



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности режима осадков в Африке»

Исполнитель Майоке Микаэль Жермэн Энок  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Топгунова Ольга Николаевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

«11» июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## Содержание

Введение .....	3
Глава 1 Климатические и циркуляционные особенности Африки и их связь с ЭНЮК.....	5
1.1 Общая циркуляция атмосферы .....	5
1.2. Климатические и циркуляционные особенности Африки.....	7
1.3 Основные компоненты западноафриканской муссонной системы. ...	14
1.3. Внутритропическая зона конвергенции.....	16
1.4 Муссоны .....	18
1.4 Тропические циклоны.....	20
Глава 2. Возможные предикторы для прогноза осадков. ....	22
2.1 ЭНЮК. Природа феномена и влияние на климат .....	22
2.2 Азорский антициклон .....	36
Глава 3 Исходные данные, методы расчета.....	37
3.2 Методы расчета .....	38
3.3 Результаты .....	43
Глава 4 Заключение.....	51
Список использованных источников .....	53

## Введение

Сельское хозяйство играет важную роль в продовольственной безопасности любой страны и развитии ее экономики. Наиболее важным фактором, оказывающим влияние на сельское хозяйство является климат [1]. Такие явления как Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК) приводят к изменчивости агроклиматических переменных, влияют на состояние растительности и вносят вклад в урожайность [2]. ЭНЮК — одно из наиболее значимых явлений в климатической системе Земли, которое объясняет колебания температуры поверхности моря в тропической части Тихого океана (ТПМ). Такие вариации влияют тропические погодные условия, но могут иметь глобальные последствия [3].

Задача долгосрочного прогноза осадков в регионе западной и центральной Африки не такая тривиальная и простая. Между тем, качественный прогноз режима увлажнения на этой территории позволил бы более рационально планировать и осуществлять хозяйственную деятельность.

Всем вышесказанным объясняется *актуальность* работы.

*Целью работы* является анализ режима увлажнения в Африке, вызванных летним муссоном.

Задачи:

- По данным реанализа ERA5 проанализировать внутригодовую изменчивость месячных сумм осадков на Африканском континенте.
- Рассчитать новые нормы осадков за период с 1991 по 2020 г по данным ERA5.
- Рассмотреть возможность использования индекса MEI и положения и интенсивности Азорского антициклона в качестве предиктора для положения ВЗК



## 1.1 Общая циркуляция атмосферы

Климатическая система Земли состоит из атмосферы, океанов, льда, почвы и растительности. Основным источником энергии этой системы Земля-Океан-Атмосфера является коротковолновый электромагнитный солнечный поток, большая его часть находится в очень коротких волнах, в видимом и в ближнем инфракрасном. Количество солнечной энергии, поглощаемой системой, зависит от косинуса угла, который солнечные лучи составляют с зенитом и альбедо системы (отношение солнечной энергии, отраженной поверхностью к приходящей солнечной энергии). Таким образом, распределение энергии неоднородно на поверхности земли, что приводит к поглощению солнечной энергии максимум в тропиках, минимум на полюсах. Поглощение, затем повторное излучение земной поверхностью вызывает изменение частотного диапазона электромагнитного излучения по отношению к падающему солнечному излучению. Частота излучения приходящий с поверхности в основном входит в длинноволновый диапазон. Радиационный баланс представляет собой разницу между полученной и излучаемой энергией. Таким образом, в годовом масштабе, с точки зрения энергетического баланса системы Земля, тропики испытывают профицит по сравнению с полюсами и средними широтами. Под  $45^\circ$  широты (север и юг) радиационный баланс положительный; вне этого предела отрицательный.

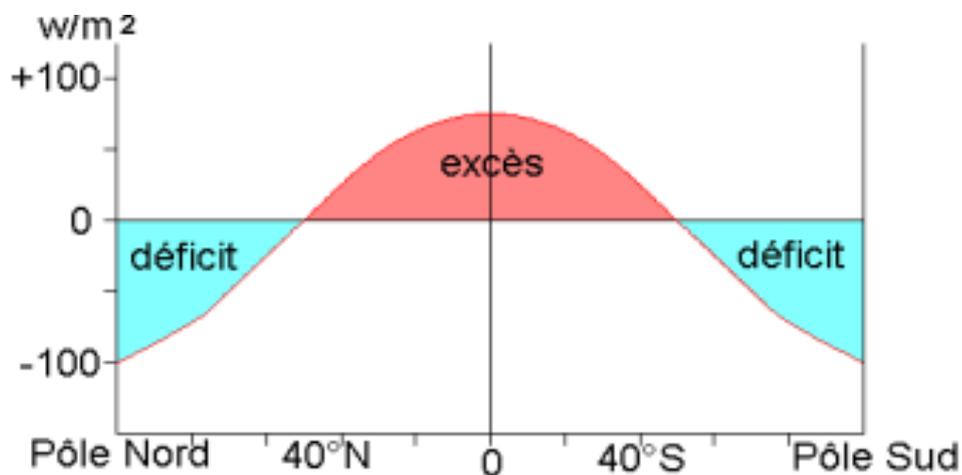


Рисунок 1.1 – Среднегодовой радиационный баланс системы Земли-Океан-Атмосфера в зависимости от широты. [ссылка] <https://theses.hal.science/tel-00333234/document> page 15

Кроме того, атмосфера практически прозрачна для солнечной радиации, за исключением нижних слоев и поверхности. Большая часть солнечной радиации поглощается ими. Поток излучения в космос в основном испускают верхние слои атмосферы. Поэтому атмосфера нагревается внизу и охлаждается на высоте: поэтому радиационный баланс в самых нижних слоях положителен и отрицателен на высотах.

Эти меридианные и вертикальные радиационные дисбалансы приводят к приведению в движение атмосферы и океана, так система стремится восстановить баланс системы Земля-Океан-Атмосфера. Эта передача энергии происходит главным образом в виде передач меридионально и вертикально потенциальной энергии, скрытого и явного тепла. Сила Кориолиса из-за вращения Земли предотвращает существование единой переходной меридиональной ячейки. Во внутритропических районах меридиональное перераспределение обеспечивается ячейкой Хэдли (Гадлея), опускание в которых климатически ограничивают тропическую область (около 30° широты). Сезонная эволюция этой ячейки характеризуется смещением к летнему полюсу и усилением ячейки зимнего полушария.

В нижних слоях находится зона схождения потоков двух полушарий, расположенных рядом с восходящими ветвями двух ячеек Хэдли (Гадлея). Эта область иногда называется Метеорологическим экватором или, другими словами, внутритропической зоной конвергенции. В ВЗК водяной пар, переносимый пассатами, двух полушарий конденсируется, высвобождая скрытую теплоту при конвекции. Преобразование тепла (скрытого и явного) дает потенциальную энергию влажному воздуху. Она обычно отмечена очень многочисленными облаками с сильным вертикальным развитием (кучево-дождевыми), высокой тропопаузой от 16 до 18 км, грозами и сильными осадками. Эти механизмы участвуют в поддержании энергетического баланса экваториальной зоны, отсюда и понятие метеорологического экватора. Таким образом, вся приходящая солнечная энергия подвергается определенному количеству трансформаций и переносов.

## 1.2. Климатические и циркуляционные особенности Африки

Африканский континент имеет значительные климатические различия со впечатляющими вариациями в зависимости от времени года и региона. Африка пересекается экватором в ее центре, поэтому ближе к этой линии имеет очень жаркий и влажный климат. Между районами экватора и тропиками устанавливается тропический климат, а высотные пояса более умеренные. В целом географическим положением Африки объясняется недостаток осадков на севере и невозможность естественной регуляции климата из-за отсутствия горных водоносных систем и обилие дождей в центральной части. Благодаря своему климату Африка обладает богатым биоразнообразием с наличием второго по величине лесного массива в мире, а именно бассейна реки Конго.

Сезоны во всех частях Африки не одинаковы. В течение 9 месяцев из 12 средние температуры превышают 20°C. Количество осадков в

значительной степени зависит от атмосферных движений, происходящих во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК). Она находится в зоне между тропиками и экватором. Установлено, что ВЗК круглый год находится в северном полушарии смещается в пределах 5-й параллели в январе до 20-й параллели в сентябре. Подъем воздуха ведет к его охлаждению, а влага выделяется в виде осадков на широте экватора, что определяет влажный климат, экваториальный климат ближе к экватору и тропический климат с обеих сторон. Затем сухой воздух сходится в северных и южных тропиках, создавая в этих местах засушливый климат, примерно на 20-й параллели северной и южной широты. Это соответствует Сахаре на севере и Калахари на юге. На Африканском Роге также преобладают пустыни и засушливые равнины (рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 – Климатически пояса Африки

Сезон дождей здесь начинается весной, когда из-за прогрева водных масс в северном полушарии термический экватор смещается к северу, а в след за ним внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) и связанная с ней структура облачных полей. Максимальное смещение ВЗК к северу происходит в августе-сентябре, это время связано с началом второго сезона дождей, обычно более интенсивного чем первый. Слой влажности ослабевает по направлению от экватора к ВЗК, с этим связан тот факт, что максимальные осадки выпадают на юге, постепенно ослабевая по направлению к ВЗК.

Летняя атмосферная циркуляция в западной Африке представлена на рисунке 1.1. На этом на рисунке видны четыре составляющие циркуляции в нижних слоях (сплошными стрелками): (I) пассаты с севера, связанные с Азорским максимумом (с центром на  $35^{\circ}$  с. ш.,  $35^{\circ}$  з. эпоха); (II) пассаты с юга, связанные с возвышенностью Святой Елены (с центром на  $30^{\circ}$  ю. ш.,  $10^{\circ}$  з. д.); (III) муссонный поток с юго-запада, несущий влажный воздух с Атлантического океана в Сахаре; (IV) Харматан (гарматан), сухой северо-восточный пассат, связанный с Ливийским антициклоном. (с центром на  $35^{\circ}$  с,  $15^{\circ}$  в.). Эти два течения также связаны с зоной пониженного давления, расположенной в Сахаре (изобара 1010 гПа, выделенная синим цветом на рисунке 1.2), называемой термальной депрессией Сахаран (Heat-Low на английском языке). На высоте есть три струйных течения (синие пунктирные стрелки): восточноафриканское струйное течение (JEA или AEJ на английском языке) в средней тропосфере (700-600 гПа), восточное тропическое струйное течение (JET или TEJ) в верхней тропосфере (200 гПа) и субтропическое западное струйное течение (JOST или STJ на английском языке) также в верхней тропосфере. JEA формируется в результате термического градиента с океанической зоной на юге, которая относительно более прохладная и влажная на юге по сравнению с Сахарой на севере, которая жарче и суше.

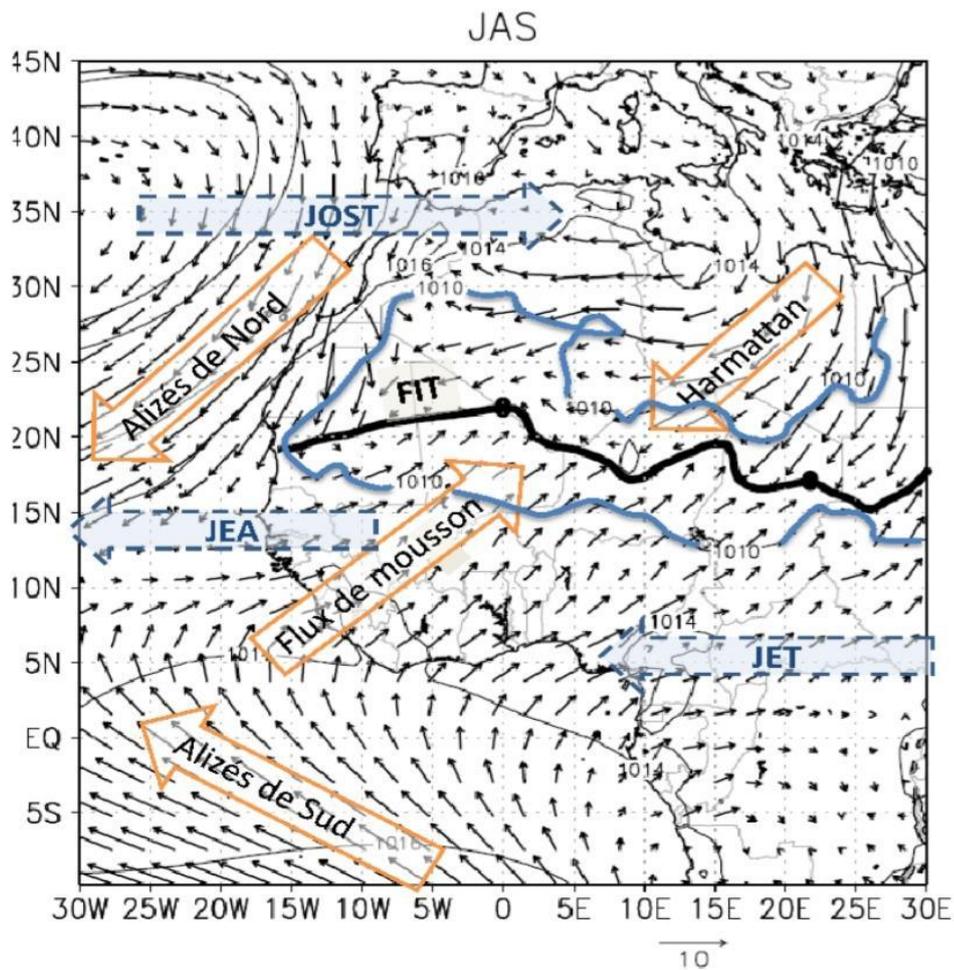


Рисунок 1.3 – Циркуляция в западной и центральной Африке

Встреча северного и южного пассатов (рисунок 1.2) образует зону внетропической конвергенции, также называемой метеорологическим экватором. Это зона глубокой конвекции, характеризующаяся восходящими движениями до 200 гПа. Именно положением ВЗК определяются максимумы осадков (рисунок 1.3).

Поднимающийся воздух дает начало крупномасштабной меридиональной циркуляции и образует две ячейки севернее и южнее (ячейки Гадлея).

Встреча Харматтана и муссонного потока определяет еще одну зону конвергенции, называемую Межтропическим фронтом (FIT, или ITF, или ITD на английском языке).

