



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

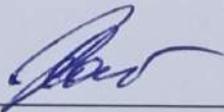
«Изменчивость характеристик Эль-Ниньо»

Исполнитель: Лагушкина Алёна Сергеевна

Руководитель: доктор геогр. наук, профессор Малинин Валерий
Николаевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____


(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«  2024 г.

г. Санкт-Петербург

2024

Содержание

Введение	2
Глава 1. Климатическое описание явления Эль-Ниньо-Южное Колебание	5
1.1 История ЭНЮК. Исторические сведения об Эль-Ниньо	5
1.2 Механизм формирования Эль-Ниньо	13
1.3 Современное состояние изученности явления Эль-Ниньо	24
Глава 2. Исходные данные и статистические методы их обработки	27
2.1 Методы статистического исследования	27
2.2 Этапы статистического исследования, исходные данные	29
Глава 3. Результаты расчетов и их обсуждение	36
3.1 Исследование тренда	36
3.2 Гармонический анализ	40
Заключение	48
Список литературы	52
Приложение 1. Приодограмма по среднемесячным данным индекса Южного колебания за период с 1876 по 2023 гг.	55
Приложение 2. Приодограмма по среднегодовым данным индекса Южного колебания за период с 1876 по 2023 гг.	56

Введение

На погоду и климат сильно влияют взаимодействия между атмосферой и поверхностными океанскими течениями, которые непрерывно перемещают около 10% морской воды. Примерно раз в 3- 8 лет ветры, господствующие над тропической частью Тихого океана, диаметрально меняют направление. Это явление Южное осцилляция -замедляет или обращает вспять проходящие там течения, подавляя апвеллинг богатой питательными веществами глубинной воды у берегов Южной Америки. Аномальные условия сохраняются около 18 месяцев. На западе Америки и Юго-востоке Азии теплые, бедные питательными веществами воды, приносимые Эль-Ниньо, губят фитопланктон, разрушая пищевые сети. Кроме того, усиленное испарение с поверхности океана ведет к катастрофическим ливням, наводнениям и оползням

Изучение этой темы имеет практическую значимость для прогнозирования погодных условий и климатических изменений. Понимание изменчивости Эль-Ниньо может помочь в прогнозировании наводнений, засух, урожайности сельскохозяйственных культур и других аспектов, связанных с климатическими условиями.

Кроме того, изучение этой темы также важно для понимания глобальных климатических процессов и взаимосвязей между океаном и атмосферой. Это способствует разработке более точных климатических моделей и прогнозов на долгосрочную перспективу.

Таким образом, актуальность темы "Изменчивость характеристик Эль-Ниньо" заключается в ее значимости для понимания и прогнозирования климатических изменений, а также в разработке мер для смягчения их возможных последствий.

Основной целью работы является исследование изменчивости характеристик Эль-Ниньо, на основе индекса Южного колебания.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Обзор истории, механизмов формирования и современного состояния изученности явления Эль-Ниньо - Южное Колебание
2. Статистический анализ межгодовой изменчивости индекса SOI
3. Выявление влияния Южного Колебания на изменчивость Эль-Ниньо

Объектом исследования может быть само явление Эль-Ниньо, его характеристики, механизмы возникновения и влияние на климатические процессы в различных регионах мира.

Предметом исследования в дипломной работе является анализ явления Эль-Ниньо и изменчивости его индекса SOI, с целью расширения научного понимания этого явления и его влияния на климатические процессы.

Работа состоит из 3-х глав, введения и заключения.

В первой главе предоставлен обзор самого явления Эль-Ниньо-ЭНЮК, механизм его формирования и современное состояние.

Во второй главе рассматриваются методы для исследования, которые будут использованы в дальнейшем для анализа, определены исходные данные.

Третья глава содержит статистический анализ индекса южного колебания SOI

Практическая значимость работы определяется несколькими аспектами:

1. Прогнозирование и предупреждение чрезвычайных ситуаций: Изучение изменчивости характеристик Эль-Ниньо позволяет развивать более точные методы прогнозирования и предупреждения чрезвычайных погодных явлений, таких как засухи, наводнения, ураганы и другие стихийные бедствия, связанные с этим феноменом.

