт-Петербург, издание РГГМУ, 2013. – 164 с.
25. 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 СМРP5» Санкт-Петербург, издание РГГМУ, 2015 – 46 с.
26. Лобанов В.А., О.А.А. Шукри Оценка климатических изменений температуры воздуха и осадков на Аравийском полуострове. Ученые записки РГГМУ, 2015, № 37, с. 72-83.
27. В.А. Лобанов, Омар А.А. Шукри Моделирование пространственных климатических изменений на Аравийском полуострове. Ученые записки РГГМУ, 2015, №38, с. 152-162.
28. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб: изд. РГГМУ, 2008. – 408 с.
29. МГЭИК 2007: Изменение климата, 2007. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Пачаури Р.К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.)). МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с.
30. Определение основных расчетных гидрологических характеристик [Текст]: СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
31. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казанский государственный университет. 2009. – 503 с.
32. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока [Текст] / ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 78 с.
33. СНиП 23-01-99 Строительная климатология. М.: Госстрой России, 1999 – 74 с.
34. Шукри Омар А.А. Современные климатические изменения температуры воздуха и осадков в Йемене и прилегающих территориях // Ученые записки РГГМУ, 2011, с.86-94.
35. Шукри Омар Абдулхаки Али Климатические сценарии и их применимость для оценки будущих изменений климата на Аравийском полуострове// Ученые записки РГГМУ, 2013, №29, с.110-124.

36. About the WCRP CMIP5 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php.
37. Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia 6: 203–214. Kotwicki V, Al Sulaimani Z. 2009. Climates of the Arabian Peninsula – past, present, future. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 1: 297–310, DOI: 10.1108/17568690910977500.
38. About the WCRP CMIP3 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php
39. Abram, N. J., M. K. Gagan, J. E. Cole, W. S. Hantoro, and M. Mudelsee, 2008: Recent intensification of tropical climate variability in the Indian Ocean. *Nature Geosci.*, 1, 849–853.
40. Aikin J. E. Calculation of mean areal depth of precipitation. – *J. of Hydrol.*, 1971, vol. 2., № 4, p. 367–386.
41. Allan, R., and B. Soden, 2008: Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321, 1481–1484.
42. Almazroui M. 2006. *The Relationship Between Atmospheric Circulation Patterns and Surface Climatic Elements in Saudi Arabia*, PhD thesis, Climate Research Unit, University of East Anglia.
43. Almazroui M. 2012a. The life cycle of extreme rainfall events over western Saudi Arabia simulated by a regional climate model: case study of November 1996. *Atm 'osfera* 25: 23–41.
44. Almazroui M. 2012b. Temperature variability over Saudi Arabia during the period 1978–2010 and its association with global climate indices. *Journal of King Abdulaziz University: Met Env Arid Land Agric Sci.* 23(1), DOI: 10.4197/Met.23-1.6.
45. Alory, G., S. Wijffels, and G. Meyers, 2007: Observed temperature trends in the Indian Ocean over 1960–1999 and associated mechanisms. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02606
46. AlSarmi, S., and R. Washington, 2011: Recent observed climate change over the Arabian Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, D11109.
47. Alyamani MS, Sen A. 1993. Regional variations of monthly rainfall amounts in the Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of King Abdulaziz University: Earth Sciences* 6: 113–133.
48. Atmospheric Model Intercomparison Project <http://www-cmdi.llnl.gov/projects/amip/index>. M. Averyt K, Tignor M, Miller H (eds). Cambridge University Press: Cambridge, 996 pp.
49. Bal, S., S. Schimanke, T. Spanghel, and U. Cubasch, 2011: On the robustness of the solar cycle signal in the Pacific region. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L14809.
50. Barnes, E., J. Slingo, and T. Woollings, 2012: A methodology for the comparison of blocking climatologies across indices, models and climate scenarios. *Clim. Dyn.*, 38, 2467–2481.
51. Becker A., P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, K. Schamm, U. Schneider, and M. Ziese, 2013: A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth Syst. Sci. Data*, 5, 71–99.
52. Benestad, R. E., and G. A. Schmidt, 2009: Solar trends and global warming. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114, D14101.

