

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи  
УДК [551.577:551.509.314] (676/679)

Нгонголо Хашим Карим

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДКОВ В ТРОПИКАХ  
ПО ДАННЫМ О ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА И  
КВАЗИДВУХЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЯХ ЗОНАЛЬНОГО ПОТОКА НА  
ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук,  
Смышляев Сергей Павлович.

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук,  
Биненко Виктор Иванович  
Кандидат физико-математических наук  
Куликова Лидия Александровна

**Ведущая организация:**

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ)

Защита диссертации состоится 24 февраля 2011 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного Совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: **195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, дом 98.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан 22 января 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.197.01

Доктор географических наук, профессор

  
А.И. Угрюмов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

***Актуальность работы.*** Формирование осадков в любой части земли, определяется направлением и интенсивностью воздушных переносов, степенью увлажнения и стратификацией воздушных масс и особенностями региональных физико-географических условий. Экономика в большинстве тропических стран зависит от сельскохозяйственной деятельности и водных ресурсов, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от количества выпадающих осадков. Таким образом, лучшее понимание причин изменчивости и предсказуемости режима осадков над населенными районами является задачей первостепенной важности. Изменчивость осадков воздействует на ряд социально-экономических секторов: сельское хозяйство, гидроэнергетику, водные ресурсы, здоровье человека, транспорт, коммуникации и другие. Проблема прогноза осадков является особенно актуальной для многих тропических стран. Так, в частности, для региона Восточной Африки улучшение качества прогноза будет способствовать социально-экономическому планированию в целях смягчения последствий изменения климата.

Из всех характеристик погоды и климата важнейшее значение имеют атмосферные осадки, так как экстремальная изменчивость годовых, сезонных и месячных осадков, продолжительные неперiodические засухи, нередко приобретающие характер экологических катастроф, приводят к серьезным экономическим проблемам. Хотя другие элементы климата также меняются, однако наиболее изменчивым климатическим элементом во времени и пространстве являются осадки. В этой связи одной из актуальных задач тропической метеорологии является разработка и усовершенствование метода прогнозирования осадков в целях смягчения последствий изменения климата. С этих позиций межгодовая изменчивость осадков является объектом исследований, и прогноз осадков является самой актуальной проблемой современной климатологии не только тропических метеорологов, но и мировой метеорологической науки. Даже частичное решение проблемы имеет большую научную и практическую ценность, особенно при планировании работ в сельском хозяйстве, на водном и железнодорожном транспорте, в строительстве и других отраслях хозяйственной деятельности.

В ряду методов прогнозирования осадков, одним из основных является статистический метод с использованием физической взаимосвязи между предикторами и предиктантом. При этом одной из важнейших задач статистического метода является долгосрочный прогноз сезона осадков. Очевидно, чем выше точность прогнозирования и чем больше период упреждения, тем большую ценность представляют результаты прогнозирования для принятия различных решений. В связи с этим и требования к методам прогнозирования должны быть достаточно высокими. Для решения актуальной проблемы прогноза осадков в тропиках в настоящей работе предлагается статистические методы с использованием данных о температуре поверхности океана и квазидвухлетних колебаниях зонального потока как предикторов. Для тестирования метода долгосрочных сезон прогнозов осадков предлагается ряд критериев, используемых в метеорологической практике.

**Целью диссертационной работы** является разработка и усовершенствование метода прогнозирования осадков в тропиках по данным о температуре поверхности океана (ТПО) и квазидвухлетнем цикле (КДЦ) колебаний зонального потока стратосферного ветра на примере Восточной Африки.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Математико-статистический анализ временных рядов полей месячных сумм осадков (предиктант) с целью выявления их особенностей, а также деления исследуемого региона на однородные климатические зоны.
2. Описание полей предикторов ТПО методом эмпирических ортогональных функции (ЭОФ) для выделения главных компонентов (РСs);
3. Построение модели прогнозирования осадков по каждой из однородных климатических зон;
4. Оценка качества прогноза осадков по каждой однородной климатической зоне с помощью ряда критериев, используемых в метеорологической практике;
5. Расчет статистических связей между сезонными осадками с марта по май (МAM) и КДЦ стратосферного зонального ветра с целью создания методов прогнозирования осадков над исследуемым районом.

**Методы исследования.** Для достижения целей исследования и решения поставленных задач использовались: (1) множественный линейный регрессионный анализ для создания эмпирической прогностической модели сезонной изменчивости осадков в тропиках по данным о температуре поверхности океана как предикторе. Сначала используется метод ЭОФ для уменьшения большой размерности набора данных, а также для устранения мультиколлинеарности предикторов и сохранения временного ряда главных компонент. Метод ЭОФ также был применен для качества контроля данных сезонных сумм осадков, что позволило разделить сеть метеостанций Восточной Африки на однородные климатические зоны;

(2) корреляционный и композитный анализ связей КДЦ/осадки - для исследования связей между сезонными осадками с марта по май над Восточной Африкой и КДЦ стратосферного зонального ветра, а также прогностического потенциала количества осадков в сезон продолжительных дождей (ММ) с использованием информации о фазах КДЦ.

#### **Научная новизна**

- Впервые для всей территории Восточной Африки осуществляется разработка статистического метода прогноза сезонных осадков с помощью главных компонент предикторов во множественной линейной регрессии (МЛР). Полученные результаты дают основание предполагать, что разработанный статистический метод прогноза сезонных осадков может быть использован при составлении оперативных прогнозов для территории Восточной Африки. Кроме того, его также можно использовать для прогноза других метеорологических параметров;
- Обнаружено, что процессы, ответственные за формирование осадков и протекающие в период кратковременных дождей с октября по декабрь, мощнее по выборочной дисперсии, чем протекающие в период продолжительных дождей с марта по май;
- Обнаружено, что связь между количеством осадков в сезон дождей в марте-мае и фазами явления Эль-Ниньо относится к ограниченному числу лет; при этом, если феномен Эль-Ниньо происходит, то связь между КДЦ-индексом и количеством осадков в сезон дождей всегда обнаруживается;

- Найдено, что количество осадков выше/ниже нормы в период продолжительных дождей с марта по май над Восточной Африкой связано с западной/восточной фазами стратосферного зонального ветра.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Уточненный статистический метод прогнозирования количества осадков в тропическом регионе.
2. Метод классификации климатологических регионов на основе данных о режиме осадков с целью долгосрочного прогноза сезонных сумм осадков в тропиках.
3. Результаты анализа данных о температуре поверхности океана для статистического прогноза количества осадков в Восточной Африке.
4. Результаты анализа связей между временным рядом количества осадков в сезон дождей с марта по май и фазах квазидвухлетних колебаний стратосферного зонального ветра, а также метод использования выявленных зависимостей для прогноза количества осадков.

### **Личный вклад автора**

Все положения, выносимые на защиту, основаны на результатах исследований, проведённых непосредственно и лично автором. В публикациях, содержащих основные результаты диссертационной работы, автору принадлежат идеи исследования, формулировка проблем, постановка задач и интерпретация полученных результатов. Выбор подходов к решению задач, разработка методов и алгоритм расчетов проведены автором совместно с учёными из Танзании метеорологического агентства (ТМА) и Российского Государственного Гидрометеорологического Университета (РГГМУ).

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные результаты рекомендуются к использованию в учебном процессе и при анализе современных методов прогноза погоды, в ряде регионов тропических стран. Разработанные модели могут быть внедрены в оперативную службу долгосрочного прогноза сезона осадков для тропической зоны.

### **Апробация диссертационной работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на научном межкафедральном семинаре метеорологического факультета Российского Государственного Гидрометеорологического Университета (декабрь, 2010 г);
- на научных семинарах управления Метеорологического Агентства Танзании (Tanzania Meteorological Agency, 2009 г);
- на итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (январь 2011).

**Публикации:** Результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах, материалы использованы в научно-исследовательских отчётах.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из 8 основных частей: введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, содержащего 203 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 146 страниц, включая 35 рисунков и 23 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, описаны теоретическая новизна и практическая значимость работы, а также приводится краткое изложение содержания диссертации.

**В первой главе** кратко описываются процессы, определяющие режим осадков в экваториальной зоне, излагается описание географического положения, характера и рельефа местности и представляется обзор исследований режима осадков в экваториальной зоне. Необходимость такого описания связана с тем, что дальнейшие исследования проводились для области, покрывающей в основном территорию Восточной Африки. Изучение географических особенностей территории необходимо, в основном, для анализа результатов прогноза осадков. Регион Восточной Африки расположен между 29 – 42 ° в .д. и 5°с – 12 ° ю ш. Большая часть его находится в субэкваториальном климате (или климате экваториальных муссонов), только Уганда, Кения и северная часть Танзании относятся к экваториальной зоне. Осадки в Восточной Африке связаны с

циркуляцией синоптического масштаба (ВЗК, муссонная циркуляция) и мезомасштабной циркуляцией, вызванной региональными факторами, такими как наличие больших водоемов и сложного рельефа. Прохождение ВЗК определяет существование двух основных сезонов дождей: периода продолжительных дождей с марта по май (МAM) и периода кратковременных дождей октябрь-декабрь (OND).

**Во второй главе** приведены результаты выполненного исследования с целью получения классификации климатологических регионов на основе данных о режиме осадков с целью разработки методики долгосрочного прогноза сезонных сумм осадков в тропиках на примере Восточной Африки, а также приведен обзор литературы, посвященной вопросам, связанным с классификацией климата на основе анализа данных о количестве осадков. В качестве исходных данных были использованы: сезонные суммы осадков по 71 пункту наблюдений, равномерно покрывающих Восточную Африку (рисунок 1) за период с 1960 по 2003 г., полученные от метеорологических служб Танзании, Уганды и Кении. Расчеты проводились отдельно для каждого сезона года с использованием метода естественных ортогональных функций (ЭОФ). Сначала данные были стандартизированы, чтобы у каждого было нулевое среднее значение и единичная дисперсия, что необходимо для вычисления ковариационной матрицы.

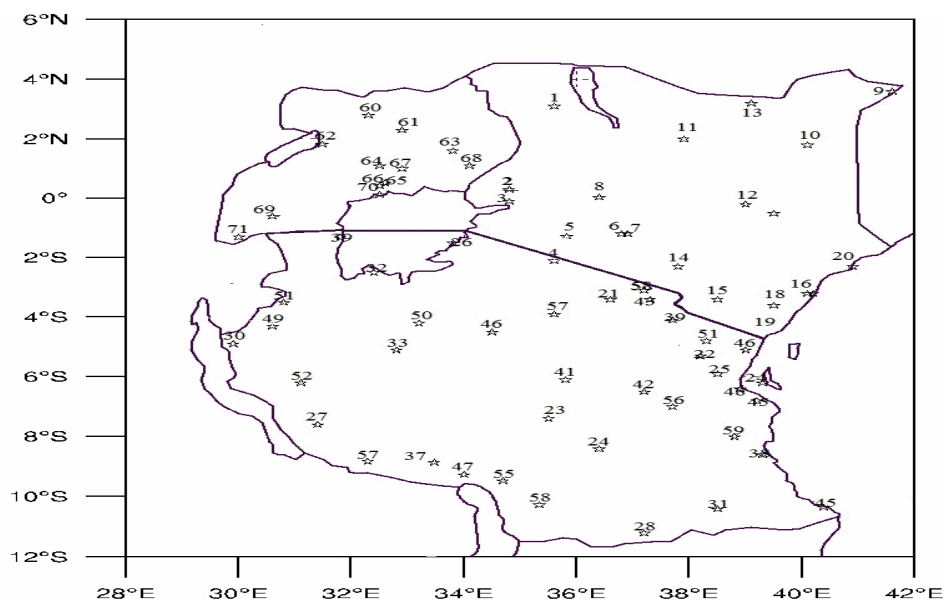


Рисунок 1 – Расположение метеостанций над Восточной Африкой, используемых для анализа режима осадков



На следующем этапе к стандартизованным данным применялась процедура вычисления главных компонент с последующим анализом режима осадков над исследуемым районом по главным компонентам. Далее описаны основные этапы использованного для этого метода ЭОФ. Рассматривается матрица данных  $F_{MXN}$ , каждый элемент которой  $f_{mn}$  представляет собой стандартизованное значение количества осадков, где индекс  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  характеризует номер станции, а индекс  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  описывает номер временного слоя. На первом этапе формируется ковариационная матрица  $Z_{MXM}$

$$Z = \frac{1}{N} FF^T \quad (1)$$

На втором этапе для полученной ковариационной матрицы определяются собственные векторы  $E = [e_1, e_2, \dots, e_M]$  и собственные числа  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]$  из решения характеристического уравнения

$$(Z - \lambda I) = 0 \quad (2)$$

На третьем этапе вычисляются естественные ортогональные функции  $C$  с элементами  $C_{MN}$ , являющимися проекцией  $f_{mn}$  на  $e_M$

$$C = E^T F \quad (3)$$

В результате первоначальные данные об осадках раскладываются на ортогональные пространственные функции (собственные векторы) и временные последовательности коэффициентов разложения или главных компонент (PCs). Значение нагрузки каждой переменной (станции) на каждом из общих факторов (главных компонент) является индексом, который используется для определения переменной (станции) в ее группу или тип. Пространственные границы этих групп были получены в результате использования топографических особенностей, а также доминирующих образцов потока ветра. Далее другой метод проверки, включающий использование рельефа и физических процессов, играющих роль в формировании режима осадков Восточной Африки использовался для определения действительности очерченных образцов осадков метод ЭОФ. Окончательный вариант климатических зон представлен на рисунке 2. Территория Восточной Африки подразделяется на 11 климатических зон, маркируемых как А, В, С, D, E,

F, G, H, I, J и K на основе использования метода ЭОФ по всем данным, с учетом варимакса вращения и сложной пространственной картографии существенных моделей группировок метода ЭОФ. Далее описаны основные факторы, определяющих особенности района и оценена информативность отдельных выбранных метеостанций с самой высокой общностью значений в каждой зоне.

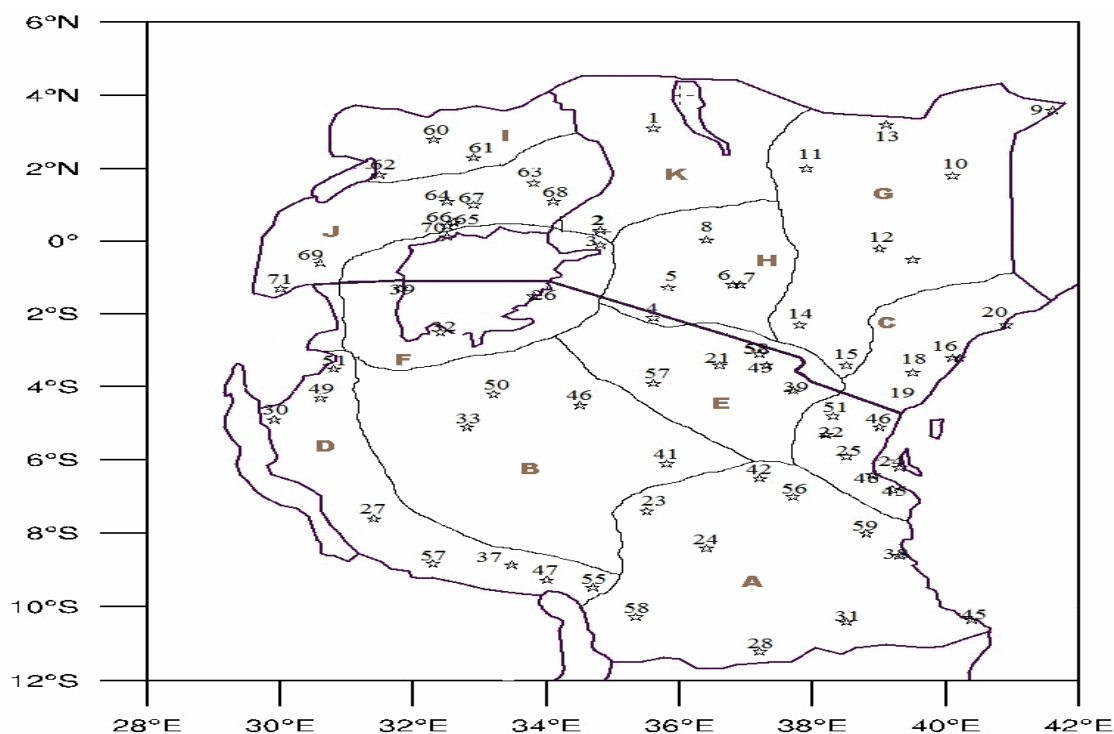


Рисунок 2 – Климатические однородные зоны Восточной Африки

**Третья глава** посвящена статистическому прогнозированию сезонных сумм осадков в тропиках на примере Восточной Африки с использованием данных о ТПО для тропического Тихого, Атлантического и Индийского как предикторов. Этот набор данных был получен из NOAA-NCDC ERSST в узлах сетки 2° широты и 2° долготы за период с 1960 по 2003 годы. Эмпирическая прогностическая модель осадков была построена с помощью главных компонентов предикторов ТПО в приближении множественной линейной регрессии (МЛР). Трёхмесячные сдвиги во времени аномалии ТПО, в июле и декабре были использованы для исследования потенциала предсказуемости количества осадков в сезоны дождей с октября по декабрь и с марта по май, соответственно. Территория Тихого океана была разбита на 62 части, поименованных как PAC1- PAC62, а территория Индийского и

Атлантического океанов была разбита на 19 регионов, поименованных как *INDO1- INDO19* и *ATL1- ATL19* , соответственно.

Таблица 1 –Сведения о ТПО в тропической части Индийского, Атлантического и Тихого океана как потенциальные предикторы (усредненные значения)

<i>ТПО Индийского океана</i>				<i>ТПО Тихого океана</i>			
<i>Аббревиация</i>	<i>Широта</i>	<i>Долгота</i>	<i>Кол-во узлов</i>	<i>Аббревиация</i>	<i>Широта</i>	<i>Долгота</i>	<i>Кол-во узлов</i>
INDO1-INDO3	5-15°с.ш	55-85° в.д	15	PAC1-PAC5	25 -15° с.ш	130-180° в.д	25
INDO4-INDO7	5°с.ш -5°ю.ш	50-90° в.д	20	PAC6 -PAC10	15 -5° с.ш	130-180° в.д	25
INDO8-INDO13	5-15° ю.ш	45-105°в.д	30	PAC11-PAC13	5° с.ш -5°ю.ш	150-180° в.д	15
INDO14-INDO19	15-25° ю.ш	50-110°в.д	30	PAC14-PAC15	5-15° ю.ш	160-180° в.д	10
<i>ТПО Атлантического океана</i>				PAC16-PAC17	15-25° ю.ш	160-180° в.д	10
ATL1 -ATL4	25-15° с.ш	25-65° з.д	20	PAC18 -PAC24	25-15° с.ш	110-180° з.д	35
ATL5 -ATL7	15-5° с.ш	25-55° з.д	15	PAC25 –PAC32	15 -5° с.ш	100 -180 з.д	40
ATL8 -ATL11	5°с.ш -5°ю.ш	5° в.д -35°з.д	20	PAC33 –PAC42	5° с.ш -5° ю.ш	80-180° з.д	50
ATL12 -ATL15	5 -15° ю.ш	5° в.д-35° з.д	20	PAC43 –PAC52	5 -15° ю.ш	80 - 180° з.д	50
ATL16 -ATL19	15 -25° ю.ш	5° в.д-35° з.д	20	PAC53 -PAC62	15-25° ю.ш	80-180° з.д	50

На основе данных о среднемесячных значениях аномалии ТПО за июль и декабрь для каждого региона океанов были вычислены ЭОФ. Оценка точности сходимости разложения по ЭОФ среднемесячных аномалий ТПО показала, что уже первые девять, четыре и три главных компонента описывают более 80% дисперсии исходного поля аномалии ТПО за июль и декабрь (таблицы 2 и 3). Это означает, что практически вся информация об изменчивости ТПО над Тихим, Индийским и Атлантическим океанах сосредоточена в первых девяти, четырех и трех главных компонентах, соответственно.

Таблица 2 – Собственные числа и дисперсии, полученные по аномалиям ТПО тропического Тихого океана (%)

<i>Период</i>	<i>Фактор</i>	<i>Собственные числа</i>	<i>Дисперсия</i>	<i>Суммарная дисперсия</i>
<i>Тихий океан</i>				
<i>Июль</i>	1	22.8	36.8	36.8
	2	11.4	18.4	55.2
	3	6.1	9.9	65.1
	4	4.5	7.3	72.4
	5	3.4	5.5	77.9
	6	2.6	4.2	82.1
	7	1.9	3.0	85.1
	8	1.6	2.6	87.7
	9	1.3	2.0	89.7
<i>Декабрь</i>	1	27.4	44.2	44.2
	2	10.4	16.8	61.0
	3	8.0	13.0	74.0
	4	3.1	4.9	78.9
	5	2.7	4.3	83.2
	6	1.8	2.8	86.0
	7	1.7	2.7	88.7
	8	1.5	2.5	91.2
	9	1.1	1.7	92.9

Таблица 3 – Собственные числа и дисперсии, полученные по аномалиям ТПО тропического Атлантического и Индийского океанов (%)

<i>Период</i>	<i>Фактор</i>	<i>Собственные числа</i>	<i>Дисперсия</i>	<i>Суммарная дисперсия</i>
<i>Атлантический океан</i>				
<i>Июль</i>	1	9.3	49.1	49.1
	2	4.0	21.0	70.1
	3	2.3	12.1	82.2
<i>Декабрь</i>	1	9.4	49.3	49.3
	2	4.4	23.0	72.3
	3	1.5	7.9	80.2
<i>Индийский океан</i>				
<i>Июль</i>	1	10.4	54.7	54.7
	2	3.6	18.8	73.5
	3	1.5	7.8	81.3
	4	1.1	6.0	87.3
<i>Декабрь</i>	1	11.4	60.0	60.0
	2	2.6	13.5	73.5
	3	1.5	7.7	81.2
	4	1.1	6.0	87.2

Ввиду большой изменчивости распределения осадков по области анализ был основан на 11 климатологических зонах (рисунок 2). Данные осадков соответствующих месяцев для отдельных станций в начале были суммированы для получения трёхмесячной общей суммы по каждому сезону. Трёхмесячные данные затем были нормированы по соотношению:  $(Y - \bar{Y})/\rho$ , где  $Y$  - МАМ/ОНД количество осадков в год,  $\bar{Y}$  и  $\rho$  - их среднее значение и стандартное отклонение за период с 1960 по 2003 г. Такой нормированный метод также применялся для каждого узла сетки поля ТПО. Затем модель МЛР строилась на основе главных компонент предикторов и предиктанта. Для главных компонент разложения по естественным ортогональным функциям рассматривалась линейная зависимость от предикторов для прогноза количества осадков в тропиках. В подобном подходе каждая из естественных ортогональных функций может быть представлена как

$$PC_K = C_{k1}X_1 + C_{k2}X_2 + \dots C_{km}X_m, \quad (4)$$

где  $C_{k1}, C_{k2}, \dots, C_{km}$  представляют собой коэффициенты переменной  $m$  для  $k^{th}$  PCs. Не более пяти PCs со значительными коэффициентами регрессии были включены в МЛР модели, а не дающие значительные коэффициенты регрессии были исключены из модели с помощью ступенчатого метода. Это делалось в целях предотвращения дублирования и неустойчивости уравнения МЛР и обеспечения хороших результатов при применении его к новым данным. Тогда уравнения МЛР с использованием главных компонент выглядит следующим образом:

$$Y = a_0 + a_i PC_i + a_j PC_j + a_l PC_l + a_m PC_m + a_n PC_n + \varepsilon_i, \quad (5)$$

где  $i, j, l, m, n$  сохранили компоненты ( $i \neq j \neq l \neq m \neq n$ ) со значительными коэффициентами регрессии  $a_i, a_j, a_l, a_m$  и  $a_n$ , соответственно.

### Основные критерии качества модели МЛР

1. Множественный коэффициент линейной корреляции ( $0 \leq R \leq 1$ ) представляет собой аналог обычного парного коэффициента корреляции и характеризует меру линейной связи между прогнозом  $\hat{Y}_i$  и наблюдаемым значением  $Y_i$ , т.е.

$$R = \frac{\sum_1^N (Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}{\sqrt{\sum_1^N (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_1^N (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2}} \quad (6)$$

При  $R = 1$  имеем функциональную линейную модель, и остатки  $\varepsilon_i = 0$ . при  $R = 0$  изменчивость функции отклика полностью определяется остатками  $\varepsilon_i$ .

2. Линейный коэффициент детерминации представляет квадрат множественного коэффициента корреляции:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

коэффициент детерминации определяет, насколько дисперсия в зависимой переменной может быть объяснена изменением независимой переменной, т.е. предиктора.

3. Средняя квадратическая ошибка (rmse) является мерой квадратной разницы между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями на каждой зоне. Если  $Y_i$  и  $\hat{Y}_i$  наблюдаемое и прогнозируемое значение, то (rmse) можно определить по следующему соотношению:

$$rmse = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i^2 - \hat{Y}_i^2) \right]^{1/2} \quad (8)$$

Точная модель имеет низкое значение систематической ошибки (rmse). Однако, (rmse) является не совершенным инструментом и имеет недостатки, переоценивающие значимость модели прогноза, что недооценивает случайную изменчивость. Тем не менее, преимуществом использования этой мерой является сохранение единиц прогнозируемой переменной.

4. Информация, содержащаяся в таблице сопряженности, часто объединяется в один индекс, называемый коэффициентом успешности прогнозов или индекс Heidke Skill Scores (HSS). Он определяется соотношением:

$$HSS = \frac{H - E}{T - E} \times 100 \text{ percent}, \quad (9)$$

Здесь  $H$  – является реальным числом оправдавшихся прогнозов,  $T$  – общее число прогнозов и  $E$  – ожидаемое число оправдавшихся прогнозов. Для лучшей и практичной модели прогноза, значения коэффициента успешности прогнозов

должны быть, по крайней мере, положительными. Коэффициент успешности прогнозов равен единице, когда все прогнозы оправдались и равен нулю, когда число оправдавшихся прогнозов равно их ожидаемому числу.

5. Критерии Фишера используется для оценки значимости всей модели МЛР. Эмпирическое значение статистики Фишера:

$$F = \frac{R^2(n - m)}{(1 - R^2)(m - 1)} \quad (10)$$

Вычисленное значение критерия  $F$  сравнивается с критическим значением  $F_{кр}(\alpha, \nu_1, \nu_2)$  при заданном уровне значимости  $\alpha$  и степенях свободы  $\nu_1 = m, \nu_2 = n - m - 1$ , где  $m$  - число предикторов и  $n$  - число наблюдений. Если  $F > F_{кр}$ , то нулевая гипотеза отвергается и делается предположение, что дисперсия, описываемая моделью МЛР, неслучайным образом отличается от дисперсии ошибок. Это означает, что рассматриваемая модель является адекватной исходным данным функции отклика.

#### **Анализ результатов прогноза осадков для Восточной Африки и его уточнение**

Весь архив сезонных осадков был разбит на две выборки: зависимую (1960-1989 гг.), по которой рассчитывались и тестировались модели, и независимую выборку (1990-2003 гг.), используемую для оценки оправдываемости опытных прогнозов. Для построения прогностических моделей использовался аппарат множественного регрессионного анализа. Основные параметры этих моделей приведены в таблице 4. Все модели являются адекватными по критерию Фишера. Видно, что в сезон дождей с октября по декабрь прогноз модели стабилен для зон А, С, Е, F, G и J, и в период с марта по май прогноз модели стабилен для зон А, С, F и I.

Сопоставление опытных прогнозов осадков в сезонах OND и MAM с исходными данными по независимой выборке за период 1990 – 2003 гг. представлено в таблице

5. Видно, что, в целом, наблюдается хорошее соответствие прогнозных осадков с фактическими данными для зон А, С, Е, F, G и J для сезона дождей с октября по декабрь, а также зон А, С, F и I, для сезона дождей с марта по май. Это означает, что множественный регрессионный анализ, предложенный для анализируемого региона,

более успешно способен прогнозировать количество осадков для сезона дождей с октября по декабрь, чем для сезона дождей с марта по май.

Таблица 4 – оценки параметров регрессионных моделей по зависимой выборке (1960 – 1989 гг.) для 11 зон Восточного Африка

Зона	Параметры прогностической модели							
	с октября по декабрь				с марта по май			
	$R$	$R^2$	$F$	$F_{кр}$	$R$	$R^2$	$F$	$F_{кр}$
A	0.79	0.62	7.8	4.46	0.81	0.71	8.9	4.46
B	0.51	0.26	3.1	4.46	0.65	0.42	2.8	4.46
C	0.84	0.66	7.5	4.46	0.75	0.57	6.2	4.46
D	0.59	0.35	4.2	4.46	0.57	0.32	4.1	4.46
E	0.80	0.64	6.1	4.46	0.61	0.37	4.3	4.46
F	0.77	0.59	5.5	4.46	0.75	0.56	4.9	4.46
G	0.78	0.60	5.5	4.46	0.52	0.27	3.3	4.46
H	0.60	0.38	4.3	4.46	0.55	0.30	2.7	4.46
I	0.42	0.18	2.9	4.46	0.79	0.62	7.8	4.46
J	0.76	0.58	4.7	4.46	0.58	0.34	3.1	4.46
K	0.64	0.41	4.3	4.46	0.63	0.40	3.9	4.46

Таблица 5 – Результаты опытных прогнозов осадков по независимой выборке(1990 – 2003 гг.) для 11 зон Восточного Африка

Зона	Опытные прогнозы осадков			
	С октября по декабрь		с марта по май	
	rmse	HSS	rmse	HSS
A	0.52	0.26	0.42	0.34
B	0.83	0.25	0.89	0.17
C	0.25	0.37	0.48	0.31
D	0.72	0.38	0.91	-0.02
E	0.44	0.17	0.84	0.12
F	0.46	0.25	0.52	0.23
G	0.48	0.07	0.95	0.05
H	0.58	0.36	0.98	-0.18
I	0.86	0.12	0.47	0.30
J	0.50	0.15	0.87	0.18
K	0.62	0.20	0.65	0.31

**В четвертой главе** рассматриваются связи между временным рядом сезонного количества осадков в период продолжительных дождей с марта по май и фазами квазидвухлетних колебаний зонального потока, а также предлагается метод



использования выявленных зависимостей для прогноза количества осадков. Многолетние средние месячные индексы климата: индекс Южного Колебания (ЮК) и индекс глобально усредненного экваториального стратосферного зонального ветра на 30 мб (КДЦ) были получены из базы данных центра анализа климата (CRP/NOAA). Стратификация индексов КДЦ была основана на четырех сезонах: с марта по май (МAM), с июня по август (JJA), с сентября по ноябрь (SON) и с декабря по февраль (DJF). Данные об осадках были синхронизированы с данными КДЦ-индексов и индекса ЮК в течение периода с 1979 по 2003г. Стандартизированные отклонения осадков и их аномалии были вычислены в течение сезона дождей МAM по соотношению:  $(Y - \bar{Y})/\rho$ , где  $Y$  - сезонное количество осадков в год,  $\bar{Y}$  и  $\rho$  - их средние значения и стандартные отклонения за период с 1979 по 2003г. Корреляционный и КДЦ/осадки композитный анализы использовались с целью выделения сигнала КДЦ, который может быть использован как переменный предиктор для прогнозирования количества осадков в сезон дождей МAM. Далее каждый 71 индекс осадков и региональный временной ряд индекса осадков для 11 зон был сначала коррелирован с КДЦ-индексом для идентификации пространственной степени соотношений между КДЦ и осадками. Зоны, которые значительно коррелировали с КДЦ, были кросс-коррелированы с индексом ЮК для проверки вклада каждого из двух индексов планетарного климата в сезон продолжительных дождей (МAM). Эти временные ряды зон были, тогда обобщены в категории использованием таблиц сопряженности, основанных на западных и восточных фазах КДЦ. Нулевой и сдвинутый по времени корреляционный анализ использовались в этом исследовании, статистическая значимость коэффициента корреляции ( $r$ ) протестирована с помощью  $Z$  – преобразования Фишера и критерия Стьюдента. Коэффициент корреляции ( $r$ ) рассчитывался по формуле:

$$r = \frac{\sum_1^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_1^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_1^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

где  $X_i, Y_i$  - текущие значения предиктора и предиктанта соответственно, а  $\bar{X}, \bar{Y}$  - их средние значения за рассматриваемый месяц и период лет;  $-1 \leq r \leq 1$ , (r), показывающие положительные или отрицательные отношения. Оценка эмпирического коэффициента корреляции (r) проводится с помощью Z – преобразования Фишера:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} \quad (12)$$

и критерия Стьюдента  $\left| \frac{Z}{\sigma_Z} \right| \geq \alpha_{KP}$ , где  $\alpha_{KP}$  соответствует 5, 1 или 0.1 % -ному уровню значимости. Среднеквадратическое отклонение параметра Z равно:

$$\sigma_Z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} \quad (13)$$

где, N – число членов в выборке, за которые имеются данные для предиктанта и предиктора. В композит-анализе использовались годы, которые имеют осадки выше нормы и совпадающие с западными фазами КДЦ, а также годы с осадками ниже нормы и совпадающими с восточной фазой КДЦ. Годы, имеющие стандартизированный индекс осадков  $\geq 0.12$ , были классифицированы как осадки выше нормы, а годы, имеющие стандартизированный индекс осадков  $\leq -0.12$ , были классифицированы как годы осадков ниже нормы. Выбор этого диапазона стандартизированного индекса осадков основан на критерии Стьюдента, примененном на объеме выборки 25 лет. Т-показатели на высоких и низких индексах осадков показывают, что два ряда значительно различны на 95%-ом уровне значимости.

### **Анализ результатов связи между сезонными осадками и КДЦ-индексом**

Результаты анализа связи между КДЦ-индексом и осадками за исследуемый период в Восточной Африке показали, что в зоне А, В, D, F, Н и J исследуемые параметры имеют значительную нулевую и лаг корреляцию. Самая высокая значимая корреляция между сезонными осадками и КДЦ-индексом составляет + 0.6 и наблюдается между МАМ индексом осадков в зоне F и JJA КДЦ-индексом предыдущего года и уменьшается к относительно целевому сезону дождей МАМ (рисунок 3 и таблица 6). Видно, что корреляции внезапно разрушаются между 3 и 2

лагами сезонов для зон D, H и J. Внезапный крах в корреляциях предполагает, что долгосрочное прогнозирование (двух сезонов или заранее), невозможно выполнить в этих трех зонах.

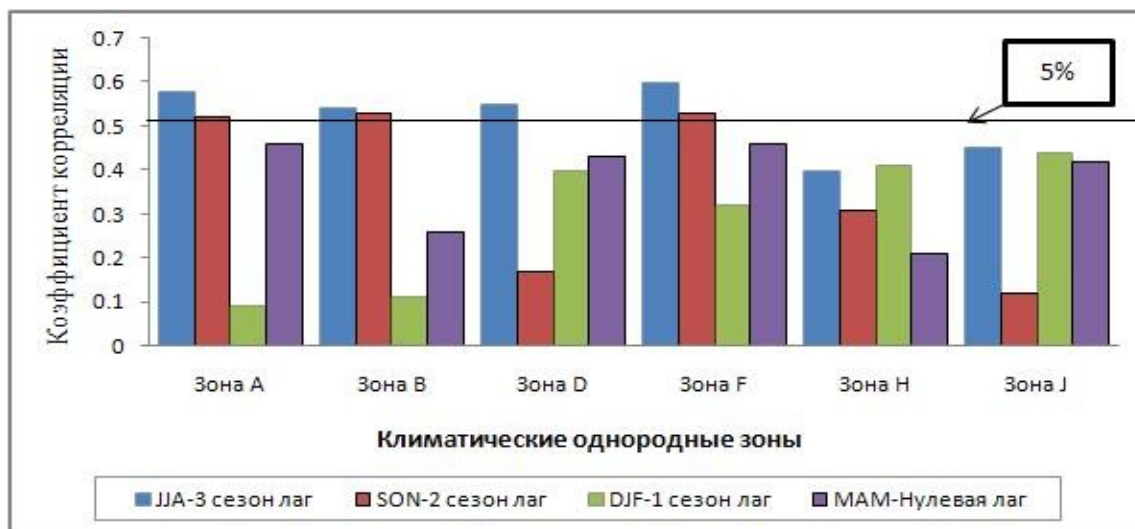


Рисунок 3 – Средние корреляции образцов, трех сезонов лаг, двух сезонов лаг, одного сезона лаг и нулевая лаг между индексом КДЦ и сезоном дождей с марта по май (для коэффициента корреляции выше 5% уровень значимости обозначен)

Таблица 6 – Нулевая и лаг коэффициент корреляции (r) между индексом КДЦ и сезоном дождей с марта по май по 11 однородным зонам по Восточной Африке, (объеме выборки 25 лет).

Период	Зона А	Зона В	Зона С	Зона D	Зона Е	Зона F	Зона G	Зона H	Зона I	Зона J	Зона K
JJA	0.58**	0.54**	-0.42*	0.55**	0.11	0.60**	0.32	0.40*	0.41*	0.45*	0.20
SON	0.52**	0.53**	-0.34	0.17	-0.19	0.53**	0.35	0.41*	0.26	0.12	0.09
DJF	0.09	0.11	-0.15	0.40*	0.45*	0.32	0.33	0.31	0.28	0.44*	0.25
MAM	0.46*	0.26	-0.21	0.43*	0.41*	0.46*	0.20	0.21	0.35	0.42*	0.23
JUNE	-0.04	0.47*	-0.34	0.40*	0.16	0.56**	0.23	0.41*	0.40*	0.43*	0.20
JULY	-0.50*	0.54**	-0.43*	0.46*	0.13	0.59**	0.33	0.40*	0.41*	0.40*	0.19
AUG	-0.49*	0.57**	-0.41*	0.37	0.03	0.57**	0.38	0.42*	0.36	0.29	0.18
SEPT	-0.39	0.55**	-0.38	0.26	-0.08	0.55**	0.38	0.42*	0.30	0.19	0.13
ОКТ	-0.51**	0.52**	-0.35	0.17	-0.19	0.52**	0.35	0.43*	0.26	0.13	0.10
NOV	-0.55**	0.50*	-0.29	0.07	-0.29	0.46*	0.31	0.40*	0.20	0.05	0.03
DEC	-0.51**	0.44*	-0.25	0.02	-0.35	0.32	0.20	0.41*	0.12	-0.02	-0.04
JAN	0.39	-0.20	0.04	0.27	0.52**	0.23	0.17	0.03	0.09	0.40*	0.17
FEB	0.36	-0.09	0.02	0.31	0.53**	0.29	0.15	0.12	0.18	0.31	0.29
MAR	0.18	0.08	-0.08	0.40*	0.48*	0.38	0.16	0.16	0.28	0.47*	0.26
APR	-0.04	0.20	-0.23	0.43*	0.44*	0.46*	0.19	0.21	0.35	0.44*	0.24
MAY	-0.27	0.35	-0.29	0.40*	0.30	0.51**	0.22	0.42*	0.38	0.32	0.18

\*\* 99%-ый уровень значимости; \* 95%-ый уровень значимости

## Анализ результатов предсказуемости сезона дождей с использованием КДЦ-индекс

Результаты анализа среднегодового значения КДЦ-индекса (а) и индекса южного колебания (b) показывают, что западные фазы КДЦ-индекса наблюдались в течение 1980, 1983, 1985, 1986, 1988, 1990, 1993, 1995, 1997, 1999 и 2002 гг.; восточные фазы в течение 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2001 и 2003 гг. (рисунок 4а). С другой стороны, частые отрицательные фазы были доминирующими с индексом ЮК в анализируемом периоде (рисунок 4б). В течение 1982, 1984, 1987, 1992, 1994, 1998 и 2003 гг. восточные фазы КДЦ-индекса совпали с низкими (отрицательными) фазами индекса ЮК. Все эти годы, за исключением 1984 и 1994, были классифицированы как годы ЭНЮК. Это наблюдение объясняется тем, что ЭНЮК имеет тенденцию, связанную с восточными фазами КДЦ.

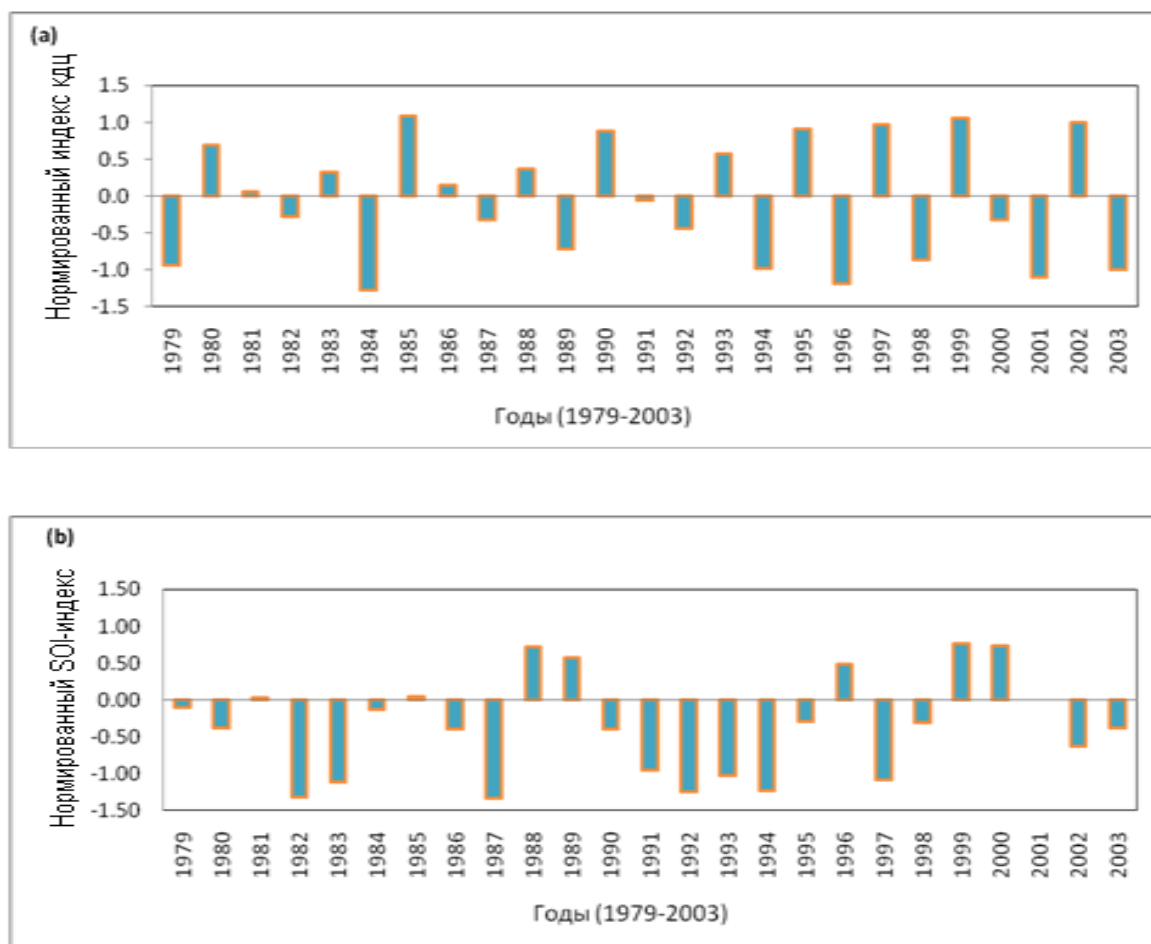


Рисунок 4 – Средний ежегодный временной ряд для КДЦ-индекса (а) и индекса Южного Колебания (b)

В таблице 7 приставлены результаты анализа связей между временным рядом сезонного количества осадков выше/ниже нормы в период продолжительных

дождей с марта по май и западным/восточным фазами стратосферного зонального ветра для трех однородных зон Восточной Африки, которые были идентифицированы как имеющие значительную корреляцию с КДЦ-индексом. Из анализа этих трех зонах видно, что стратосферные западные фазы ветра соответствуют осадкам выше нормы, которые наблюдались в 7 из 11 случаев для зоны А, в 7 из 11 для зоны В, и в 8 из 11 для зоны F, условные вероятности приблизительно 0.6, 0.6 и 0.7 для соотношений осадков выше нормы в сезон дождей МАМ и западной фазой КДЦ. Стратосферные восточные фазы ветра и осадки ниже нормы наблюдались в 8 из 12 случаев для зоны А, в 7 из 12 для зоны В, и в 8 из 12 для зоны F, условные вероятности приблизительно 0.7, 0.6 и 0.7 для осадков ниже нормы в этих трех зонах и восточной фазе стратосферного зонального ветра. Полученные результаты, поддерживают понятие осадков выше/ниже нормы, связано с западной/восточной фазами стратосферного зонального ветра.

Таблица 7 –Таблица сопряженности для зональных фаз ветра на уровне 30мб и аномалий сезона дождей с марта по май в трех однородных климатических зонах над Восточной Африкой

Аномалии количества осадков					
Фазы КДЦ-индекса		AN	NN	BN	Сумма
Зона А	Западная фаза	7	2	2	11
	Восточная фаза	3	1	8	12
	Сумма	10	3	10	23
Зона В	Западная фаза	7	1	3	11
	Восточная фаза	3	2	7	12
	Сумма	10	3	10	23
Зона F	Западная фаза	8	1	2	11
	Восточная фаза	2	2	8	12
	Сумма	10	3	10	23

AN- осадки выше нормы ( $X_i \geq X_{\text{средний}} + 0.12\sigma$ ); BN- осадки ниже нормы ( $X_i \leq X_{\text{средний}} - 0.12\sigma$ );

NN- осадки около нормы ( $X_{\text{средний}} - 0.12\sigma \leq X_i \leq X_{\text{средний}} + 0.12\sigma$ );  $\sigma$  -стандартное отклонение

$X_i$  - означает наблюдения.

Анализ результатов потенциала предсказуемости сезона дождей МАМ по зоне F и КДЦ-индекса за июль (а), тенденция-разности между значениями OND и JJA КДЦ – индекса (b). Видно, что для целей прогнозирования региональных осадков наиболее

полезным индексом представляется тенденция индекса КДЦ перед сезоном дождей МАМ. Коэффициент корреляции между аномалиями осадков в зоне F и разница между OND и JJA КДЦ – индекса представляет собой +0.63 (приблизительно 40%-ная дисперсия), который является выше, чем для JJA сезона (+0.6). На рисунке 5, видно, что большинство лет сильных засух находится в более низком левом секторе, а большинство лет очень сильных осадков находится в верхнем правом секторе диаграммы рассеяния. Близкое отсутствие пунктов в более низком правом углу этой диаграммы рассеяния предполагает, что положительная тенденция КДЦ – индекса была хорошим предиктором для невозникновения засухи по Восточной Африке. Кроме того, негативная тенденция может быть хорошим индикатором для ненаступления сильных дождей над регионом.

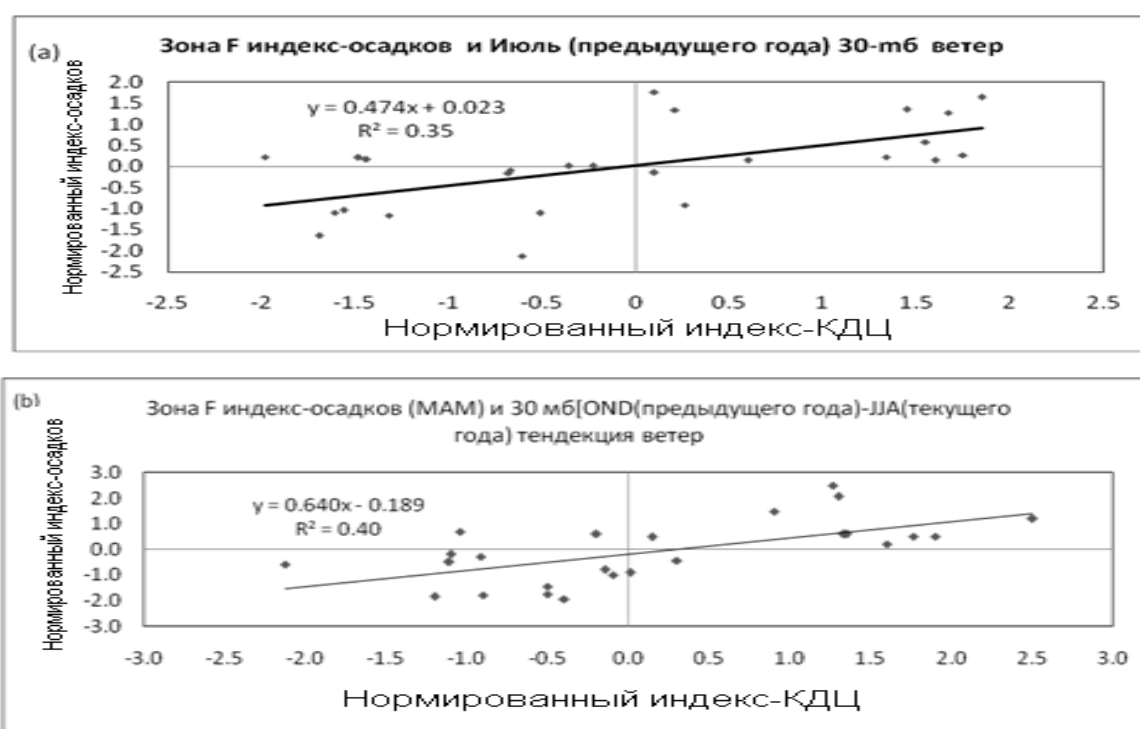


Рисунок 5 – Диаграмма рассеяния между сезоном дождей МАМ по региону вокруг озера Виктория и экваториальным зональным ветром на 30мб за июль(а), и тенденция-разность между значениями с октября по декабрь и периодом с июня по август КДЦ индекса (b).

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования:

1. Множественный регрессионный анализ, предложенный для анализируемого региона, более успешно способен прогнозировать количество осадков для сезона дождей с октября по декабрь, чем с марта по май;
2. Показано, что температура поверхности океана может использоваться в качестве предиктора не только для определения количества осадков, но и продолжительности сезона дождей, что может быть полезным для минимизации влияния климатической изменчивости на социально-экономические аспекты тропического региона;
3. Показано, что связь между количеством осадков в сезон дождей в марте-мае и фазами явления Эль-Ниньо относятся к ограниченному числу лет; при этом, если феномен Эль-Ниньо происходит, то связь между КДЦ-индексом и количеством осадков в сезон дождей МАМ всегда обнаруживается. Поэтому, мониторинг обоих параметров может обеспечить очень полезное руководство для долгосрочного прогноза сезона дождей МАМ по региону;
4. Показано, что количество осадков выше/ниже нормы в период продолжительных дождей с марта по май над Восточной Африкой связано с западной/восточной фазами стратосферного зонального ветра;
5. Показано, что для целей прогнозирования региональных осадков наиболее полезным индексом представляется тенденция индекса КДЦ перед сезоном дождей МАМ. Положительные тенденции – это разность между значениями с октября по декабрь (OND) и с июня по август (JJA) индекса КДЦ, она может быть хорошим индикатором для ненаступления засухи в Восточной Африке. Кроме того, негативная тенденция может быть хорошим индикатором для ненаступления сильных дождей над регионом;
6. Чтобы улучшить прогнозирование сезона дождей в марте-мае в тропических странах, оказывающее существенное влияние на все секторы экономики, включая сельское хозяйство, водоснабжение и выработку электроэнергии, и занимающее большую часть региона, можно рекомендовать использовать КДЦ-индекс как предиктор;

7. Результаты настоящего исследования, как предполагается, способны найти практическое применение для оперативного прогноза сезонного количества осадков в тропическом регионе. Дальнейшее развитие данной работы предполагает использование дополнительных предикторов, таких как диполь индекса Индийского океана, и индексы северо-атлантического колебания.

#### **Основные публикации автора по теме диссертации**

1. Классификация климатологических регионов Восточной Африки на основе данных о режиме осадков. Ученые записки РГГМУ, 2010, № 13, с. 40 – 51 (соавторы Смышлев С.П).
2. Соотношения между сезонными осадками с марта по май в экваториальной Восточной Африке и квазидвухлетний цикл стратосферных переносов (КДЦ). Ученые записки РГГМУ, 2010, № 14, с.60 –72 (соавторы Смышлев С.П).
3. Smyshlyayev S.P., Ng'ongolo H.K. The predictive potential of seasonal rainfall in equatorial East Africa using sea surface temperatures as predictors. Meteorological technology international, 2010, p. 102 – 105.
4. Ng'ongolo H.K., Smyshlyayev S.P. The statistical prediction of East African rainfall using OBQ phases information // Natural Science, 2010, Vol.2 №. 12 p. 1407 – 1416.

**Нгонголо Хашим Карим**