2. Адаптация к изменению климата: понимание изменчивости Эль-Ниньо помогает разрабатывать стратегии адаптации к изменяющемуся климату, включая планирование сельскохозяйственных работ, управление водными ресурсами, разработку строительных стандартов и другие меры.

3. Экологические последствия: изменчивость Эль-Ниньо влияет на экосистемы океанов и суши, что имеет значение для сохранения биоразнообразия и устойчивого использования природных ресурсов.

Таким образом, изучение изменчивости характеристик Эль-Ниньо имеет практическую значимость для различных областей, включая прогнозирование погодных явлений, адаптацию к изменению климата, управление экономическими рисками и сохранение природной среды

Глава 1. Климатическое описание явления Эль-Ниньо-Южное Колебание

1.1 История ЭНЮК. Исторические сведения об Эль-Ниньо

Область Эль-Ниньо — Южное Колебание (ЭНЮК) представляет собой особую зону в Тихом океане. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону МО, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата. Через атмосферные связи ЭНЮК способна влиять на климат не только в районе Тихого океана, но и на значительные расстояния за его пределами.

Несмотря на долгую историю исследований, механизм формирования и прогноз Эль-Ниньо и Ла-Нинья остается одной из важнейших научных задач наших дней, которая до сих пор не разгадана. Однако, есть уверенность в том, что основной причиной формирования Эль-Ниньо являются пассаты в экваториальной циркуляционной ячейке Уокера. Интенсивность пассатов характеризует Южное Колебание, которое оценивается при помощи индекса SOI (South Oscillation Index). Этот индекс рассчитывается как разность атмосферного давления между островом Таити и городом Дарвин (север Австралии). При высоких положительных значениях SOI (явление Ла-Нинья) пассаты усиливаются, в результате чего происходит накопление более теплых поверхностных вод у побережья Индонезии и снижение атмосферного давления в этом регионе. В это время на восточном побережье океана происходит перемещение вод, увеличивается Перуанский апвеллинг, поверхностные воды охлаждаются, а атмосферное давление вблизи экватора повышается. При отрицательных значениях SOI (явление Эль-Ниньо) происходит обратная

ситуация. Пассаты резко ослабевают, давление над Индонезией повышается, и огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина направляются на восток.

В результате температура поверхностных вод в центральной и восточной части экваториальной зоны повышается на несколько градусов. Большая часть этих вод на восточном побережье океана поворачивает на юг и покрывает область апвеллинга. Поэтому поверхностная температура здесь повышается на 3—5 °С. (рис. 1.1.1 а). Это приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц т. п. [1]