53. Black E., J. Slingo, and K. Sperber 2003: An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal East Africa and Indian Ocean SST. *Mon. Weather Rev.*, 131, 74–94.
54. Chadwick, R., I. Boutle, and G. Martin, 2013: Spatial patterns of precipitation change in CMIP5: Why the rich don't get richer in the tropics. *J. Clim.*, 26, 3803–3822.
55. Chang E. K. M., Y. Guo, and X. Xia, 2012: CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, doi: 10.1029/2012jd018578.
56. Christensen J. H., et al., 2007: Regional climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 847–940.
57. Climate normals (ed. Omar Baddour) World Meteorological Organization CCI/MG/2011/Doc.10, Commission for climatology item 10, Management group meeting, Denver, USA, October 2011, 8pp.
58. Edgell HS. 2006. *Arabian Deserts: Nature, Origin and Evolution*. Springer: Dordrecht, The Netherlands.
59. Elagib N.A., Abdu A.S.A. 2009. Development of temperature in the Kingdom of Bahrain from 1947 to 2005. *Theoretical and Applied Climatology* 101: 269–279, DOI: 10.1007/s00704-009-0205-y.
60. El Gindy A. A. H. (1994), Seasonal and long-term changes of air and sea surface temperature and impact of the Gulf War in the Arabian Gulf and Gulf of Oman, *Fresenius Environ. Bull.*, 3(8), 481–486.
61. El-Sabbagh M.K., 1982. On the climate of Saudi Arabia. *Bulletin of Faculty of Science, King Climatology* 25: 693–712, DOI: 10.1002/joc.1181.
62. Elsner J. B., J. P. Kossin, and T. H. Jagger, 2008: The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455, 92–95.
63. Endo H., A. Kitoh, T. Ose, R. Mizuta, and S. Kusunoki, 2012: Future changes and uncertainties in Asian precipitation simulated by multiphysics and multi-sea surface temperature ensemble experiments with high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric general circulation models (MRI-AGCMs). *J. Geophys. Res.*, 117, D16118.
64. Evan A. T., J. P. Kossin, C. E. Chung, and V. Ramanathan, 2011: Arabian Sea tropical cyclones intensified by emissions of black carbon and other aerosols. *Nature*, 479, 94–97.
65. Evans J. P., 2009: 21st century climate change in the Middle East. *Clim. Change*, 92, 417–432.
66. Feliks Y., M. Ghil, and A. W. Robertson, 2010: Oscillatory climate modes in the eastern Mediterranean and their synchronization with the North Atlantic Oscillation. *J. Clim.*, 23, 4060–4079.
67. Folland C. K., et al., 2013 High predictive skill of global surface temperature a year ahead. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 761–767.
68. Gates W.L., 1992: AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, pp.1962-1970.

69. Ghoneim, Eman. 2009. "Remote Sensing Study of Some Impacts of Global Warming on the Arab Region" in Tolba, Mostafa and Najib Saab, eds. "Arab Environment: Climate Change." 2009 Report of the Arab Forum for Environment and Development. Highlights available online at http://www.iaea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2143
70. Gillett N. P., V. K. Arora, D. Matthews, P. A. Stott, and M. R. Allen, 2013 Constraining the ratio of global warming to cumulative CO₂ emissions using CMIP5 simulations. *J. Clim.*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00476.1.
71. Gregory J. M., and P. M. Forster, 2008: Transient climate response estimated from radiative forcing and observed temperature change. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113, D23105.
72. Gutowski W. J. et al., 2010: Regional, extreme monthly precipitation simulated by NARCCAP RCMs. *J. Hydrometeorol.*, 11, 1373–1379.
73. Haam E., and K. K. Tung, 2012: Statistics of solar cycle-La Nina connection: Correlation of two autocorrelated time series. *J. Atmos. Sci.*, 69 2934–2939.
74. Han W., et al., 2010: Patterns of Indian Ocean sea-level change in a warming climate. *Nature Geosci.*, 3, 546–550.
75. Hansen J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, and M. Medina-Elizade, 2006: Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 14288–14293.
76. Hegerl G. C., F. W. Zwiers, P. A. Stott, and V. V. Kharin, 2004: Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes. *J. Clim.*, 17, 3683–3700.
77. Hoerling M. P., J. K. Eischeid, X.-W. Quan, H. F. Diaz, R. S. Webb, R. M. Dole, and D. R. Easterling, 2012: Is a transition to semipermanent drought conditions imminent in the U.S. great plains? *J. Clim.*, 25, 8380–8386.
78. Hoerling M., et al., 2013: Anatomy of an extreme event. *J. Clim.*, 26, 2811–2832.
79. Hood L. L., and R. E. Soukharev, 2012: The lower-stratospheric response to 11-yr solar forcing: Coupling to the troposphere-ocean response. *J. Atmos. Sci.*, 69, 1841–1864.
80. Hu Z. Z., 1997: Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102, 19403–19412.
81. Hurrell J. W., and C. Deser, 2009: North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *J. Mar. Syst.*, 78, 28–41.
82. Imbers J., A. Lopez, C. Huntingford, and M. R. Allen, 2013: Testing the robustness of the anthropogenic climate change detection statements using different empirical models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, doi:10.1002/jgrd.50296.
83. Ingram W. J., 2007: Detection and attribution of climate change, and understanding solar influence on climate. In: *Solar Variability and Planetary Climates* [Y. Calisesei, R.-M. Bonnet, L. Gray, J. Langen, and M. Lockwood (eds.)]. Springer Science+Business Media, New York, NY, USA, and Heidelberg, Germany, pp. 199–211.
84. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change: the scientific basis. In *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK, 944.

85. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2007. The physical science basis. In *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis.
86. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change). 2013. The physical science basis. In *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press: Cambridge, p 1552.
87. IPCC, 2013: Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
88. IPCC Standard Output from Coupled Ocean-Atmosphere GCMs: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html#Experiments.
89. Izumo, T., C. D. Montegut, J. J. Luo, S. K. Behera, S. Masson, and T. Yamagata, 2008: The role of the western Arabian Sea upwelling in Indian monsoon rainfall variability. *J. Clim.*, 21, 5603–5623.
90. Jevrejeva S., J. C. Moore, et al. 2010. “How will sea level rise correspond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100?” *Geophysical Research Letters* 37.
91. Jones G. S., and P. A. Stott, 2011: Sensitivity of the attribution of near surface temperature warming to the choice of observational dataset. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21702.
92. Jones G. S., M. Lockwood, and P. A. Stott, 2012: What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near surface temperature changes ? *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D05103.
93. Kaufmann R. K., H. Kauppi, and J. H. Stock, 2006: Emission, concentrations, & temperature: A time series analysis. *Clim. Change*, 77, 249–278.
94. Kaufmann R. K., H. Kauppi, M. L. Mann, and J. H. Stock, 2011: Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 108, 11790–11793.
95. Kaufmann R. K., H. Kauppi, M. L. Mann, and J. H. Stock, 2013: Does temperature contain a stochastic trend: Linking statistical results to physical mechanisms. *Clim. Change*, doi:10.1007/s10584–012–0683–2.
96. Kidson J.W. Index cycles in the Northern Hemisphere during Global Weather Experiment.- *Month. Wea. Redv.*, vol. 113, 1985, p.607-623.
97. Kim D., and H. Byun, 2009: Future pattern of Asian drought under global warming scenario. *Theor. Appl. Climatol.*, 98, 137–150.
98. Kwarteng A. Y., A. S. Dorvlo, and G. T. V. Kumar (2009), Analysis of a 27-year rainfall data (1977–2003) in the Sultanate of Oman, *Int. J. Climatol.*, 29(4), 605–617, doi:10.1002/joc.1727.

99. Landsea C. W., R. A. Pielke, A. Mestas-Nunez, and J. A. Knaff, 1999: Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes. *Clim. Change*, 42, 89–129.
100. Lean J. L., 2006: Comment on “Estimated solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite composite” by N. Scafetta and B. J. West. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15701.
101. Lean J. L., and D. H. Rind, 2008: How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18701.
102. Lean J. L., and D. H. Rind, 2009: How will Earth’s surface temperature change in future decades? *Geophys. Res.*, L15708.
103. Levine R. C., and A. G. Turner, 2012 *Lett.*, 36: Dependence of Indian monsoon rainfall on moisture fluxes across the Arabian Sea and the impact of coupled model sea surface temperature biases. *Clim. Dyn.*, 38, 2167–2190.
104. Lockwood M., and C. Fröhlich, 2007: Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature *Proc. R. Soc. London A*, 463, 2447–2460.
105. Lockwood M., and C. Fröhlich, 2008: Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature: II. Different reconstructions of the total solar irradiance variation and dependence on response time scale. *Proc. R. Soc. London A*, 464, 1367–1385.
106. Lockwood M., 2008: Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise. *Proc. R. Soc. London A*, 464, 1387–1404.
107. Lockwood M., 2012: Solar influence on global and regional climates. *Surv. Geophys.*, 33, 503–534.
108. van Loon H., G. A. Meehl, and D. J. Shea, 2007: Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D02108.
109. van Loon, H., and G. A. Meehl, 2008: The response in the Pacific to the sun’s decadal peaks and contrasts to cold events in the Southern Oscillation. *J. Atmos. Sol. Terres. Phys.*, 70 1046–1055
110. Mansour Almazroui a M. Nazrul Islam, a H. Athar, a P. D. Jonesa, b and M. Ashfaqur Rahmana 2012 Recent climate change in the Arabian Peninsula: annual rainfall and temperature analysis of Saudi Arabia for 1978–2009 *International Journal of Climatology Int. J. Climatol.* 32: 953–966.
111. Marchant R., C. Mumbi, S. Behera, and T. Yamagata, 2007: The Indian Ocean dipole — the unsung driver of climatic variability in East Africa. *Afr. J. Ecol.*, 45, 4–16.
112. Meehl G. A., J. M. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi, and H. van Loon, 2009: Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-747year solar cycle forcing. *Science*, 325 1114–1118.
113. Min S.-K., and A. Hense, 2006: A Bayesian assessment of climate change using multimodel ensembles. Part I: Global mean surface temperature. *J. Clim.*, 19, 3237–3256.
114. Min S.-K., X. Zhang, F. W. Zwiers, P. Friederichs, and A. Hense, 2008c: Signal detectability in extreme precipitation changes assessed from twentieth century climate simulations. *Clim. Dyn.*, 32, 95–111.