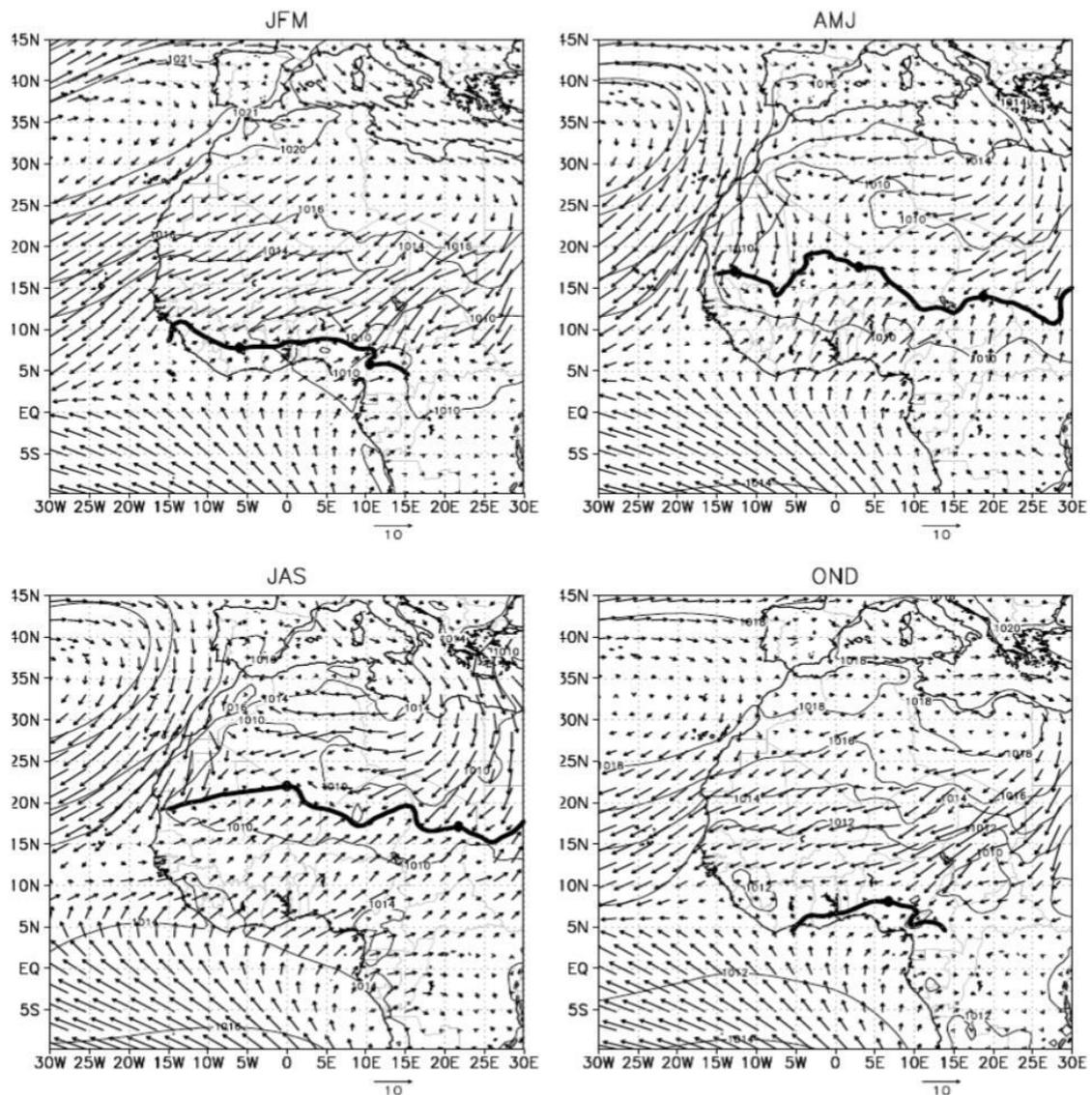


Рисунок 1.4 – Циркуляция в западной и центральной Африке

На рисунке 1.4 показана среднегодовая температура поверхности моря (ТПМ) для района между  $10^{\circ}$ з.д и  $10^{\circ}$  в.д в период с апреля по июль к югу от экватора, связанная с формированием экваториального апвеллинга.

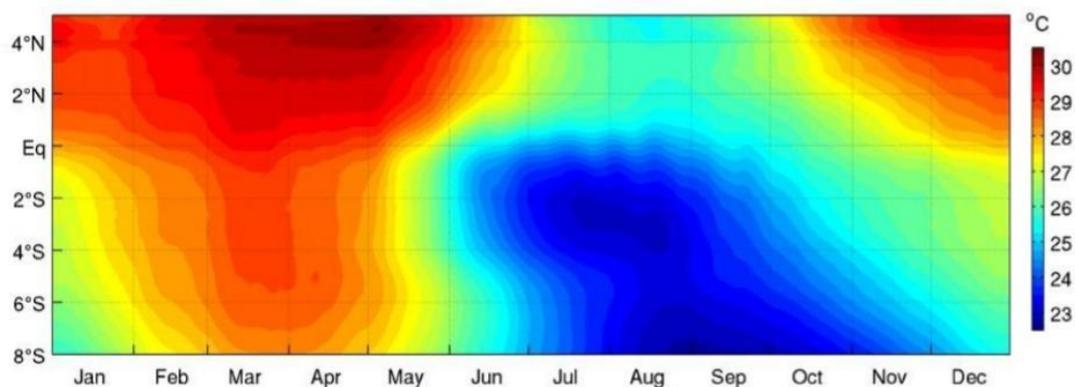


Рисунок 1.5 – Температура поверхности моря между 10°з.д и 10° в.д в период с апреля по июль к югу от экватора связанная с формированием экваториального апвеллинга. [ссылка] [https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these\\_Leduc-Leballeur.pdf](https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these_Leduc-Leballeur.pdf) page 19

Во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК или ITCZ (межтропический конвергенционный пояс) происходит теплообмен между различными воздушными массами, что приводит к образованию облачности и осадков. В Африке, муссоны сильно зависят от движения ВЗК. Когда ВЗК движется на юг, это создает летний муссон - влажный период с большим количеством осадков на южных побережьях Африки. Когда ВЗК перемещается на север, это вызывает зимний муссон - более сухой период с менее выраженной облачностью и осадками. Поэтому движение ВЗК имеет прямое влияние на климатические условия в регионе и определяет сезонность муссонов в Африке.

Меридиональное распределение количества осадков в течение года показано на рисунке 1.5. В зависимости от широты наблюдаются два режима осадков. Первый, вдоль гвинейского побережья (~5° с.ш.), характеризуется двумя сезонами дождей: одним boreальной весной (апрель-июнь) и другим осенью (сентябрь-октябрь). Для второго режима, наблюдаемого над Сахелем (~10° с.ш.) характерен единственный сезон дождей летом (июль-сентябрь). Однако движение полосы осадков не является постоянным и продолжает двигаться.

Можно выделить следующие фазы:

- ✓ океаническая фаза с ноября по середину апреля: максимальное количество осадков наблюдается к северу от экватора ( $\sim 1^\circ$  с.ш.).
- ✓ прибрежная фаза с середины апреля по июнь: максимальное количество осадков наблюдается в прибрежной зоне ( $2-6^\circ$  с.ш.).
- ✓ переходная фаза в первой половине июля: количество осадков резко снижается.
- ✓ сахельская фаза с середины июля по сентябрь: максимум осадков наблюдается в Сахеле ( $9-13^\circ$  с.ш.).

На рисунке 1.5 показано годовая сумма осадков в прибрежной зоне центральной Африки.

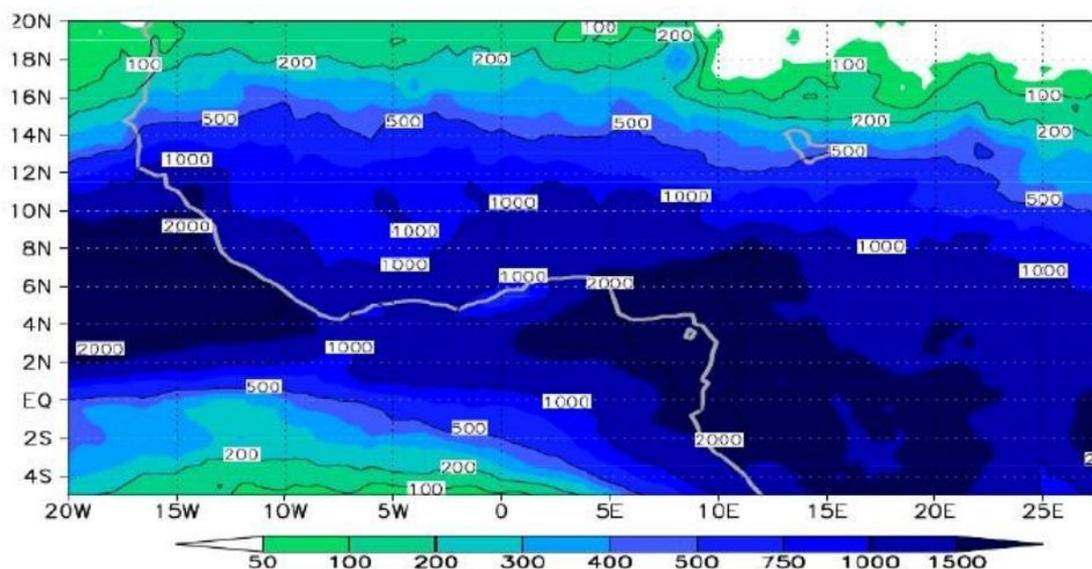


Рисунок 1.6 – Годовая сумма осадков для западной и центральной Африки [ссылка] [https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these\\_Leduc-Leballeur.pdf](https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these_Leduc-Leballeur.pdf) page 23

В тропической части Атлантического океана циркуляция в поверхностных слоях в основном обусловлена режимом пассатов. Сезонная изменчивость этих ветровых полей приводит к изменчивости поверхностных течений. Пассаты, ориентированные с юга/юго-востока на юг от экватора и юг/юго-К западу вдоль северного побережья Гвинейского

залива заметно усиливается бореальным летом. соответствует смещению на север внутритропической зоны конвергенции (ВЗК или ITCZ)

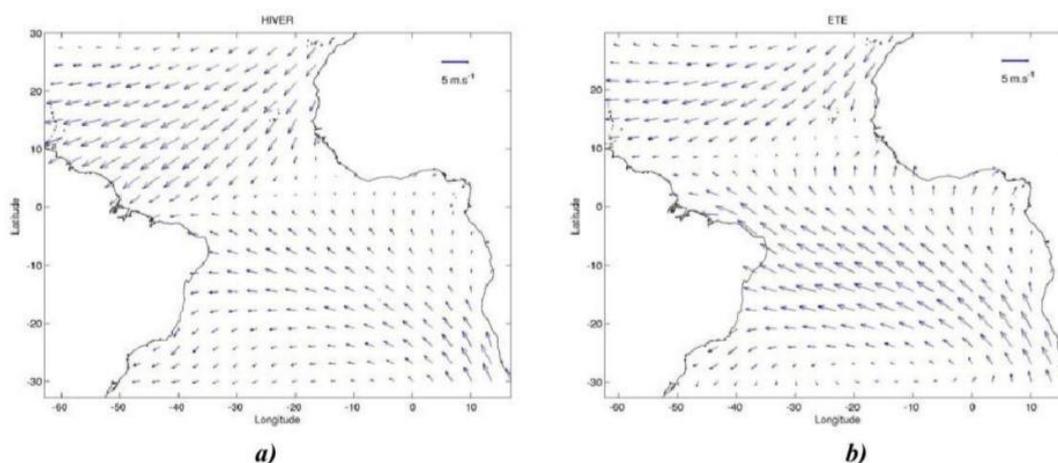


Рисунок 1.7 – Атлантическая циркуляция [ссылка]  
[https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these\\_Leduc-Leballeur.pdf](https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these_Leduc-Leballeur.pdf) page 30

### 1.3 Основные компоненты западноафриканской муссонной системы.

Муссонная циркуляция в Африке в глобальном контексте описана выше, но есть некоторые ключевые элементы, которые будут кратко представлены ниже. Хартман влияет на формирование восточноафриканского струйного течения. Восточноафриканское струйное течение - это быстрое струйное течение в верхней части атмосферы, которое образуется в результате разницы в температуре между воздухом над долиной реки Конго и районами к северу от нее. Хартман вызывает усиление восточноафриканского струйного течения, хартман также обуславливает формирование так называемой "декадной осцилляции" - циклическое изменение сезонных паттернов влажности и осадков в Восточной Африке в течение 10-дневных периодов. Это происходит из-за того, что хартман вызывает неравномерное движение ВЗК и влияет на характер движения атмосферных фронтов и циклонов, что, в свою очередь, определяет паттерны осадков в регионе. В итоге, влияние хартмана на атмосферную циркуляцию и восточноафриканское струйное течение

являются важными факторами в формировании климата Восточной Африки.

С другой стороны в Африке основополагающей климатической особенностью являются муссоны - периодические сильные ветры, которые вызывают значительные изменения в осадках в различных регионах в зависимости от времени года. В регионах, которые находятся под влиянием муссонов на западном побережье Африки, ветер дует с моря, увлажняя атмосферу и создавая климатические условия для формирования частых осадков, тогда как на восточном побережье муссоны причиняют сезонные засухи, вызывающие продолжительные периоды сухой погоды. Таким образом, харматан в основном приводит к формированию пустынных условий в регионе, тогда как муссоны вносят крупные изменения в осадки в зависимости от времени года в различных регионах Африки.

Конвергенция между Харматтаном и муссонным потоком отмечает расположение Межтропического фронта.