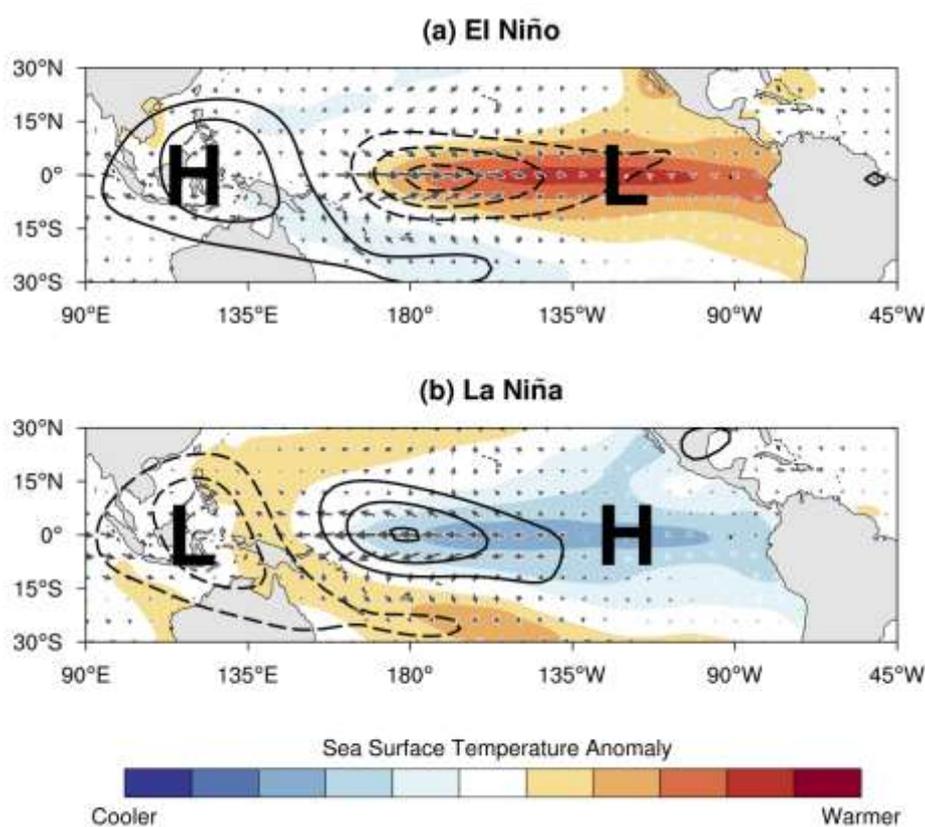


Рисунок 1.1.1 Схематическая диаграмма, показывающая физические механизмы формирования явлений Эль-Ниньо (а) и Ла-Нинья (б). Стрелки показывают направление ветра в приводном слое, Н и L – центры высокого и низкого атмосферного давления. [1]

Эль-Ниньо, также известный как Южное Колебание (ЭНЮК), является одним из важнейших сигналов в изменчивости океана и атмосферы. Это явление проявляется через аномалии погоды и климата не только в тропиках Тихого

океана, но также в других широтах благодаря дальнедействующим связям. ЭНЮК имеет две крайние фазы – теплую (Эль-Ниньо) и холодную (Ла-Нинья).

Эль-Ниньо представляет собой аномальное потепление воды в восточной части экваториальной зоны Тихого океана, от берегов Перу до Линии перемены дат. Как правило явление продолжается около 12-18 месяцев и возникает каждые 3-8 лет. [2]

Southern Oscillation Index (SOI)

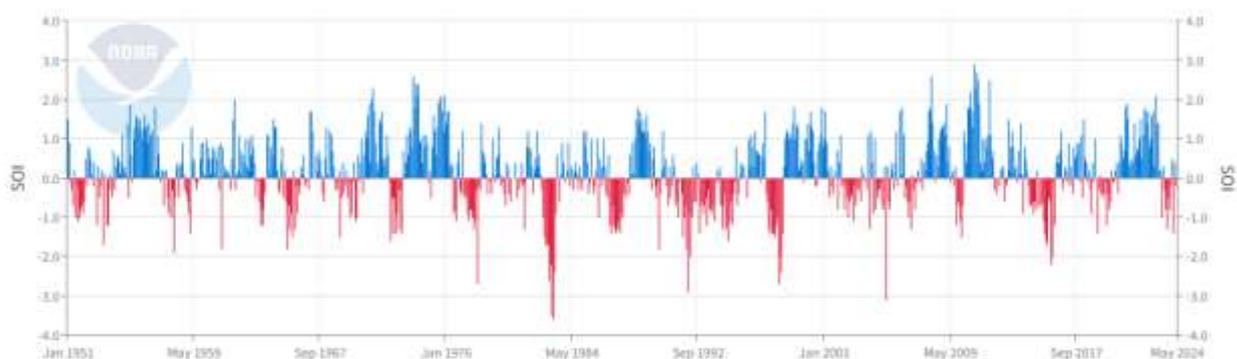


Рисунок 1.1.2 Проявление Эль-Ниньо-Ла-Нинья. [3]

Это явление развивается, когда естественное доминирование северо-восточных пассатов ослабевает, что позволяет более теплой воде в западной части стечь на восток. Событие Ла-Нинья возникает, когда северо-восточные пассаты крепчают, что приводит к охлаждению воды в восточной части.