115. Misios S., and H. Schmidt, 2012: Mechanisms involved in the amplification of the 11-yr solar cycle signal in the Tropical Pacific ocean. *J. Clim.*, 25, 5102–5118.
116. Mitchell T.D, Jones P.D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated highresolution grids. *International Journal of Journal of Climatology Int. J. Climatol.* 12: 122–136.
117. Nasrallah H.A., Balling R.C.Jr. 1996. Analysis of recent climatic changes in the Arabian Peninsula region. *Theoretical and Applied Climatology* 53: 245–252.
118. Nasrallah, H. A., E. Nieplova, and E. Ramadan (2004), Warm season extreme temperature events in Kuwait, *J. Arid Environ.*, 56(2), 357–371, doi:10.1016/S0140-1963(03)00007-7.
119. Onol B., and F. Semazzi, 2009: Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean. *J. Clim.*, 22, 1944–1961.
120. Peterson T. C., et al. (1998), Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review, *Int. J. Climatol.*, 18(13), 1493–1517, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19981115)18:13<1493::AID-JOC329>3.0.CO;2-T.
121. Roy, I., and J. D. Haigh, 2010: Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. *Atmos. Chem. Phys.*, 10 3147–3153.
122. Said AlSarmi1 and R. Washington (2011) Recent observed climate change over the Arabian Peninsula *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, D11109, doi:10.1029/2010JD015459, 2011
123. Scaife A., et al., 2009: The CLIVAR C20C project: Selected twentieth century climate events. *Clim. Dyn.*, 33, 603–614.
124. Sen P. K. (1968), Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, 63(324), 1379–1389, doi:10.2307/2285891.
125. Sowers J., A. Vengosh, and E. Weinthal. 2009. "Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa." *Climatic Change* (published online 23 April 2010).
126. J. Sowers and E. Weinthal. 2010. *Climate Change Adaptation in the Middle East and North Africa: Challenges and Opportunities*. Belfer Center for Science and International Affairs Harvard Kennedy School 79 JFK St., Cambridge, MA 02138 USA 21 pp.
127. Sun J., H. Wang, and W. Yuan, 2008: Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113, D15107.
128. Taylor K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2011c: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
128. Taylor K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012b: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
129. Thiessen A.H. Precipitation averages for large areas. – *Mon. Wea. Rev.*, 1911, vol. 39, № 7, p. 1082-1084.
130. Tolba M. K. and N. W. Saab. 2009. "Arab Environment: Climate Change." Beirut, Arab Forum for Environment and Development.
131. Trewin B (2007): The role of climatological normals in a changing climate. *World Climate Data and Monitoring Program No 61, WMO-TD No 1377*. – 46pp.
132. Tung K.-K., and J. Zhou, 2010: The Pacific's response to surface heating in 130 yr of SST: La Nina-like or El Nino-like? *J. Atmos. Sci.*, 67, 2649–2657.

133. UNDP. 2007. *Human Development Report 2007/2008, Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World*. New York: UNDP.
134. Wang X. L. (2008), Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(9), 2423–2444, doi:10.1175/2008JAMC1741.1
135. Wang B., S. Xu, and L. Wu, 2012: Intensified Arabian Sea tropical storms. *Nature*, 489, E1–E2.
136. The WCRP CMIP3 Multimodel dataset – A new era in Climate change research. 12 pp http://nldr.library.ucar.edu/repository/assets/ams-pubs/ams_pubs_200083.pdf
137. White W. B., and Z. Y. Liu, 2008: Non-linear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19607.
138. Zhang H. et al. 2005. “Trends in Middle East Climate Indices from 1950 to 2003.” *Journal of Geophysical Research* 110 (D22104): 1-12.
139. Zhang X., et al., 2005: Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 110, doi: 10.1029/2005JD006181.
140. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
141. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html
142. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html – Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел «Доступ к данным».

Научное издание

Омар Абдулхаким Али Шукри

Владимир Алексеевич Лобанов

Мохаммед Саид Хамид

СОВРЕМЕННЫЙ И БУДУЩИЙ КЛИМАТ АРАВИЙСКОГО
ПОЛУОСТРОВА

Монография

Публикуется в авторской редакции.

Ответственность за соблюдение законов

об интеллектуальной собственности несет автор.

Подписано в печать 19.02.18. Формат 60×90 1/16.

Гарнитура Times New Roman.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,87. Тираж 70 экз. Заказ № 645/2.

РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.