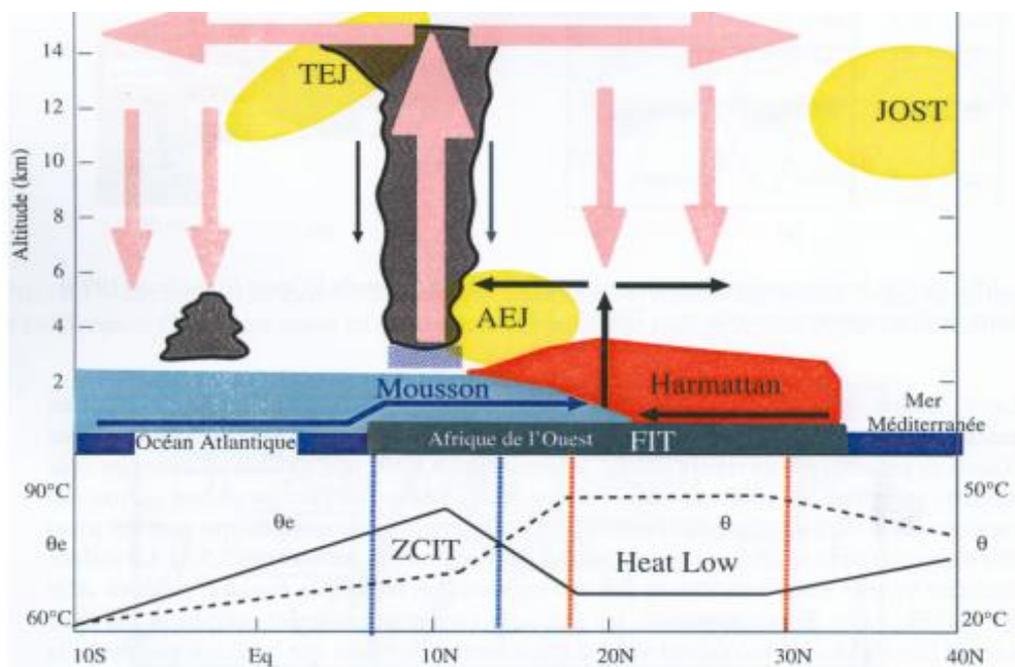


Рисунок 1.8 – Концептуальная схема циркуляции в западной Африке

На нижнем графике рисунка 1.8 представлены меридиональные профили потенциальной температуры ( $\theta$ ) и эквивалентная потенциальная температура ( $\theta_e$ ) в пограничном слое атмосферы. (ZCIT- внутритропическая зона конвергенции), (Heat low – зона низкого давления), (TEJ- тропическое восточное струйное течение), (AEJ- африканское восточное струйное течение), (JOST - африканская южная тропическая струя).

Зона низкого давления в Африке наиболее выражено проявляется над Сахарой и Аравийским полуостровом в сезон дождей, когда интенсивный поток солнечной радиации приводит к атмосферному нагреванию и высокой температуре воздуха. Значительный нагрев поверхности Земли вызывает сильный вертикальный подъем горячего воздуха из-за уменьшения плотности, что приводит к созданию низкого атмосферного давления. TEJ (тропическое восточное струйное течение (Tropical Easterly Jet)) возникает в верхней части атмосферы на высоте около 11-15 км, в районе 10° южной широты в сезон дождей (май-сентябрь) в Африке. AEJ (африканское восточное струйное течение (African Easterly Jet)) формируется в верхней части атмосферы на высоте около 6-9 км в период с июня по сентябрь в западной и центральной части Африки. AEJ обычно проходит с юга на север и смещается на юг от экватора в августе-сентябре.

### 1.3. Внутритропическая зона конвергенции

Внутритропические зоны конвергенции - это области, где встречаются два или более воздушных потока с разной температурой и влажностью. В результате этого происходит подъем воздуха и образование облачности, а также осадки. ВЗК находится в области между тропиком Рака и тропиком Козерога и проходит вдоль экватора. В ВЗК поднимающаяся влажная воздушная масса создает область сильных гроз и грозовых ливней, могут возникать торнадо и ураганы. Эта область обладает высокой энергетикой и влияет на климатические условия во всем мире, так как сильные конвективные движения, происходящие внутри ВЗК, могут

создавать атмосферный поток и переносить тепло и влагу. ВЗК является важным объектом исследований климатологов и гидрометеорологов, так как эта область оказывает существенное влияние на мировой климат и процессы переноса воздуха в тропосфере.

Зона внутритропической конвергенции является переходной зоной между пассатами северного и южного полушарий, или между пассатами и муссонами, или между пассатами и экваториальными западными ветрами (рисунок 1.9).

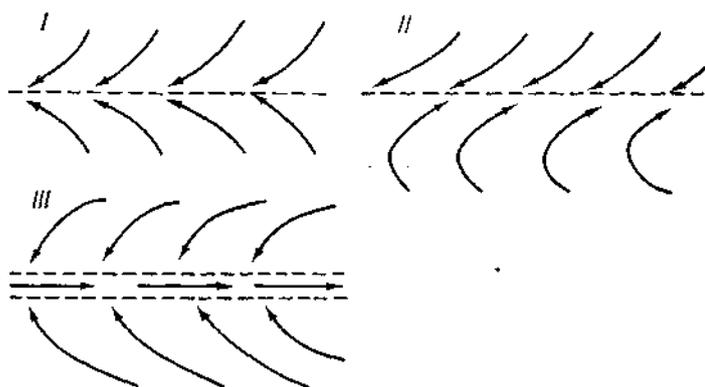


Рисунок 1.9 – Основные типы потоков воздуха во внутритропической зоне конвергенции. I – сходимость у тропического фронта вблизи экватора; II – сходимость пассатов на большем расстоянии от экватора (летний экваториальный муссон); III – экваториальная зона западных ветров

Конвергенция и возникновение волн и вихревых возмущений создают переменный ветровой режим во внутритропической зоне конвергенции и усиливают конвергенцию. Конвекционные облака (кучевые и кучево-дождевые) имеют большое вертикальное развитие и образуют мезомасштабные скопления облаков. В связи с этим наряду со штилями здесь нередки шквалы, а также могут наблюдаться тропические циклоны. Ширина внутритропической зоны конвергенции изменчива, но обычно составляет порядка нескольких градусов широты; над каждым океаном он может содержать несколько скоплений облаков с промежутками между ними. На континентах внутритропическая зона конвергенции может

сводиться к выраженному тропическому фронту с сильными температурными контрастами.

В барическом поле ВЗК соответствует экваториальной депрессии. В течение года положение зоны внутритропической конвергенции меняется и в большинстве случаев смещается в сторону того полушария, где наступает лето. Однако над Атлантическим океаном и восточной частью Тихого океана он круглый год находится в Северном полушарии. День ото дня внутритропическая зона конвергенции претерпевает значительные сдвиги.

Субтропические антициклоны представляют собой зоны высоких давлений с замкнутыми изобарами, между которыми видна ложбина низкого давления, опускающаяся в низкие тропические широты. Через него может проходить пассатный фронт, этот фронт разделяется двумя массами тропического воздуха с несколько разными свойствами (старый тропический воздух - более прохладный тропический воздух). Обычно пассатный фронт является продолжением полярного фронта в тропиках. Осадки в зоне пассатов выпадают в основном за счет пассатных фронтов.

#### 1.4 Муссоны

В некоторых районах тропиков, особенно на материках, пол года дуют пассаты, а в другую половину года они сменяются более сильными западными ветрами. Эта система последовательных ветров называется тропическими муссонами. Муссоны - масштабный режим воздушных течений над значительной частью земной поверхности, характеризующийся высокой повторяемостью одного преобладающего направления ветра в течение всего сезона (зимой или летом), но с резкой сменой этого направления (противоположным или близким ) от сезона к сезону. Муссоны представляют собой устойчивые сезонные режимы воздушных течений с резкой сменой направления господствующих ветров с зимы на лето и с лета на зиму (рисунок 1.10). Зимний муссон всегда контрастирует с летним

муссоном, поэтому муссоны обычно упоминаются во множественном числе.

Стабильность муссонов связана с устойчивым распределением давления в течение каждого сезона, а их сезонная смена связана с принципиальными изменениями давления от сезона к сезону. В соответствии с изменением направления барического градиента изменяется направление ветра.

Географические условия, необходимые для образования муссонов:

- наличие больших площадей суши;
- достаточно сильные колебания температуры в течение года.

Муссоны не вписываются в рассмотренную нами схему общей циркуляции атмосферы. Но они являются важным элементом этой схемы, т.к. во многих областях земного шара их заменяют постоянные ветры: пассаты и западный перенос.

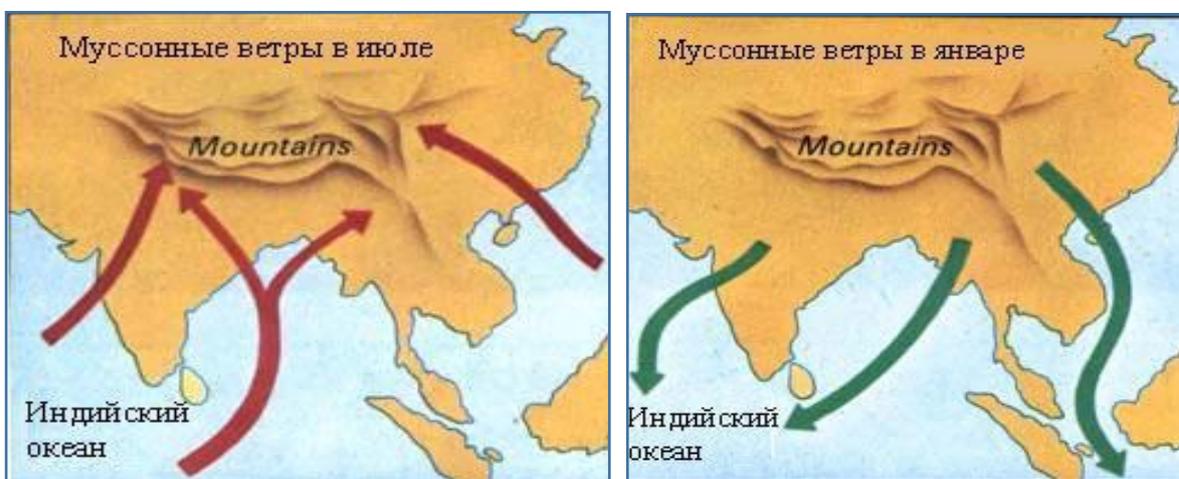


Рисунок 1.10 – Муссоны

Муссоны в тропиках (тропические муссоны) заставляют экваториальную депрессию и связанную с ней зону внутритропической конвергенции в течение года отдаляться от экватора сначала в южное полушарие, а затем в восточное северное полушарие (лето). В Тихом (кроме

западной части) и Атлантическом океанах муссоны в тропических широтах развиты слабо. В этих океанах в тропиках преобладают пассаты в течение всего года. Муссонная циркуляция наиболее интенсивна в бассейне Индийского океана (от восточных берегов экваториальной Африки до Индокитая и Австралии) и в западной части Тихого океана.

Причинами существования здесь зоны сильного развития муссонов являются: наличие Евразии в северной части Индийского океана, положение Африки почти симметрично относительно экватора.

В случае с Африканским континентом происходит следующее: летом над Сахарой находится зона пониженного давления, а зимой - отрог Азорского максимума. В ЮАР аналогичная ситуация. Поэтому барический градиент меняет направление: зимой — в сторону Сахары, летом — от нее. В результате меняется направление ветра.

В бассейне Индийского океана тропические муссоны объясняются тем, что над Южной Азией в течение года наблюдается резкая смена давления (летом - депрессия, зимой - антициклон). В июле его крайний север занимает экваториальная депрессия. Ареал распространения пассатов смещается на север. В полосе, примыкающей к ложбине с юга, место пассатов занимают ветры встречного направления: воздух направлен от экватора в сторону сместившейся к северу экваториальной депрессии. В январе экваториальная депрессия постепенно смещается на юг, но лишь местами заметно смещается в сторону южного полушария, пассаты из северного полушария достигают экватора, сменяя таким образом друг друга. С экватора дует летний муссон – влажная погода с осадками; зимой это пассат соответствующего полушария с соответствующей погодой (мало осадков или их отсутствие).

#### 1.4 Тропические циклоны

Тропические циклоны формируются в зоне над океанами (между 5° и 20°) в обоих полушариях. Тропические циклоны меньше внетропических,

их диаметр составляет несколько десятков и сотен километров. Горизонтальные градиенты давления и температуры значительны: в среднем 20–30 гПа/100 км и могут достигать 40–55 гПа/100 км. Давление в центре циклона составляет в среднем от 960 до 970 гПа. Система циркуляции воздуха в тропических широтах аналогична таковой во внетропических широтах. Происхождение тропических циклонов менее известно, но их образование связано с высокой термической неустойчивостью воздуха с высокой влажностью. В районе возникновения тропического циклона температура поверхностных вод Мирового океана составляет не менее 26–28°C. При таких температурах воздух становится неустойчивым. Так как температура на поверхности Мирового океана летом и осенью достигает 28°C, тропические циклоны в северном полушарии чаще всего наблюдаются в августе-октябре, а в южном полушарии - в декабре-марте. Зимой тропические циклоны вообще не обнаруживаются.

В зависимости от скорости вращения воздуха тропические циклоны делятся на: тропические штормы (18–33 м/с) и тропические ураганы (более 33 м/с). Скорость движения тропического циклона значительно ниже скорости движения циклонов внетропических широт.

Тропические циклоны имеют разные названия в зависимости от того, где они происходят:

- ✓ тайфун - Тихий океан;
- ✓ ураган - Северная Атлантика;
- ✓ шторм - Индия;
- ✓ вилли-вилли - Австралия.

Более слабые и сильные волновые возмущения возникают во внутритропической зоне конвергенции и на пассатах, а также внутри пассатного течения. В некоторых случаях эти возмущения усиливаются настолько, что скорость ветра здесь достигает 20 м/с и более.

[<https://studfile.net/preview/5707897/page:3/>]

## Глава 2. Возможные предикторы для прогноза осадков.

### 2.1 ЭНЮК. Природа феномена и влияние на климат

Эль-Ниньо изначально относится к теплым сезонным прибрежным течениям у берегов Перу и Эквадора, возникающим в конце рыболовного сезона. Этот термин в настоящее время обозначает в более широком смысле особое климатическое явление, которое характеризуется аномально высокими температурами воды в восточной части и южной части Тихого океана, представляющими собой расширение на юг теплого Перуанского течения. Он был связан с циклом колебаний глобального атмосферного давления между восточной и западной зонами Тихого океана, называемым Южным колебанием, и эти два явления объединены под названием ЭНЮК (Эль-Ниньо-Южное колебание).