Рисунок 1.1.3 Эль-Ниньо [4]



Рисунок 1.1.4. Ла-Нинья [4]

Перуанский капитан Каррильо первым сделал официальные записи об Эль-Ниньо. В 1892 году он отметил периодическое появление теплого морского колебания на обычно холодных берегах Перу. Далее, когда в Лиме проходил конгресс Географического общества, он сообщил, что Перуанские моряки уже дали свое название этому явлению: «Эль-Ниньо», поскольку оно наиболее выражено в период Рождества. [5]

Нормальные условия вдоль западного Перуанского побережья характеризуются наличием холодного южного течения, известного как Перуанское течение. Это течение обогащает воду планктоном благодаря процессу, известному как апвеллинг, когда глубинные воды, богатые питательными веществами, поднимаются к поверхности. Это создает условия для высокой океанической продуктивности, так как планктон служит основой пищевой цепи для морских организмов.

Холодные течения также оказывают влияние на климат на суше, приводя к очень сухим условиям. Это происходит из-за охлаждения воздуха над холодной водой, что снижает вероятность образования облаков и осадков.

Подобные условия существуют и в других частях мира, например, у берегов Калифорнии и Бенгалии, где также присутствуют холодные течения и апвеллинг, способствующие богатой океанической жизни.

Замена холодного южного течения на теплое северное течение приводит к изменениям в океане, что может снизить биологическую активность из-за уменьшения поступления питательных веществ на поверхность. Это в свою очередь может привести к изменениям климатических условий на суше, проявляющимся в виде ливневых дождей и возможных затоплений.

Связь между этими явлениями была обнаружена еще в 1895 году учеными Пезетом и Эгуигуреном, и это позволяет лучше понять взаимосвязь между океаном и климатом на суше.

Феномен Эль-Ниньо

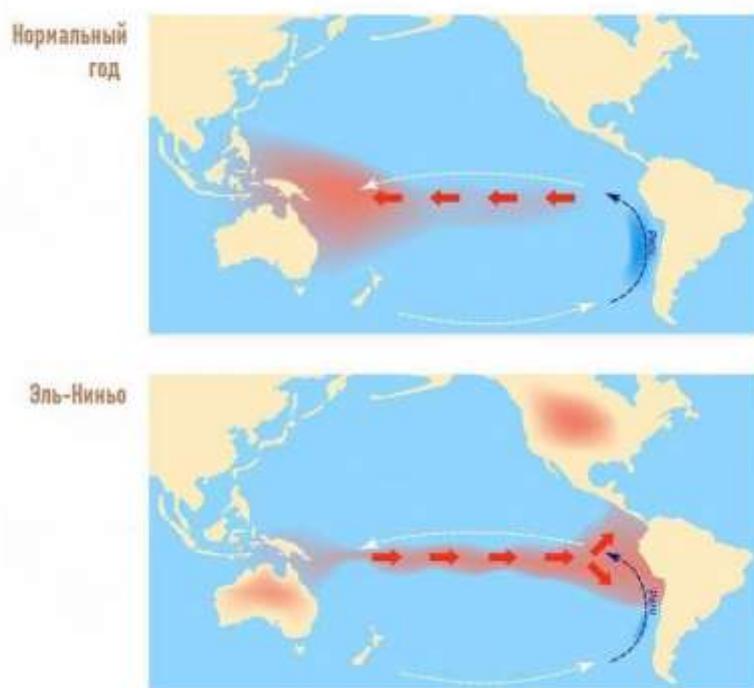


Рисунок 1.1.5. Сравнение нормального года и Эль-Ниньо. [4]

В конце девятнадцатого столетия возрос интерес к предсказанию климатических аномалий, особенно в отношении производства продовольствия в регионах, таких как Индия и Австралия. Чарльз Годд, в 1893 году, сделал предположение о том, что засухи в этих двух регионах происходят одновременно. Это было значимым открытием, поскольку указывало на возможную связь между климатическими аномалиями в разных частях мира.

Норман Локьер в 1904 году также обратил внимание на совпадение

времени засух в Индии и Австралии, что подтвердило интерес к изучению этого явления. Однако именно в 1924 году Гилберт Волкер первым ввел термин "Южное Колебание" (Southern Oscillation).

Южное колебание — это естественное изменение в атмосферном давлении между Тихим океаном и Австралией/Индонезией, которое вызывает изменения ветров, температуры и осадков. Это явление включает в себя периодические колебания давления воздуха, которые влияют на климатические условия в регионах Тихого океана и даже в других частях мира.

Исследования по Южному Колебанию и его связи с Эль-Ниньо привели к развитию понимания климатических процессов и возможности предсказания аномалий, таких как засухи или наводнения, в различных частях мира. Эти открытия имели значительное значение для сельского хозяйства, экономики и общества в целом, позволяя лучше подготовиться к экстремальным климатическим условиям.

Большую часть двадцатого столетия Эль-Ниньо считался большим локальным явлением. Большой Эль-Ниньо в 1982-83 г. привел к тому, что резко подскочил интерес научного сообщества к этому явлению.

В 2015-2016 годах произошло одно из наиболее мощных событий Эль-Ниньо за всю историю наблюдений, которое по своей силе можно сравнить с сильными явлениями Эль-Ниньо в 1982-1983 и 1997-1998 годах. Эль-Ниньо 2015-2016 годов вызвало аномальные изменения температуры и осадков в различных частях планеты. Во время развития, пика и угасания Эль-Ниньо 2015-2016 годов наблюдались значительные аномалии в погоде. Среди них выделяются разрушительные наводнения в Южной Америке и Китае, а также засухи в Южной Африке и Австралии.[6]

Также есть версии, что именно Эль-Ниньо повлиял на исчезновение таких крупных цивилизаций, как Майя в Мексике, и династии Тан в Китае.

Ученые анализировали причины упадка двух разных цивилизаций - Майя и китайской династии Тан в 9 и 10 веках. Обе цивилизации находились в регионах с муссонным климатом, где осадки играли ключевую роль для жизни.

В 9-10 веках произошло климатическое изменение, возможно связанное с феноменом "Эль-Ниньо", что привело к засухам и голоду.

Ученые смогли сделать такие выводы, когда изучили осадочные отложения в обоих регионах. Последний календарь Майя датировался 903 годом, и последний император династии Тан умер в 907 году. [7]

Влияние Эль-Ниньо давно прослеживалось и на рыбном промысле. Не зря, именно рыбаки дали название этому явлению.

Самые сильные случаи Эль-Ниньо были замечены в периоды с 1957 по 1958, с 1972 по 1973, с 1982 по 1983 и с 1997 по 1998 годы. В этих случаях отмечались аномально высокие температуры воды на 4°C и проникновение теплых вод в более южные широты. Такие явления часто характеризуют как катастрофические из-за их негативного влияния на рыбную промышленность, а также из-за обильных дождей, вызывающих стихийные бедствия на побережье.

Юго-восточная часть Тихого океана считается одним из самых плодородных районов Мирового океана. Уловы мелких пелагических рыб, таких как анчоус, ставрида, сардина, скумбрия, играют важную роль в рыбном промысле Эквадора, Перу и Чили. С 1950-х по 1970-е годы промысел в этом регионе активно развивался, и общие уловы рыб выросли с 167 тыс.тонн до 13,8 млн.тонн. Однако в 1973 году уловы сократились до 3,2 млн.тонн, но через двадцать лет к 1994 году достигли 19,8 млн.тонн. После этого вылов рыб снова начал снижаться, и к 1998 году, по предварительным данным, упал до 7,6 млн. тонн.

Эти колебания уловов тесно связаны с изменениями в океанологических условиях обитания рыб, вызванными Эль-Ниньо. