

Шукри Омар Абдулхаким Али

**СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В ЙЕМЕНЕ
И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ**

O.A. Sukri

**MODERN CLIMATE CHANGES IN AIR TEMPERATURE
AND PRECIPITATION IN YEMEN AND NEIGHBORING AREAS**

Рассматривается проявление современных климатических изменений в многолетних рядах среднемесячной температуры воздуха и сумм месячных осадков на 59 метеостанциях Йемена, Саудовской Аравии, Омана и Сомали. Сформированы региональные базы данных, осуществлена оценка однородности информации и ее приведение к многолетнему периоду. На основе моделей стационарной выборки, тренда и ступенчатых изменений установлены пространственно-временные закономерности климатических изменений и дана оценка их статистической значимости.

Ключевые слова: изменение климата, Йемен, Аравийский полуостров, температура воздуха и осадки, оценка однородности, модели временных рядов, пространственно-временные закономерности.

A modern climate change in long-term series of monthly air temperatures and amounts of monthly precipitation at 59 meteorological stations of Yemen, Saudi Arabia, Oman and Somalia is considered. Regional databases are formed. Uniformity of information is assessed and data has been converted to long-term period. Based on models of stationary sampling, trend and step changes are set spatio-temporal patterns of climate change and assesses their statistical significance.

Key words: climate change, Yemen, Arabian Peninsula, air temperature and precipitation, the assessment of homogeneity, time series models, spatial-temporal patterns.

Проблема современного изменения климата является одной из главных проблем человечества. Изменение климата приобретает в настоящее время большое практическое значение, которого оно еще недавно не имело. Установлено, что хозяйственная деятельность человека начала оказывать влияние на глобальные климатические условия, причем это влияние быстро возрастает [2, 9].

Международные климатические исследования свидетельствуют об относительно существенном летнем потеплении в странах Аравийского полуострова и Центральной Азии. Ожидаемые засухи в большей степени будут обусловлены сокращением осадков, особенно летних, чем повышением температуры. В то же время по некоторым сценариям ожидаются более влажные климатические условия в Саудовской Аравии. Поэтому будущие климатические условия на Аравийском полуострове во многом зависят от принимаемого сценария и используемых моделей, и их результаты существенно различаются [1, 5, 7, 12]. В связи с этим необходим анализ существующей климатической ситуации в регионе на

основе данных инструментальных наблюдений, что и является целью настоящей статьи.

Прежде всего была сформирована база данных среднемесячных температур воздуха за многолетний период по 41 метеостанции с учетом последних лет наблюдений до 2009 г. включительно по отдельным станциям и база месячных сумм осадков по 59 метеостанциям на территории Аравийского полуострова и Сомали. В связи с тем, что в Йемене находятся всего 4 пункта наблюдений, для регионального анализа температур воздуха и осадков были дополнительно выбраны метеостанции на территории сопредельных государств: Саудовской Аравии, Омана, Сомали. Несмотря на достаточно большое число станций, ряды наблюдений в большинстве случаев были непродолжительны и в среднем составляли 25–30 лет.

Расположение выбранных метеостанций показано на рис. 1. На этом рисунке метеостанции с наблюдениями за температурой воздуха представлены в виде красных точек, а метеостанции с наблюдениями за осадками – в виде больших синих окружностей. Если на одной станции проводятся наблюдения и за температурой воздуха и осадками, то она на карте представлена двумя обозначениями: красной точкой внутри синей окружности.

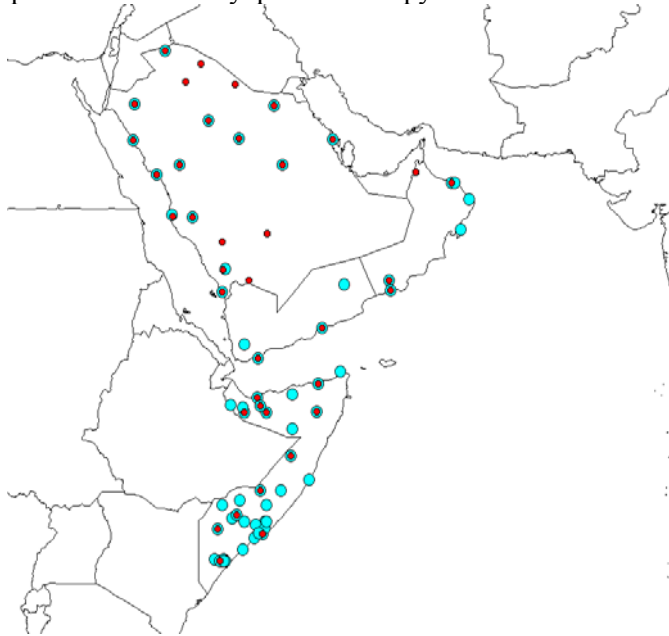


Рис. 1. Расположение выбранных метеостанций на территории Йемена и сопредельных государств с наблюдениями за температурой воздуха (красные точки) и осадками (синие окружности)

Информация о числе станций на территории каждого государства, с разделением станций по наблюдениям за температурой воздуха и осадками, приведена в табл. 1.

Число станций на территории разных государств

Страна	Количество станций		
	общее	с температурой	с осадками
Йемен	4	2	4
Саудовская Аравия	22	22	16
Оман	6	5	6
Сомали	34	12	34

Для получения информации о температуре воздуха и осадках, включая последние годы наблюдений до 2009 г., был использован сайт Вашингтонского климатического центра [8] и сайт Королевского метеорологического института Нидерландов [6]. На сайте метеорологического института Нидерландов имеется автоматизированная поисковая система, позволяющая задать вид информации (в данном случае заданы месячные метеорологические данные) и выбрать район по заданным координатам узлов прямоугольника.

На следующем шаге исследований многолетняя информация по каждой станции была скопирована в общий файл формата Excel. Причем отдельно был получен файл с многолетней информацией за температурой воздуха по всем станциям и отдельный файл с информацией о многолетних рядах осадков. Затем оба файла были экспортированы в программный комплекс «Гидрорасчеты», в котором сформированы две региональные базы данных отдельно по температурам воздуха и осадкам. В базах данных средняя продолжительность рядов наблюдений за температурой воздуха составляет 55 лет для метеостанций на территории Йемена, 30 лет для станций Саудовской Аравии, 36 лет для станций Омана и 29 лет для Сомали. Средняя продолжительность рядов наблюдений за осадками составляет 42 года для метеостанций на территории Йемена, 30 лет для станций Саудовской Аравии, 54 года для станций Омана и 36 лет для Сомали.

Прежде всего, был проведен анализ однородности эмпирических распределений и стационарности параметров исходных рядов наблюдений по статистическим критериям Диксона и Смирнова–Граббса для оценки однородности эмпирических распределений и критериев Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних за два последовательных интервала времени [4, 11].

В результате получено, что эмпирические распределения температур воздуха, в основном, однородны, а в распределениях осадков имеют место неоднородные максимумы (в 11 % случаев), что связано с их большой многолетней изменчивостью (от отсутствия осадков до несколько сот мм за месяц) и ограниченным рядом наблюдений. Пример распределения с неоднородным максимумом показан на рис. 2.

Средние значения и дисперсии также, в основном, стационарны, а выявленные случаи нестационарности для дисперсий в рядах осадков обусловлены влиянием экстремальных событий. Пример нестационарного многолетнего ряда сумм месячных осадков приведен на рис. 3.

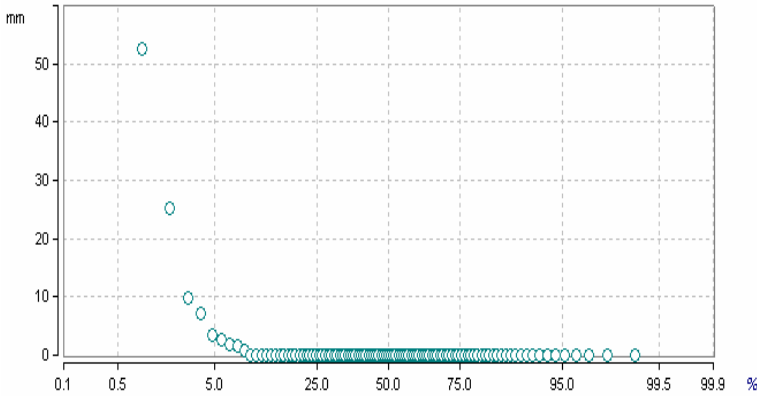


Рис. 2. Эмпирическое распределение осадков с неоднородным максимумом (метеостанция Сиб)

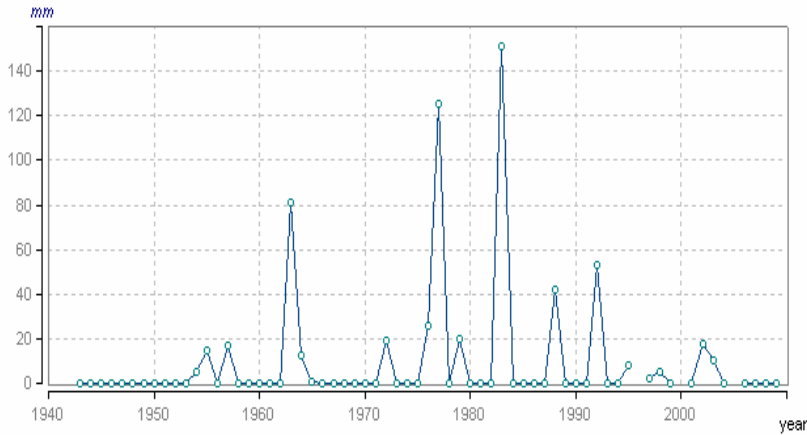


Рис. 3. Многолетний ряд осадков с нестационарной дисперсией (Салала, апрель)

В связи с тем, что продолжительность большинства рядов наблюдений была недостаточна для оценки многолетних изменений климата и составляла менее 40–30 лет, было осуществлено приведение рядов к многолетнему периоду и восстановление пропусков наблюдений. Приведение к многолетнему периоду осуществлялось на основе методики построения регрессионных уравнений связи между рассматриваемым рядом и рядами-аналогами [3, 10]. При этом в качестве предполагаемых рядов-аналогов принимались все остальные пункты наблюдений района.

В уравнении множественной линейной регрессии, по которому осуществлялось восстановление, задавались предельные минимальные значения коэффициентов множественной корреляции, равные $R = 0,8$, для температуры воздуха и $R = 0,7$ для осадков. В качестве показателей оценки эффективности восстановления приняты:

– количество восстановленных лет [абсолютное Δn и относительное $\Delta n'(\%) = (N - n)/n \cdot 100 \%$];

– отношение дисперсии восстановленных значений к дисперсии наблюдаемых значений (критерий Фишера), характеризующий однородность восстановления;

– критерий Стьюдента для оценки однородности среднего восстановленных значений по отношению к среднему наблюдаемых данных.

В результате применения процедуры приведения к многолетнему периоду были восстановлены также и пропуски наблюдений, и в среднем продолжительность рядов для температуры воздуха удалось увеличить в 2 раза с 25–27 до 44–58 лет в зависимости от рассматриваемого месяца. Продолжительность рядов наблюдений за осадками также была увеличена более чем в 2 раза и составила в среднем 51 год (при вариации от 31 до 59 лет) вместо 24 лет для исходных данных. Однако, несмотря на достаточно эффективные результаты приведения к многолетнему периоду, продолжительности рядов наблюдений во многих случаях (особенно для осадков) все-таки были недостаточны для оценки долгопериодных климатических изменений.

На завершающей стадии исследования была осуществлена оценка вида модели временного ряда. К модели временных рядов рассматриваемых климатических характеристик применимы три возможные интерпретации:

– стационарный временной ряд;

– монотонные изменения в виде линейного тренда;

– ступенчатые переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти три альтернативные модели были применены к временным рядам температур воздуха и осадков на территории Йемена и прилегающих государств.

Выбор наиболее эффективной модели аппроксимации временного ряда осуществлялся на основе сравнения остаточных дисперсий или стандартных отклонений относительно рассматриваемой модели. Так, для модели стационарной выборки остаточная дисперсия (или стандартное отклонение) представляет собой дисперсию или среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений, приведенного к многолетнему периоду. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков вычисляется по формуле:

$$\sigma_e = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (1)$$

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

Для модели ступенчатых изменений стандарт остатков вычисляется по информации за два интервала времени и по формуле:

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

где $\sigma_{\text{ступ}}$ – стандартное отклонение остатков относительно модели ступенчатых изменений; σ_1, σ_2 – стандартные отклонения двух отрезков временного ряда, на которые разбивается ряд наблюдений по дате ступенчатых изменений; n_1, n_2 – объемы двух частей ряда наблюдений в годах.

Для количественной оценки отличий модели тренда и ступенчатых изменений от модели стационарного среднего были рассчитаны относительные погрешности по формулам:

$$\Delta_{\text{тр}} = \left(\frac{\bar{b}y - \bar{b}\varepsilon}{\bar{b}y} \right) \cdot 100\%; \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{ступ}} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{\text{ступ}}}{\sigma_y} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{тр}}, \Delta_{\text{ступ}}$ – относительные погрешности или отличия (в %) модели тренда и ступенчатых изменений от модели стационарной выборки.

Для оценки статистической значимости как монотонных, так и ступенчатых изменений во временных рядах был применен критерий Фишера, статистики которого вычислялись по формулам:

$$F_{\text{тр}} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_\varepsilon^2}; \quad (5)$$

$$F_{\text{ступ}} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{\text{ступ}}^2}. \quad (6)$$

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) эффективнее, чем модель стационарной выборки.

Для оценки региональных климатических изменений температуры рассматривались многолетние ряды среднемесячных температур воздуха, приведенные к многолетнему периоду, продолжительностью не менее 50 лет за каждый месяц календарного года, а по осадкам – не менее 40 лет наблюдений.

Пример результата расчетов приведен в табл. 2, где представлены основные характеристики эффективности моделей в виде стандартных отклонений остатков ($\sigma_y, \sigma_\varepsilon, \sigma_{\text{ступ}}$), относительных отклонений от стационарной модели ($\Delta_{\text{тр}} \%, \Delta_{\text{ступ}} \%$) и расчетные значения критериев Фишера ($F_{\text{тр}}, F_{\text{ступ}}$).

Пример нестационарного ряда температур воздуха для метеостанции Медина за сентябрь приведен на рис. 4.

Оценка эффективности аппроксимации временного ряда среднемесячных температур февраля разными моделями (стационарная, тренд, ступенчатая)

Станция	n	σ_{γ}	σ_{ϵ}	$\sigma_{\text{ступ}}$	$\Delta_{\text{тр}}, \%$	$\Delta_{\text{ступ}}, \%$	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ступ}}$
Аден	78	0,82	0,80	0,81	2,4	1,2	1,05	1,00
Ар-Раян	74	0,92	0,89	0,82	3,2	10,8	1,07	1,26
Салала	66	1,15	1,08	1,10	6,4	4,3	1,13	1,09
Тумрайт	59	1,40	1,21	1,26	13,5	10	1,34	1,23
Джизан	58	0,75	0,70	0,70	6,7	6,7	1,15	1,15
Наджран	57	3,23	3,21	3,23	0,6	0	1,01	1,00
Эс-Сулайиль	54	2,29	2,24	2,29	2,18	0	1,04	1,00
Абха	57	0,77	0,77	0,77	1,30	0	1,00	1,00
Джидда	65	1,76	1,74	1,76	1,13	0	1,02	1,00
Эр-Рияд	61	1,56	1,55	1,56	0,64	0	1,01	1,00
Басасо	72	2,39	2,34	2,39	2,1	0	1,04	1,00
Сиб	63	1,01	0,94	0,97	7,0	4,0	1,15	1,08
Бурайми	65	1,11	1,08	1,11	2,70	0,92	1,06	1,00
Медина	60	2,11	2,09	2,11	0,94	0	1,02	1,00
Гассим	62	1,91	1,90	1,91	0,52	0	1,01	1,00

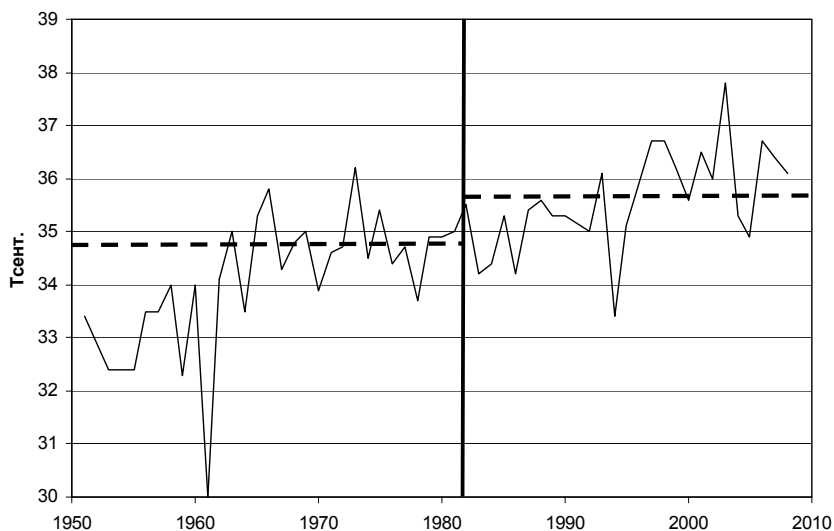


Рис. 4. Среднемесячная температура сентября на метеостанции Медина и аппроксимация ряда моделью ступенчатых изменений

Для температуры воздуха при анализе за все месяцы года в результате получено, что модель ступенчатых изменений несколько лучше, чем модель тренда, но совсем незначительного. Несмотря на то, что статистически значимых отличий от стационарной модели всего 4 случая, можно считать, что установленные отличия, начиная от 10 %, уже представляют интерес для мониторинга климата. Таких отличий выявлено 24–26 % в зависимости от применения модели тренда или ступенчатых изменений.

Если рассматривать эти отличия от стационарной модели по территории и за каждый месяц, то можно сделать вывод, что летом с июня по сентябрь отличий от стационарной модели в районе Йемена не наблюдается, а выявленные различия имеют место на станциях Саудовской Аравии. В то же время в другие месяцы года (более холодный период) отличия от стационарной модели имеют место на территории Йемена и ближайших метеостанциях прилегающих государств, особенно в апреле–мае и октябре. Пример пространственного распределения $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{стун}$ для апреля показан на рис. 5.

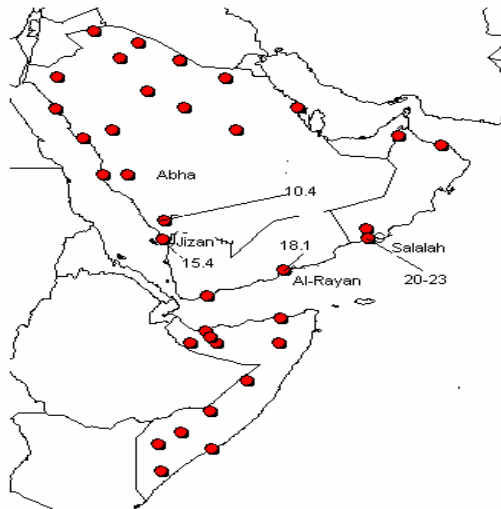


Рис. 5. Значения $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{стун} \geq 10\%$ для апреля

При данном недостаточном объеме имеющейся информации за суммами месячных осадков можно лишь сделать вывод об отсутствии как статистически значимых, так и существенных (10 % и более) отличий от модели стационарной выборки или об отсутствии климатических изменений в рядах осадков на рассматриваемой территории.

Суммируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Несмотря на то, что была собрана вся возможная информация в регионе (41-59 станций), средняя продолжительность рядов наблюдений составляла всего 25-30 лет.

2. В результате приведения к многолетнему периоду средняя продолжительность рядов была увеличена до 44–58 лет.

3. Для оценки долгопериодных изменений климата выбрано 105 рядов температур (из 492) при $n \geq 50$ лет и 46 рядов осадков (из 696) при $n \geq 40$ с учетом последних лет наблюдений до 2007–2009 гг.

4. Для температур воздуха статистическое значимое отличие от стационарной модели установлено всего для 4 рядов ($\Delta \geq 25\%$) и еще для 32 рядов $\Delta = 10\text{--}25\%$ при этом, в основном, имел место рост температуры.

5. Эффективность нестационарных моделей тренда и ступенчатых изменений была практически одинакова.

6. Для осадков из-за их существенной вариации и малой продолжительности рядов статистически значимых отличий от стационарной модели не установлено. Только в одном случае $\Delta = 17\%$ (Аден).

Литература

1. *Аль Модабеш Али Мохаммед Абдалла*. Исследование возможности получения электроэнергии на основе экологически безопасных технологий в районе Аравийского полуострова с учетом климатических и природных условий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2005. – 135 с.
2. *Будыко М.И.* Современное изменение климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1977.
3. *Дрейнер Н.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 92 с.
4. *Закс Л.* Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
5. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой : от палеоцена до голоцена) / Под ред. проф. А.А. Величко. – М.: ГЕОС, 1999. – 260 с.
6. 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/
7. Климатические данные // Svali.ru [Электронный ресурс]. – Туристский портал /Данио-Пресс.– М., 2010.–Режим доступа: <http://www.svali.ru/climat/100000/41480/index.htm>
8. Климатические данные // CDIAC [Электронный ресурс] / Carbon Dioxide Information Analysis Center/–Washington, USA. – Режим доступа: http://cdiac.ornl.gov/by_new/bysubject.html#climate.
9. *Мякишева Н.В.* Климатическая система земли. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 95 с.
10. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 3 с.
11. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 78 с.
12. *Робин К.* Обзор глобальной экологической перспективы: Западная Азия // Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. – Найроби, Кения: ГЭП ЮНЕП, 2000, с. 160–167.