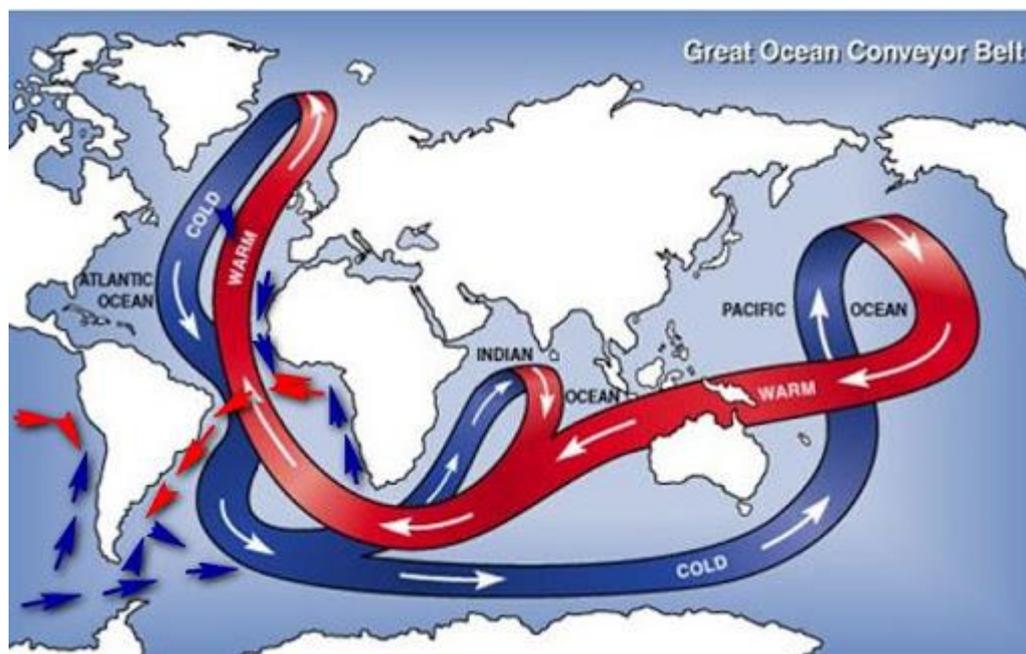


Рисунок 2.1 – Эль-Ниньо и структура океанических течений

Эль-Ниньо является региональным следствием нарушения общей атмосферной циркуляции между полюсами и экватором. Его возникновение смещает области выпадения осадков на восток в Тихом океане и препятствует подъему холодных вод вдоль побережья Южной Америки, отрезая источник питательных веществ для диких животных в этих водах. Без объяснения всех физических взаимосвязей Эль-Ниньо является одной из аномалий циркуляции, которые могут отклонять тропические циклоны от их обычных путей, смещать области осадков и засух, а также локально изменять уровень моря в результате изменения среднего давления. Однако по мере удаления от Тихоокеанского бассейна связь между этими эффектами становится более слабой. Эль-Ниньо является частью естественной вариации погоды на Земле. Это явление вызывает глобальные изменения в погоде, включая экстремальные погодные условия, изменения температуры и осадков. Влияние Эль-Ниньо на осадки в Африке может быть достаточно значительным. Во время Эль-Ниньо, теплые поверхностные воды Тихого океана смещаются к западу, что может вызвать сильные дожди и наводнения в ряде африканских стран, включая восточную и южную Африку, а также в Индийском океане. В то же время в западной и центральной части Африки может возникнуть засуха, поскольку снижается количество осадков. Увеличение количества осадков на восточном побережье континента можно наблюдать особенно ярко весной и осенью, а также в небольшой степени зимой.

Восточный тропический Атлантический океан по своей особой геометрии (Гвинейский залив) является вместилищем опресненных и теплых вод, которые постоянно скапливаются в этом регионе, то есть скопление теплых вод происходит как на востоке, так и на западе. Это важное отличие от восточной части Тихого океана, где этой особенности нет. Таким образом, в части Гвинейского залива, примерно между экватором и 5° южной широты и между 0° и 20° запад.долготы холодная вода в Атлантике бывает только в течение короткого периода года (с июня по сентябрь). Таким образом, в восточной части экваториальной Атлантики

почти девять месяцев в году преобладают теплые воды. Но, в отличие от истинного Эль-Ниньо Тихого океана, которое происходит всего на несколько недель в Рождество, а в отдельные годы дольше и поэтому имеет почти постоянно теплые воды, теплые воды восточной экваториальной Атлантики являются неотъемлемой частью ее сезонного цикла.

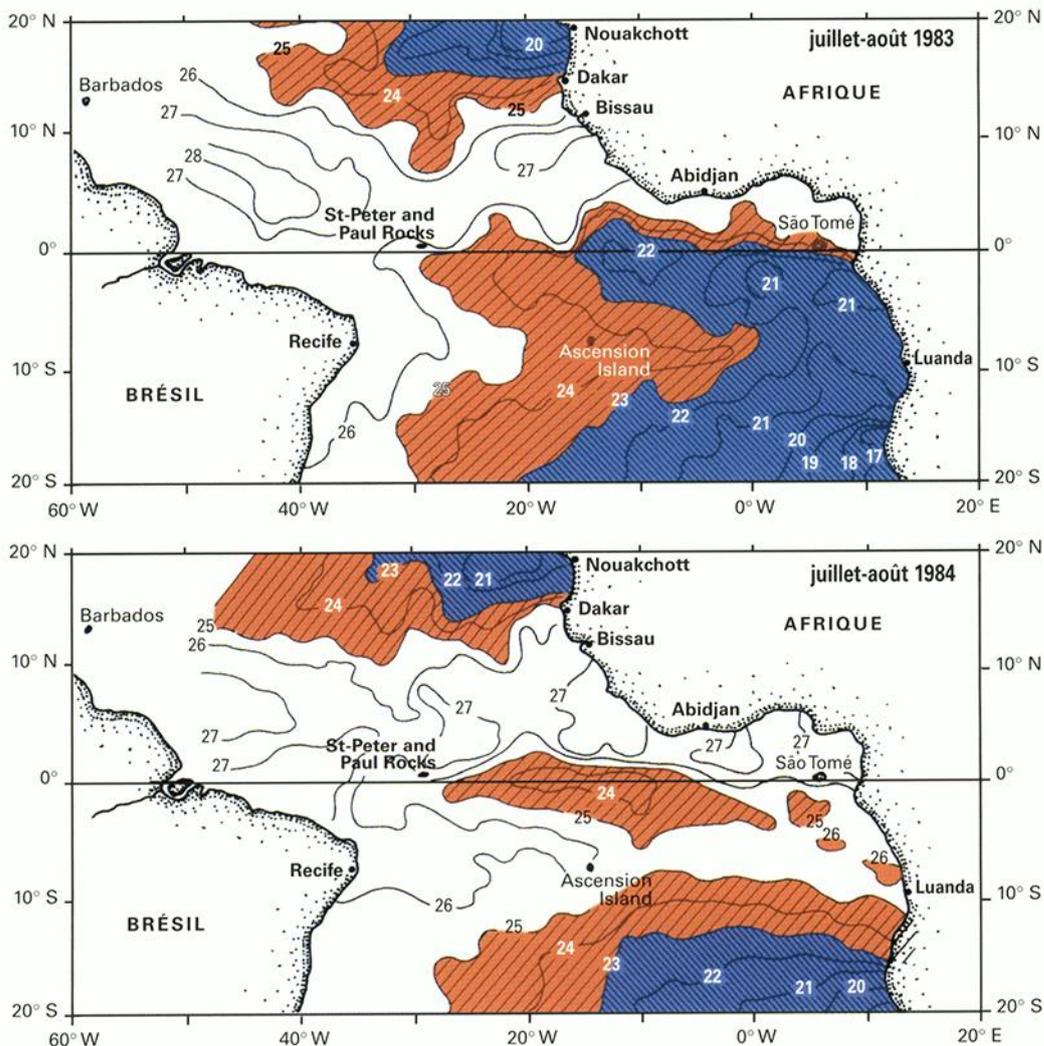


Рисунок 2.2 – Температура поверхности межтропической части Атлантического океана в июле-августе 1983 г. (вверху) и в июле-августе 1984 г. (внизу). В июле-августе 1984 г. холодные воды экваториального апвеллинга, продолжающего Бенгельское течение (обозначены синим цветом), исчезли, заместившись аномально теплыми водами. Эта ситуация очень похожа на ту, что преобладает в Тихом океане во время Эль-Ниньо. Это атлантическое «теплое событие» 1984 г. является отражением Эль-Ниньо 1982-1983 гг.

Именно южноамериканские рыбаки дали этому явлению название Эль-Ниньо, имея в виду младенца Иисуса, потому что оно появляется вскоре после Рождества. В обычное время (называемое Ла-Нинья) побережья Чили, Перу и Эквадора омываются холодным течением, направленным на север, и омываются морскими пассатами, которые дуют с юго-востока на северо-запад. Последние вытесняют с берега остаточные теплые поверхностные воды замещаются поднимающимися холодными водами с глубины, это явление известно как апвеллинг. Эти воды, поступающие с глубины от 100 до 200 м, богаты питательными веществами (главным образом азотом и фосфором) и способствуют сильному развитию планктона, привлекающего рыбу, птиц и способствующего рыболовству.

Ежегодно вскоре после Рождества и до апреля слабое обратное прибрежное течение начинает двигаться и течет на юг. Через неравные промежутки времени это течение Эль-Ниньо становится сильнее и идет дальше на юг. Холодные воды сменяются более теплыми, и у берегов исчезает рыба, что сильно сказывается на активности рыбаков. В тот же период в прибрежных районах северного Перу и Эквадора, где обычно выпадает мало осадков, выпадают обильные осадки. Таким образом, год Эль-Ниньо считался для сельского хозяйства в этих регионах годом изобилия.

В 1990-х годах была подчеркнута корреляция между теплым периодом и краткосрочным глобальным изменением климата. Одним из полученных результатов является открытие распространения Эль-Ниньо в тропических районах Индийского океана и Атлантического океана. Это стало возможным благодаря анализу поверхности этих океанов с более чем 650 000 измерений, сделанных в реальных условиях. Объем используемых данных охватывает период примерно в пятнадцать лет. Циклическое потепление поверхности экваториальной части Атлантического океана наблюдается через двенадцать-восемнадцать месяцев после окончания явления Эль-Ниньо в Тихом океане. Похоже, это пассивная реакция на

изменение атмосферного давления и пассаты (вызванные Эль-Ниньо) в регионе. Эта реакция Атлантического океана на сегодняшний день до конца не объяснена, но, как правило, показывает распространение в глобальном масштабе последствий Эль-Ниньо.

В настоящее время считается, что Эль-Ниньо имеет глобальные последствия во всех трех основных тропических океанах. Это должно облегчить объяснение возмущений климата по всей планете. Изменения температуры океана могут в локальном масштабе изменить абсолютную влажность атмосферной циркуляции, что приведет к увеличению количества осадков в прилегающих регионах с последствиями в Тихоокеанском регионе и, в меньшей степени, в остальном мире. Эти эффекты становятся более значительными, более частыми и продолжительными по мере того, как энергия, хранящаяся в атмосфере и море, увеличивается вместе с температурой из-за глобального потепления.

Эль-Ниньо представляет собой пространственно-временную взаимосвязь между океаном и атмосферой: температура поверхности моря влияет на ветры и осадки, вызывая тем самым значительные циркуляционные перестройки. Так, Эль-Ниньо 1982-1983 гг. имел катастрофические последствия в Эквадоре и на севере Перу, где за шесть месяцев выпало около 250 см осадков. Далее тайфуны двигались на Гавайи или Таити, где также принесли с собой значительные потрясения.

Дальние связи этого явления влияют на метеорологические характеристики самых отдаленных регионов земного шара за счет смещения зон тропических дождей и воздействия на ветровую структуру по всей планете.

В тропиках образовавшиеся таким образом ветры будут определять положение муссонов и треки циклонов и поясов интенсивных ветров, разделяющих теплые и холодные области на поверхности Земли. Во время явления Эль-Ниньо зона дождей с центром в Индонезии смещается на восток в сторону центральной части Тихого океана, воздействуя на волны,

присутствующие в верхних слоях атмосферы в течение нескольких лет, и вызывая каскадные климатические аномалии над другими регионами земного шара.

В умеренной зоне климатические эффекты Эль-Ниньо более выражены зимой, например, более мягкие зимы на западе Канады и северо-западе США и дождливые зимы на юге США (от Техаса до Флориды). ЭНЮК также влияет на погоду в другие времена года. Однако Эль-Ниньо — лишь один из многих факторов, влияющих на умеренный климат. Так, например, Эль-Ниньо 1997 года вызвала засуху и лесные пожары в Индонезии, проливные дожди в Калифорнии и наводнения на юго-востоке США. Предполагаемая средняя глобальная приземная температура повысилась на суше и на море. В конце декабря 1997 года рекордный шторм вынес до 25 см снега на юго-востоке Соединенных Штатов. К югу от Сан-Франциско разбивались волны высотой до 4 метров, во Флориде бушевали сильные шторма (торнадо достигали скорости 400 км/ч). По данным ООН, Эль-Ниньо стал причиной нескольких тысяч смертей и ранений в 1997-1998 гг. и нанес ущерб в размере от 32 до 96 миллиардов долларов. В июне 2002 г. Эль-Ниньо ощущался в тропических районах Южной Америки. Сильнейшие за восемь десятилетий грозы обрушились на Чили, а в конце декабря Австралия пострадала от сильнейшей за столетие засухи (известной как «суперсухая»). Смертельные штормы обрушились на западное побережье США в течение пяти дней с сильным ветром и проливным дождем.

В 2014 году Тихий океан был аномально теплым. В начале 2015 г. самое теплое ядро перемещается к западному побережью Южной Америки (подталкиваемое западной циркуляцией), а в августе 2015 г. температура моря подтверждает новый эпизод Эль-Ниньо, входящий в четверку самых интенсивных с 1950 г.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (FAO), в 2016 году это явление снова стало особенно

заметным и оставило 3,5 миллиона человек в ожидании гуманитарной помощи. 2017 год классифицируется как «не связанный с Эль-Ниньо» в Докладе о состоянии климата (опубликованном в середине 2018 года), но, тем не менее, это самый теплый год из когда-либо измеренных для «нейтрального Эль-Ниньо» года.

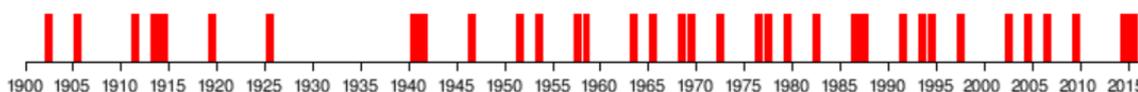


Рисунок 2.3 – Хронология лет с событиями Эль-Ниньо (с 1900 по 2016 год)

Пока нет единого мнения о влиянии или степени влияния антропогенного изменения климата с точки зрения частоты, силы или продолжительности явлений Эль-Ниньо, но исследования более сильных явлений Эль-Ниньо, более продолжительных, коротких или слабых могут пролить свет на эти вопросы. Общепринятая точка зрения на это явление такая: это явление существовало не всегда, но явления Эль-Ниньо происходили на протяжении тысячелетий. Например, они повлияли на культуру мачу (доинкская доколумбовая культура Перу), которая приносила в жертву людей, чтобы избежать чрезмерно сильных дождей. Крупные явления ЭНЮК были отмечены в 1790–1793, 1828, 1876–1878, 1891, 1925–1926, 1972–1973, 1982–1983, 1997–1998 и 2014–2016 годах. С 1900 года произошло не менее 30 явлений Эль-Ниньо, из которых события 1982–1983, 1997–1998 и 2014–2016 годов являются одними из самых сильных за всю историю наблюдений. С 2000 по 2018 г. наблюдалось 5 явлений Эль-Ниньо: в 2002–2003 гг., 2004–2005 гг., 2006–2007 гг., 2009–2010 гг. и событие 2014–2019 гг.

Аномалия возникает нерегулярно (каждые два-семь лет). Он длится от девяти месяцев до двух лет. Средний интервал составляет пять лет; когда потепление длится от семи до девяти месяцев, в этом случае можно говорить об «условиях Эль-Ниньо», а когда оно длится более девяти месяцев, говорят уже об «эпизоде Эль-Ниньо».

Самым старым записям о явлении Эль-Ниньо 130 000 лет, и они были получены из ископаемых кораллов в Папуа-Новой Гвинее. Однако моделирование климата предполагает, что ЭНЮК существовало с плиоценового периода (5,3–2,6 млн лет назад). Палеоклиматические реконструкции активности Эль-Ниньо направлены на проверку того, была ли активность этого явления (его частота и интенсивность) чувствительна к прошлым глобальным изменениям климата, что помогло бы предсказать его реакцию на антропогенное изменение климата.

Существуют различные методы поиска древних следов активности Эль-Ниньо. Самый простой состоит в том, чтобы по геохимическим показателям (таким, как изотопы кислорода), измеряемым вдоль оси роста ископаемых кораллов или моллюсков, реконструировать ежемесячные колебания температуры воды в эпоху, в которую жили эти организмы. Самые последние результаты показывают, что активность ЭНЮК переживала период очень низкой активности в центральной и восточной части Тихого океана 6000–3000 лет назад. Анализ раковин ископаемых моллюсков из археологических раскопок в Перу показывает, что текущая активность ЭНЮК является самой высокой за весь голоцен (последние 10 000 лет).

Пагубным эффектом является временное исчезновение многих видов рыб к западу от северного побережья Южной Америки, но везде, где изменение климата является длительным и значительным, экосистемы могут быть затронуты, особенно там, где лесные пожары, бури, засухи или, наоборот, наводнения бывают более интенсивными и необычайно продолжительными. Рыболовство, сельское хозяйство, лесное хозяйство, охота и т. д. могут быть менее продуктивным. Эпизодические аномальные потрясения Эль-Ниньо ускоряют деградацию видов или местообитаний, ставших уязвимыми в результате загрязнения или их чрезмерной эксплуатации человеком (в частности, коралловых рифов). Многие из бедствий, вызванных Эль-Ниньо (например, во внутритропической части

Тихого океана с июля 1982 г. по апрель 1983 г.), также могут иметь вторичные воздействия на окружающую среду.

Кроме того, существуют отсроченные эффекты в пространстве и времени; например: слегка изменяя уровень воды (например, в Индонезии), Эль-Ниньо также может вызвать там гибель кораллов.

Экоэпидемиологические последствия — это распространение болезней, когда колебания Эль-Ниньо благоприятствуют их биологическому переносчику (клещи, комары, мухи и т. д.).

Из-за своего географического положения Эквадор и Перу являются странами, наиболее затронутыми этим явлением, поэтому в Гуаякиле, Эквадор, был создан Международный центр междисциплинарных исследований феномена Эль-Ниньо.

Так, в 2017 г., после необычайно бурного «прибрежного» климатического режима Эль-Ниньо (хуже, чем во время Эль-Ниньо 2015-2016 гг.), проливные дожди в феврале-марте размывали северную часть прибрежной пустыни на севере страны. В 2017 г. там произошли катастрофические наводнения (по меньшей мере 113 погибших и около 40 000 домов разрушенных).

Чтобы предвидеть риски и повысить экологическую и социально-экономическую устойчивость этих территорий, ученые стремятся понять, как засушливые экосистемы этих регионов адаптировались к циклам десятилетий без обильных дождей, чередующихся с короткими периодами проливных дождей, за которыми следует период озеленения. Дожди имеют катастрофические последствия для населения, которое не подготовлено к ним, но являются источником жизни для пустыни.

Эль-Ниньо возникает в результате периодического атмосферного смещения циркуляции Уокера. Это смещение, до сих пор плохо объясненное, изменяет ход морского течения, размеры которого сравнимы с величиной, сравнимой с той, что в полтора раза больше, чем у

Соединенных Штатов. Встречается исключительно в отдельные годы (в среднем один-два раза в декаду) вдоль перуанского побережья примерно в декабре-январе. Эль-Ниньо вызывает заметное усиление юго-восточных пассатов, что приводит к скоплению теплых вод в западной части Тихого океана, вызывая повышение уровня моря у берегов Австралии и относительное понижение вдоль побережья. Затем, как только южные ветры ослабевают, «теплые» воды западной части Тихого океана вторгаются в воды восточной части Тихого океана. Это начало явления Эль-Ниньо. Последнее поэтому связано с временным и очень выраженным ослаблением антициклона острова Пасхи, присутствующего в средней части Тихого океана, что снижает силу юго-восточных пассатов. Массовый рефлюкс теплых вод, накопившихся в западной части южной части Тихого океана, на восток действует по принципу сейшевого эффекта.

Эль-Ниньо обычно длится около восемнадцати месяцев. Затем холодные воды достигают запада, завершая эпизод, за которым может последовать обратная ему Ла-Нинья: атмосферное давление на западе Тихого океана начинает расти, а на востоке падать. Это ускоряет приземные ветры с востока на запад, от Перу до Индонезии, где они уменьшаются в период Эль-Ниньо.

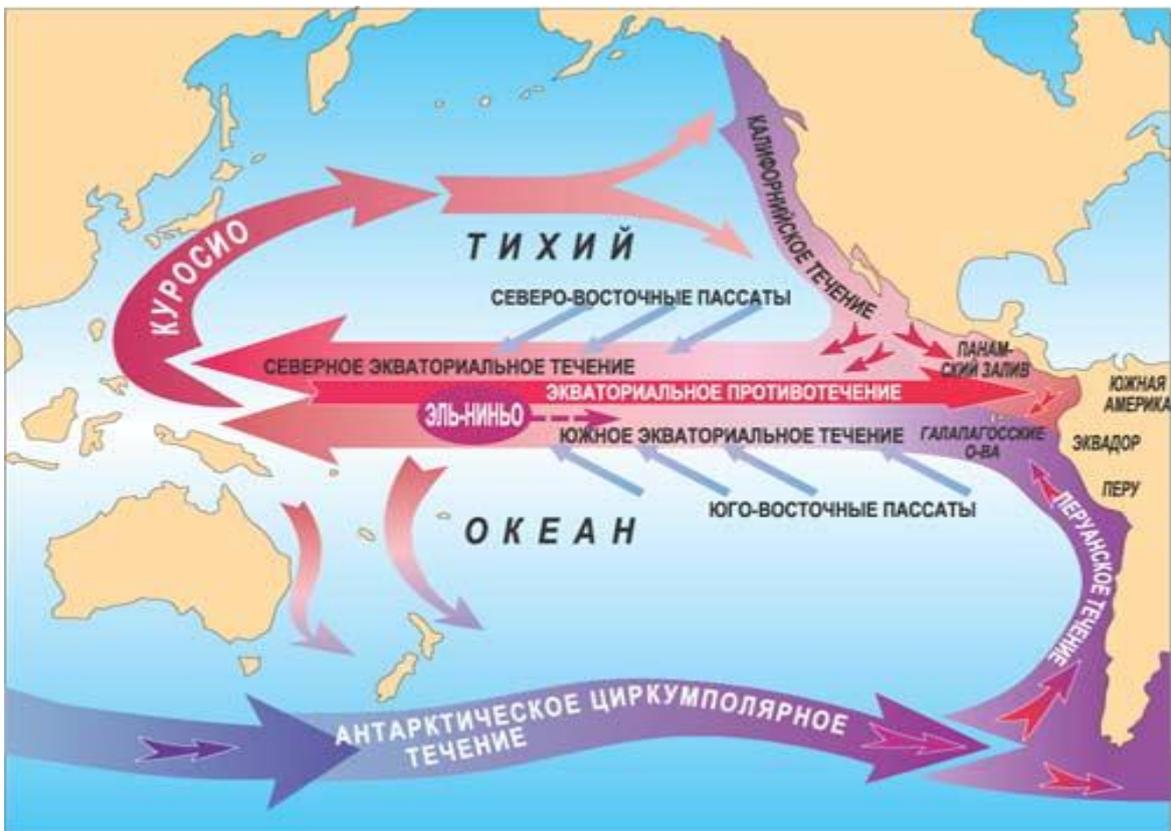


Рисунок 2.4 – Антарктическое Циркумполярное Течение.

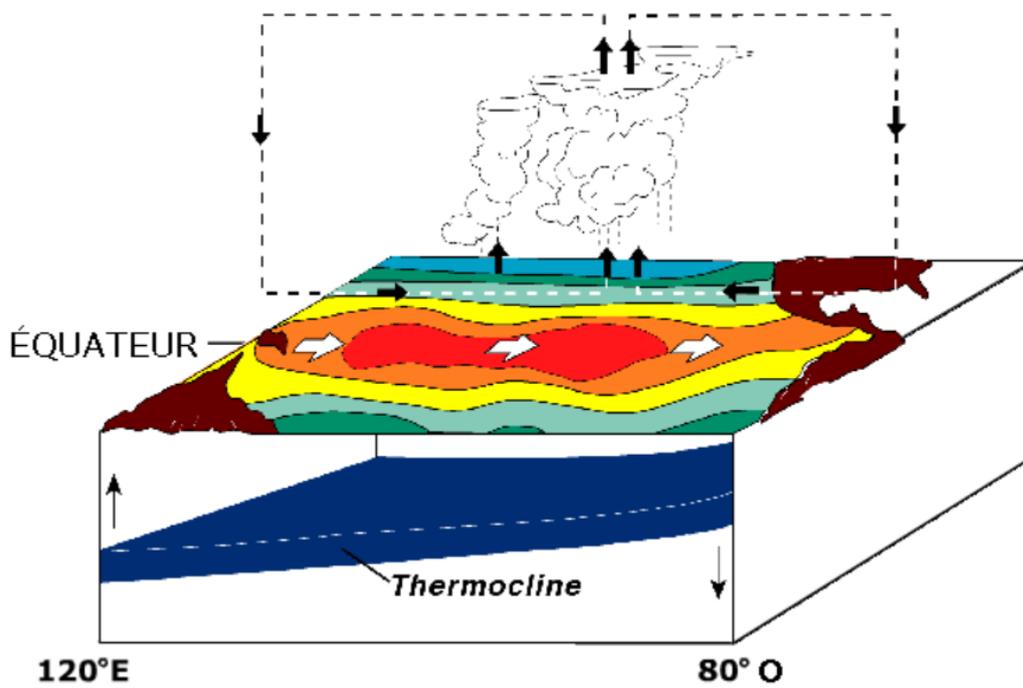


Рисунок 2.5 – Нарушение в ячейке Уокера при событиях Эль-Ниньо.

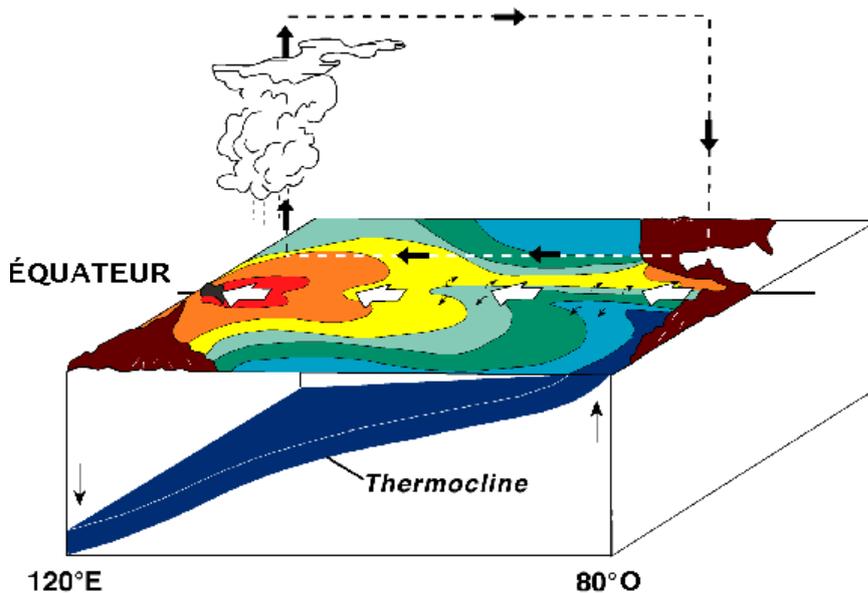


Рисунок 2.6 – Усиление ячейки Уокера при событиях Ла-Нинья.

У явления Эль-Ниньо есть несколько фаз:

1. Собственно фаза Эль-Ниньо
2. Нейтральная фаза
3. Фаза Ла-Ниньо

### 2.1.1 Характеристики Эль-Ниньо

#### *Индекс Эль-Ниньо*

Для характеристики Эль-Ниньо – Южное колебание обычно используют индекс Южного (ENSO). Он представляет нормированную разность приземного давления между о. Таити и портом Дарвин (Австралия). Индекс Южного колебания характеризует количественное изменение давления между устойчивыми областями повышенного и пониженного давления в экваториальной части Тихого океана. С 1985 года, индекс, который характеризовал холодные и теплые эпизоды Эль-Ниньо Южное Колебание, стали рассчитывать, как аномалию температуры

поверхности океана в определенных тропических районах Тихого океана. Со временем было выявлено, что проявления холодной и теплой фаз Эль-Ниньо Южного колебания замечены в аномалиях климата и погоды не только над тропической зоной Тихого океана, но и во внетропических широтах. Этому способствуют дальние связи системы океан-атмосфера. Именно за счет механизма далекодействующих связей это феномен оказывает воздействие на многие районы Земли, и, также, определяет особенности погодных режимов. К основной проблеме Эль-Ниньо относят нерегулярность и непериодичность этого явления. Пространственно-временная структура Эль-Ниньо — Ла-Нинья в районе юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО) близка к структуре изменений земного климата за последние десятилетия. Так как воды Мирового океана считаются одним из основных факторов, который определяет состояние глобальной системы климата, то есть её региональную изменчивость следует рассматривать в качестве приоритетной. Эль-Ниньо Южное колебание описывает сложную взаимосвязанную систему океанских течений и циркуляции атмосферы Земли в экваториальной части Тихого океана. Эль-Ниньо обозначает океанические связи, а Южное колебание или Южное колебание обозначает атмосферные связи.

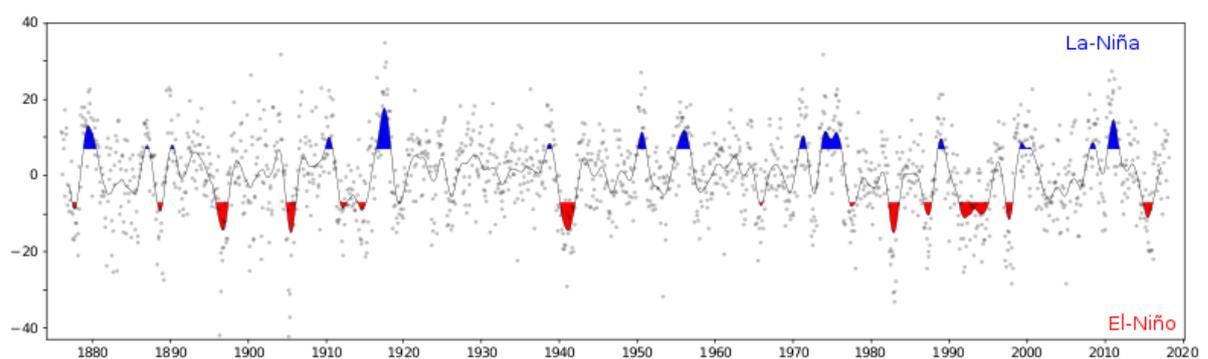


Рисунок 2.7 – Индекс южного колебания с 1876 г., явления Эль-Ниньо обозначены красным цветом ниже центральной оси .

Индекс MEI.

Один из самых популярных индексов ENSO - это индекс (MEI). MEIv2 - это вторая версия MEI, которая была разработана на основе данных, полученных в период с 1950 по 2019 годы. Этот индекс представляет собой временной ряд ведущей комбинированной эмпирической ортогональной функции (EOF) пяти различных переменных (давление на уровне моря (SLP), температура поверхности моря (SST)), зональной и меридиональной составляющих приземного ветра и уходящей длинноволновой радиации (OLR)) над тропическим бассейном Тихого океана (30°ю.ш.-30°с.ш. и 100°в.д.-70°з.д.). EOF рассчитываются для 12 перекрывающихся двухмесячных «сезонов» (декабрь-январь, январь-февраль, февраль-март, ноябрь-декабрь), чтобы учесть сезонность ЭНЮК и уменьшить влияние более высокой частоты внутри сезонных колебаний. изменчивость.

Данные уже рассчитанного индекса MEI брались в Центре прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's – NOAA).

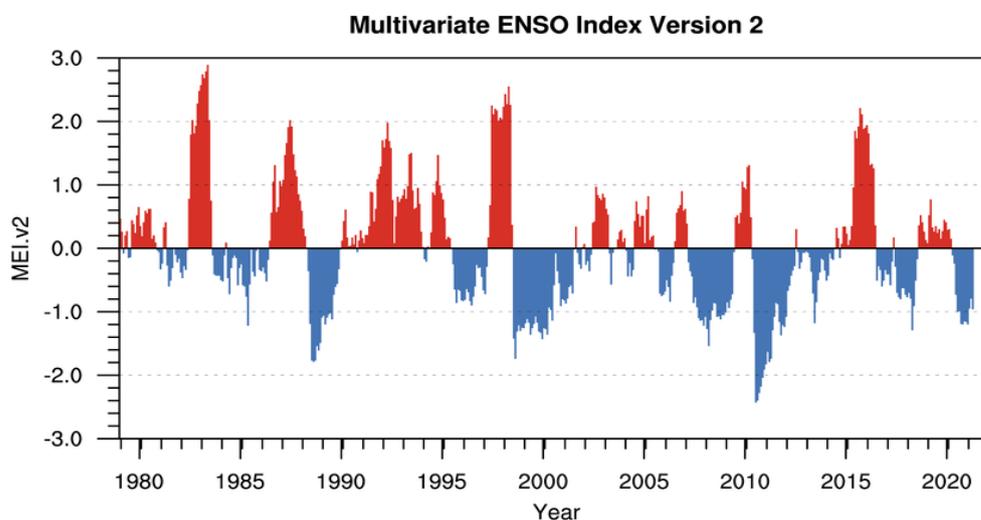


Рисунок 2.8 – Индекс MEI v2

MEI, который объединяет как океанические, так и атмосферные переменные, позволяет с помощью единого индекса оценить ЭНЮК. В частности, он дает показания интенсивности ЭНЮК в режиме реального

времени, а посредством исторического анализа - обеспечивает контекст для значимого сравнительного изучения меняющихся условий.

## 2.2 Азорский антициклон

Азорский максимум — это обширная область высокого атмосферного давления, не постоянно возникающего в абсолютно любые месяцы года, на определенной части субтропического пояса с центром вблизи Азорских островов Атлантического океана, из-за чего ЦДА и получил свое название. Этот антициклон является постоянным явлением, которое наблюдается в течение всего года, но наиболее сильно проявляется в летний и осенний периоды. Азорский антициклон образуется благодаря горячим и сухим воздушным массам, которые образуются в районах над Атлантическим океаном. Эти массы воздуха движутся к северо-востоку и устремляются к Азорским островам, где они сталкиваются с холодными воздушными массами. Это приводит к образованию антициклона - области высокого атмосферного давления, которая достигает максимальной интенсивности в период летней жары. Азорский антициклон оказывает большое влияние на климат Европы и Северной Африки. Он обеспечивает солнечную погоду и высокие температуры во многих регионах этих континентов, но также может вызвать засуху и повышенный риск лесных пожаров. В период зимних штормов, Азорский антициклон может перемещаться на юг и вызывать сильные ветры и дожди в Северной Африке, а также на юге Европы и в средиземноморском регионе.

## Глава 3 Исходные данные, методы расчета.

### 3.1 Исследуемая территория.

Исследуемая территория представлена на рисунке 3.1: исследовался режим осадков на все Африканском континенте, особое внимание при этом уделялось западной и центральной Африке.

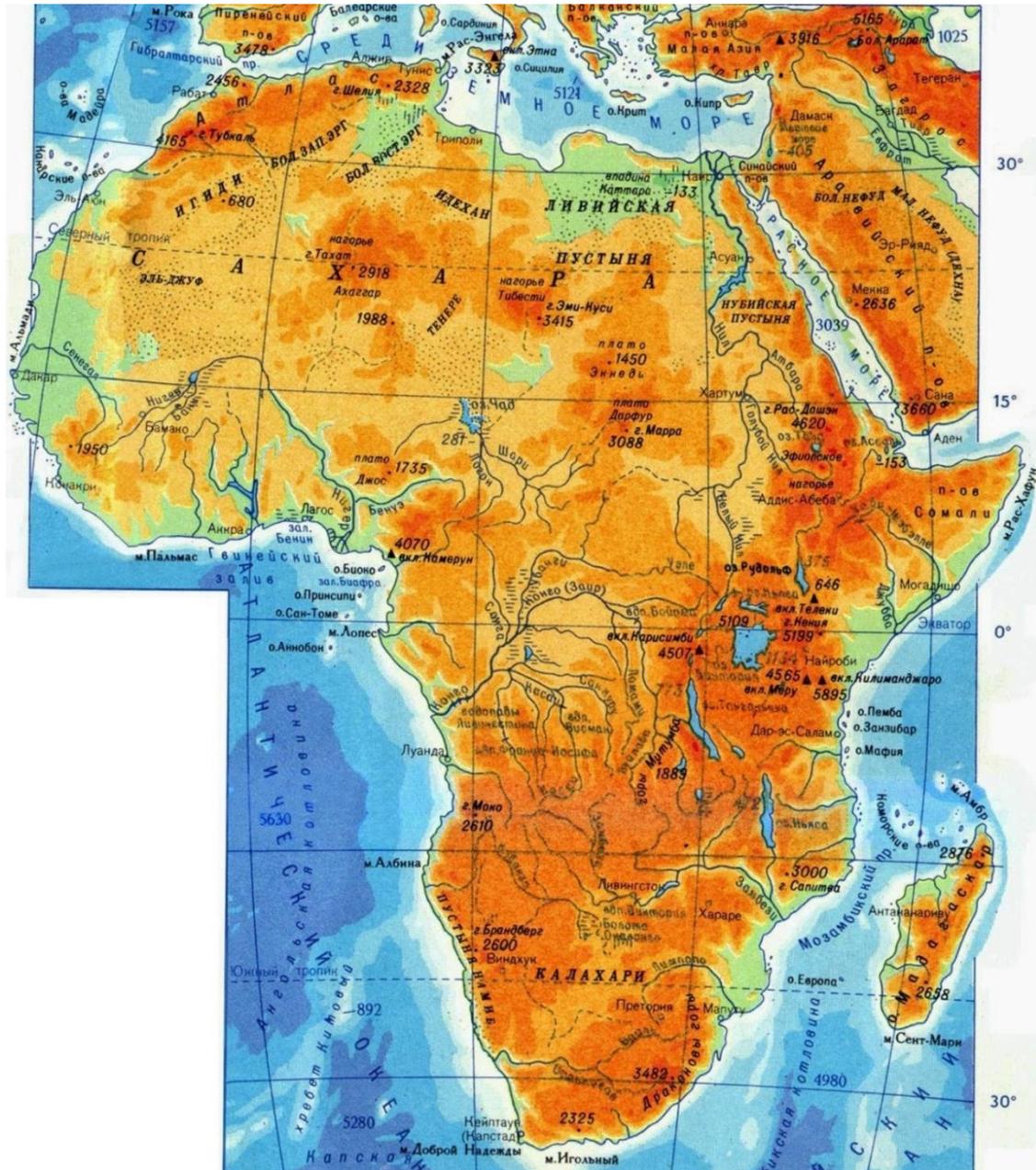


Рисунок 3.1 – География исследуемого региона

## 3.2 Методы расчета

### 3.2.1 Climate Data Operators (CDO)

Все расчеты производились в Climate Data Operators (CDO). Это программное обеспечение представляет собой набор команд (в командной строке) для анализа климатических данных и манипуляций с форматами данных. CDO предоставляет более 600 операторов для анализа и обработки климатических данных. Данные могут быть представлены в форматах netCDF3/4, GRIB1/2 EXTRA MPO. Кроме того, CDO легко компилируется на операционных системах, совместимых с Posix, таких как IBM AIX, HP-UX, Sun Solaris, а также на большинстве дистрибутивов Linux, BSD и cygwin. Это позволяет использовать CDO как на ПК общего назначения, так и на высокопроизводительных кластерах на базе Unix.

Для данных с 1991 по 2020 год с помощью cdo были рассчитаны сначала сумма осадков, затем нормы. Скрипты представлены на рисунке ниже.

```
path='/data0/home/141/africa/enok/output/link/'

for y in $(seq 1991 2021);
do
    echo $y

    for m in $(seq 1 12);
    do
        echo $m

        cdo timsum $path$y'_'$m.nc summ_$y'_'$m.nc
    done
done
```

Рисунок 3.2 – Код для расчета суммы осадков

```

for m in $(seq 1 12);
do
    echo $m

    cdo -b 64 mergetime 'summ_1991_'$m.nc 'summ_1992_'$m.nc 'summ_1993_'$m.nc 'summ_1994_'$m.nc 'summ_1995_'$m.nc 'summ_1996_'$m.nc
    'summ_1997_'$m.nc 'summ_1998_'$m.nc 'summ_1999_'$m.nc 'summ_2000_'$m.nc 'summ_2001_'$m.nc 'summ_2002_'$m.nc 'summ_2003_'$m.nc
    'summ_2004_'$m.nc 'summ_2005_'$m.nc 'summ_2006_'$m.nc 'summ_2007_'$m.nc 'summ_2008_'$m.nc 'summ_2009_'$m.nc 'summ_2010_'$m.nc
    'summ_2011_'$m.nc 'summ_2012_'$m.nc 'summ_2013_'$m.nc 'summ_2014_'$m.nc 'summ_2015_'$m.nc 'summ_2016_'$m.nc 'summ_2017_'$m.nc
    'summ_2018_'$m.nc 'summ_2019_'$m.nc 'summ_2020_'$m.nc 'summ_2021_'$m.nc 'norma/merge_'$m.nc
    cdo timmean 'norma/merge_'$m.nc 'norma/norma_'$m.nc
done

```

Рисунок 3.3 – Код для расчета норм осадков

Вышеуказанным способом были рассчитаны суммы осадков и их нормы. Далее, были попытки изучить возможные предикторы для прогноза ВЗК. Для этого индексы MEI, а также характеристики азорского антициклона с помощью программы на языке Fortran были представлены на сетке (рисунок 3.4).

```

integer, parameter :: n=1751, m=3601
integer y, i
real v(n,m), v1

open(1, file='azpl2dol.txt')
open(2, file='mei.bin', form='binary', access='direct', recl=n*m*4)

print*, " read and write"

do i=1, 31 !количество лет
    read(1, *) y, v1
    v(:, :) = v1
    print*, i, maxval(v)
    write(2, rec=i) v(:, :)
enddo

close(1)
close(2)

!test

open(2, file='mei.bin', form='binary', access='direct', recl=n*m*4)
print*, " test"

do i=1, 31 !количество лет
    read(2, rec=i) v
    print*, i, maxval(v)
enddo

end

```

Рисунок 3.4 – Код для перерасчета одномерного массива в двумерный (на сетке)

Полученный файл преобразовывался в формат netCDF.

```

rm a.out *.bin &> log
ifort ascii_1d_tobin_2d.f90
./a.out

rm nao.nc &> log
cdo -f nc import_binary nao.ctl meiv_1.nc #ВЫХОДНОЙ файл
cdo infov meiv_1.nc #ВЫХОДНОЙ файл

```

Рисунок 3.5 – Код для преобразования бинарного файла в файл формата \*.nc

После чего были рассчитаны коэффициенты корреляции (рисунок 3.4)

```

for m in $(seq 1 12);
do
    echo $m
    cdo -b 64 timcor 'merge/merge_'$m.nc 'az_sh/Iazp'$m'sh'.nc 'corshir'$m$
done

```

Рисунок 3.6 – Код для расчета корреляции

Все коэффициенты корреляции оценивались на значимость F-статистикой Фишера (с 5% уровнем значимости).

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} * \frac{f_2}{f_1}, \text{ где} \quad (3.1)$$

$$f_2 = N - f_1 - 1 \quad (3.2)$$

где  $R^2$ - квадрат коэффициента корреляции,  $f_1$ - число степеней свободы тренда (для линейного тренда  $f_1=1$ ),  $f_2$ - число степеней свободы выборки,  $N$ - количество лет в используемой выборке.

Визуализировались только значимые коэффициенты корреляции.

```
for m in $(seq 1 12);
do
    echo $m

    cdo setrtomiss,-0.3,0.3 'corshir'$m$m.nc 'corshir_no'$m$m.nc
    #cdo setmisstoc,0 'corshir_no'$m$m.nc 'corshir_znach'$m$m.nc

done

#rm -rf $'cor_no'$m$m.nc &> log
```

Рисунок 3.7 – Код для вывода значимых коэффициентов корреляции

### 3.2.2 Grid Analysis and Display System (GrADS)

Визуализация всех расчетов производилась в GrADS. Он представляет собой интерактивный инструмент, который позволяет использовать данные на различных сетках и визуализировать их, а также обрабатывать данные в форматах NetCDF, GRIB, двоичной и HDF-SDS. GrADS использует 4D среду для данных (долгота, широта, вертикальный уровень и время), а наборы данных описываются в 4D с применением файла дескриптора данных (ctl). GrADS также может работать с сеточными данными на регулярных, гауссовских и переменных сетках. Инструмент включает в себя множество встроенных функций и пользовательские функции могут быть добавлены в качестве внешних процедур на любом языке программирования.

В качестве примера на рисунке представлен скрипт для визуализации коэффициентов корреляции.

```
'reinit'  
  
'set display color white'  
'c'  
'sdfopen cordol_nol212.nc'  
'set grads off'  
'set string 1 tc 4 0'  
'set strsiz 0.16'  
'set font 1'  
'set gxout shaded'  
  
'set lat -40 40'  
'set lon -30 45'  
  
'run color.gs -l 1 0.1 -gxout shaded -var tp -kind navy->aqua->ghostwhite->salmon->red'  
'd tp'  
'draw title CoefCor Precipitation (Dec)/Az (lon) (Dec)'  
#cbarn.gs  
'run cbarn'  
  
'set gxout contour'  
'set cint 0.1'  
'd tp'  
  
'printim cordol_12_lon.png x1280 y960 white'  
  
'c'
```

Рисунок 3.8 – Скрипт для визуализации коэффициентов корреляций

### 3.3 Результаты

С помощью cdo по данным реанализа были рассчитаны среднемесячные поля осадков за новую норму.

Рассмотрим некоторые особенности, выявленные по сезонам.

На рисунке 3.9 представлено среднемесячная сумма осадков за декабрь, январь и февраль. Здесь зона с наибольшим количеством осадков лежит немного южнее ВЗК. Это связано с тем, что за ВЗК на континент продвигаются массы холодного и влажного воздуха. В летнее время, попадая на материк, он приобретает неустойчивость и здесь формируются мощные кучево-дождевые облака с муссонными осадками. Как видно на рисунке 3.9 ВЗК с декабря по январь смещена в летнее полушарие. Максимум осадков при этом наблюдается в январе и наблюдается в районе Демократической республики Конго, Танзании и составляет около 280 мм. Само смещение ВЗК связано с тем, что под влиянием Солнца летом субтропические антициклоны смещаются в более высокие широты, а зимой в низкие. Как видно, смещение над материком гораздо больше, чем над океаном. Над океаном ВЗК практически всегда находится в районе экватора.

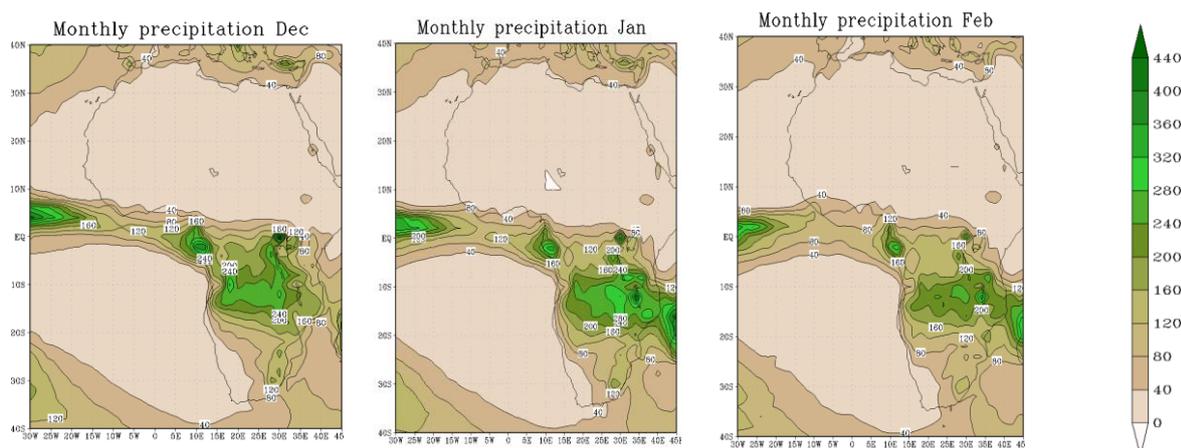


Рисунок 3.9 – Среднемесячное количество осадков с декабря по февраль

Как видно из рисунка 3.10, если в марте ВЗК еще остается в южном полушарии, то в апреле и мае уже смещается в сторону экватора, перемещаясь постепенно в северное полушарие. Количество осадков при этом снижается. В районе Демократической республики Конго и Танзании отмечается максимум приблизительно с 200 мм. В районе Камеруна, Габона, Нигерии отмечается второй максимум, приблизительно с таким же количеством осадков.

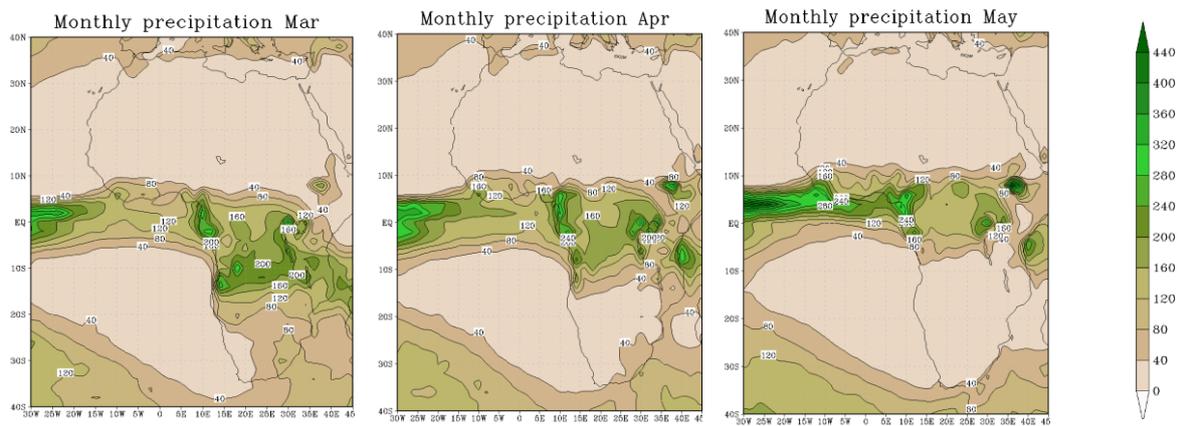


Рисунок 3.10 – Среднемесячное количество осадков с марта по май

На рисунке 3.11 представлено распределение суммы осадков с июня по август. В это время ВЗК перемещается уже полностью в северное (летнее полушарие). На рисунках видно, что в июле-августе ВЗК достигает приблизительно южных границ Сахары. Максимум осадков при этом наблюдается в июле. Наибольшее количество осадков при этом соответствует странам западного побережья Атлантики, а также странам, выходящим на побережье Гвинейского залива, среднемесячная сумма осадков здесь составляет около 440 мм – это максимальное количество за весь сезон. Максимум около побережья объясняется еще и тем, что ВЗК не всегда проникает вглубь континента, а иногда остается на побережье Гвинейского залива. Именно этим и объясняются засухи западной Африки. Таким образом, засушливость отдельных районов надо исследовать с точки зрения положения ВЗК.

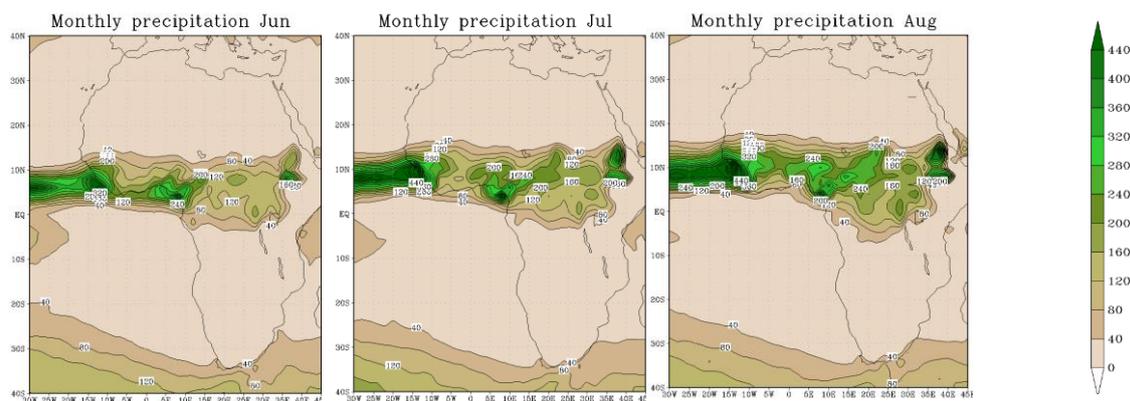


Рисунок 3.11 – Среднемесячное количество осадков с июня по август

На рисунке 3.12 представлены средние суммы осадков с сентября по ноябрь. ВЗК здесь опять плавно движется к южному полушарию. Количество осадков при этом снова уменьшается. Максимум в 280 мм наблюдается в районе Нигерии, Камеруна, Габона.

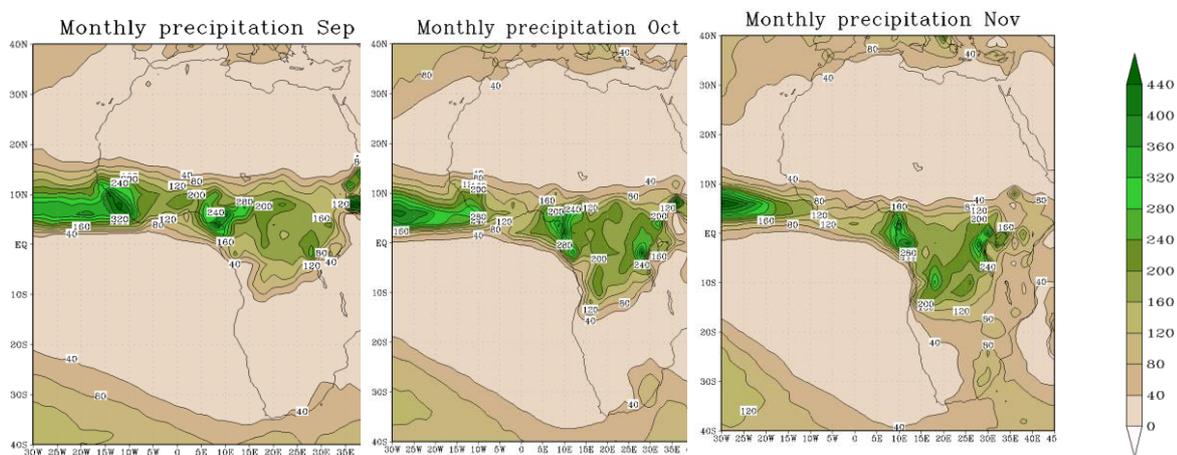


Рисунок 3.12 – Среднемесячное количество осадков с сентября по ноябрь

Таким образом, на основании всего вышесказанного можно утверждать, что засухи в западной и центральной Африке являются причиной задержки продвижения ВЗК вглубь континента.

Поиску предикторов ее положения была посвящена следующая часть работы.

Так, в первую очередь, исследовалось влияние положение Азорского антициклона на количество осадков. Коэффициенты корреляции проверялись на значимость согласно критерию Фишера, изложенному выше. На рисунках ниже представлены только значимые.

Как видно, пока рано говорить о том, что предиктор найден. Большинство коэффициенты корреляции не значимы, что говорит о том, что связь с азорским антициклоном не прямая.

Однако все равно можно сделать ряд интересных предположений (рисунок 3.13). Рассмотрим для примера один из месяцев с максимальным количеством осадков (июнь)

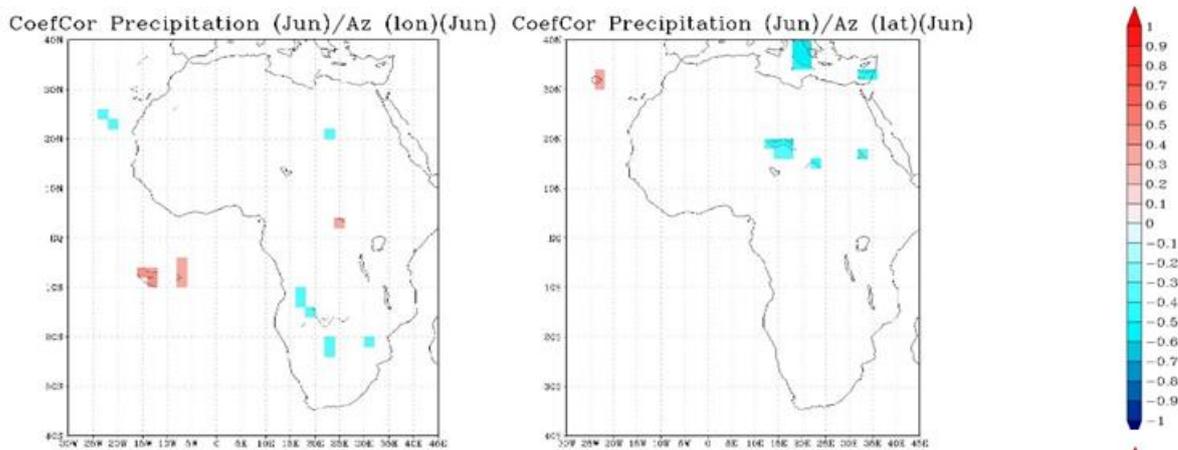


Рисунок 3.13 – Значимые коэффициенты корреляции между среднемесячным количеством осадков в июне и долготой (слева) и широтой (справа) азорского антициклона

Из рисунка выше можно сделать вывод, что чем больше широта азорского антициклона, тем меньше количество выпадающих осадков (отрицательная корреляция между осадками и широтой). Большая широта говорит об аномальном развитии антициклона.

Далее представлены примеры значимых коэффициентов корреляции между среднемесячным количеством осадков и давлением в центре азорского антициклона.

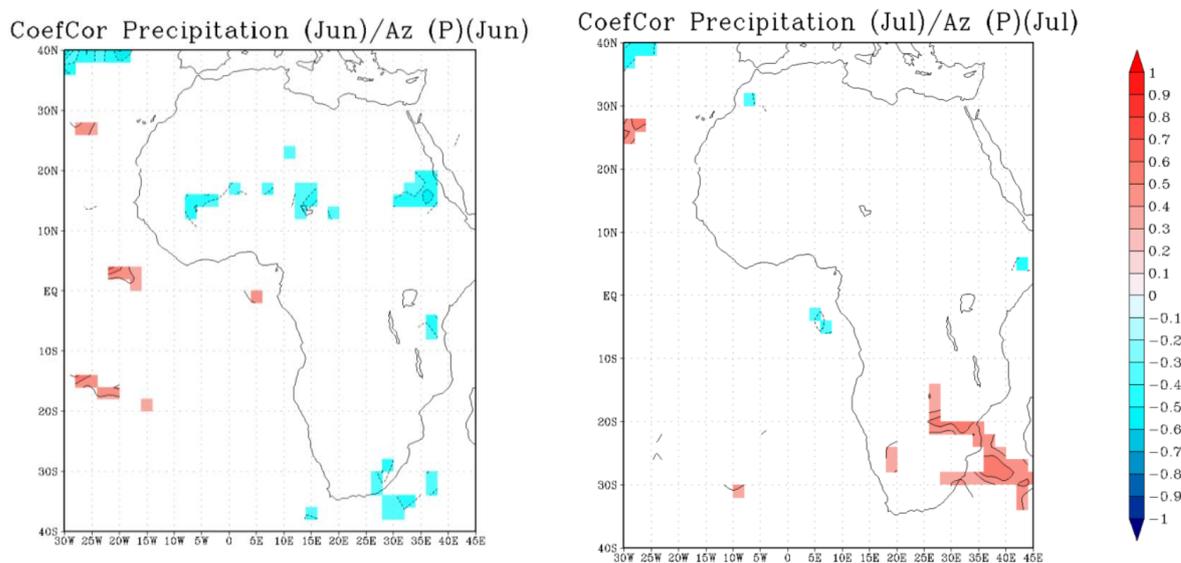


Рисунок 3.13 – Значимые коэффициенты корреляции между среднемесячным количеством осадков в июне (слева) и июле (справа) и давлением в азорском антициклоне

Как видно на примере июня чем выше давление в центре азорского антициклона, тем сложнее летнему муссону проникнуть вглубь континента, соответственно выпадает меньшее количество осадков (отрицательная корреляция между давлением и осадками). Для юга Африки в это время количество осадков достаточно небольшое, поэтому там корреляция ложная. В июле значимые коэффициенты корреляции исчезают, связь неоднозначная.

Далее рассмотрим связь с ЭНЮК (рисунок 3.14)

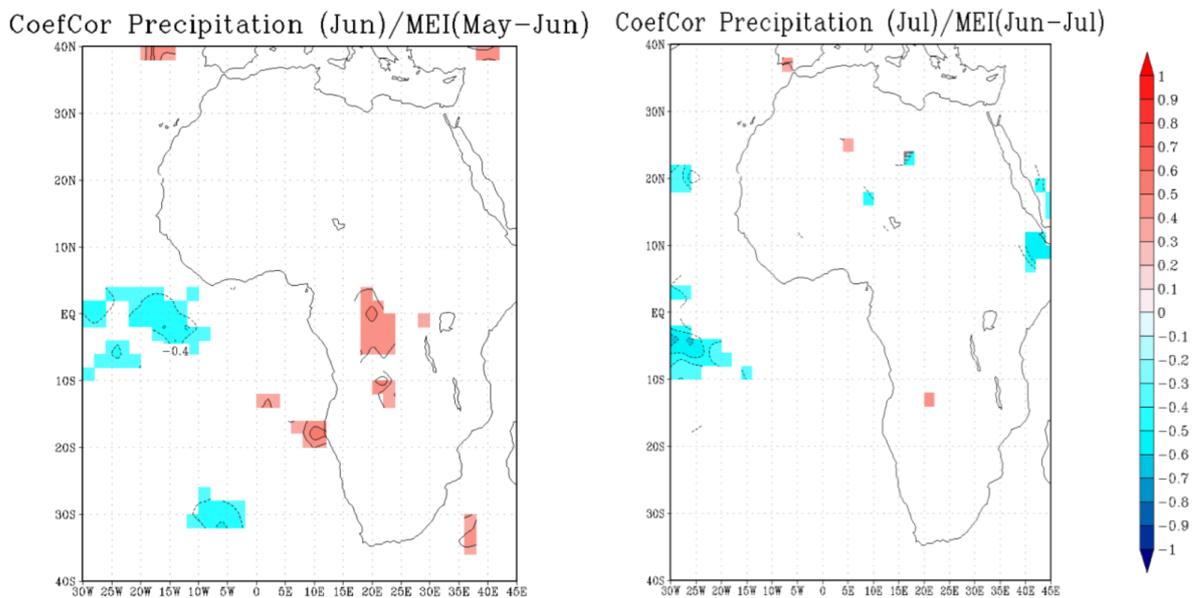


Рисунок 3.14 – Значимые коэффициенты корреляции между среднемесячным количеством осадков в июне (слева) и июле (справа) и индексом MEI

Индекс MEI (Multivariate ENSO Index) измеряет мультивариативную связь El Niño/Southern Oscillation (ENSO) с климатическими параметрами, такими как температура, атмосферное давление, ветер и другие. При положительном индексе наблюдается феномен El Niño, при отрицательном - La Niña.

Как видно, из значительных изменений присутствует только связь с количеством в центральной Африке. Все остальные корреляции можно назвать случайными, так как количество осадков там в принципе не большое.

Связь же с осадками в центральной Африке можно объяснить изменением системы ветров и циркуляции. Так, во время Эль-Ниньо на восточной половине Тихого океана появляется зона низкого атмосферного давления, которая вызывает снижение скорости восточных пассатов на северном полушарии. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению северо-восточный муссонных ветров, которые обычно приносят дожди в Юго-Восточной Азии и осушают значительную часть Африки. В результате этих

изменений африканский континент сталкивается с перераспределением количества осадков.

Значимая положительная корреляция наблюдается, например, для Конго. Такой эффект может наблюдаться, например, за счет образования новых облачных образований из влажного воздуха, приходящего из других регионов. Кроме того, продолжительное ослабление Эль-Ниньо может привести к увеличению количества осадков в регионе.

В целом связь режима осадков и Эль-Ниньо не однозначная. Это связано с тем, что на практике, эффект Эль-Ниньо на режим осадков может быть усилен или ослаблен другими факторами, такими как изменение паттернов ветров и давления, которые могут быть связаны с воздействием других климатических колебаний, например, зональной модой атмосферного давления.

## Глава 4 Заключение.

Режим осадков в Африке обусловлен положением ВЗК. С декабря по январь она смещена в летнее полушарие. Максимум осадков при этом наблюдается в январе и наблюдается в районе Демократической республики Конго, Танзании. Смещение над материком гораздо больше, чем над океаном. Над океаном ВЗК практически всегда находится в районе экватора. В марте ВЗК еще остается в южном полушарии, то в апреле и мае уже смещается в сторону экватора, перемещаясь постепенно в северное полушарие. Количество осадков при этом снижается. В районе Демократической республики Конго и Танзании отмечается максимум. В районе Камеруна, Габона, Нигерии отмечается второй максимум, приблизительно с таким же количеством осадков. С июня по август ВЗК перемещается уже полностью в северное (летнее полушарие), в июле-августе ВЗК достигает приблизительно южных границ Сахары. Максимум осадков при этом наблюдается в июле. Наибольшее количество осадков при этом соответствует странам западного побережья Атлантики, а также странам, выходящим на побережье Гвинейского залива. Максимум около побережья объясняется еще и тем, что ВЗК не всегда проникает вглубь континента, а иногда остается на побережье Гвинейского залива. Именно этим и объясняются засухи западной Африки. Таким образом, засушливость отдельных районов надо исследовать с точки зрения положения ВЗК.

На положение ВЗК оказывает влияние много факторов: так, например, чем больше широта азорского антициклона, тем меньше количество выпадающих осадков (отрицательная корреляция между осадками и широтой). Большая широта говорит об аномальном развитии антициклона. Аномально высокое давление также снижает количество осадков в центральной и западной Африке: чем выше давление в центре азорского

антициклона, тем сложнее летнему муссону проникнуть вглубь континента, соответственно выпадает меньшее количество осадков (отрицательная корреляция между давлением и осадками). Кроме того, есть эффект Эль-Ниньо.

На практике ни один из этих факторов нельзя выявить как доминирующий. Так, эти эффекты могут накладываться друг на друга, каждый из факторов может быть усилен или ослаблен другими факторами, такими как изменение паттернов ветров и давления, которые могут быть связаны с воздействием других климатических колебаний, например, зональной модой атмосферного давления.

В дальнейшем имеет смысл сделать множественную регрессию для выявления сложной связи и динамики режима осадков Африки.

1. Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X. B., Epstein, P. R., and Chivian, E. (2001). Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests. *Glob. Change Hum. Health* 2, 90–104.[doi: 10.1023/A:1015086831467](https://doi.org/10.1023/A:1015086831467)
2. Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., and West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat. Commun.*6:5989.[doi: 10.1038/ncomms6989](https://doi.org/10.1038/ncomms6989).
3. Hanley, D. E., Bourassa, M. A., O'Brien, J. J., Smith, S. R., and Spade, E. R. (2003). A quantitative evaluation of ENSO indices. *J. Clim.* 16, 1249–1258.[doi:10.1175/1520-0442\(2003\)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2).
4. Singularité de la circulation équatoriale, depuis sa découverte par les premiers navigateurs jusqu'à son étude scientifique tardive, et la reconnaissance de son rôle majeur dans la variabilité du climat par les déplacements de masses d'eaux qu'elle opère rapidement le long de l'équateur [Электронный ресурс, <https://books.openedition.org/irdeditions/25559?lang=fr>]
5. Циркуляция атмосферы в низкоширотном звене [Электронный ресурс, <https://studfile.net/preview/5707897/page:3/>]
6. Modulations intrasaisonnères de la mousson D'Afrique de l'Ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme a ndiop (Sénégal): diagnostics et prévisibilité [Электронный ресурс, <https://theses.hal.science/tel-00333234/document> page 15]
7. Modulations intra saisonnières de la mousson D'Afrique de l'Ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme a ndiop (Sénégal): diagnostics et prévisibilité [Электронный ресурс, [https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these\\_Leduc-Leballeur.pdf](https://theses.hal.science/tel-00728272/file/these_Leduc-Leballeur.pdf) page 23]

8. Austria-Zentralanstalt.für-Meteorologie-undGeodynamik (ZAMG)  
[Электронный ресурс, <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/anticyclone-des-acoires#:~:text=L'anticyclone%20des%20Açores%20est,en%20direction%20du%20Pôle%20Nord>]
9. Клименко В. В. Изменение глобального климата: естественные факторы и прогноз // Энергия, 1993, № 2. С. 11-16.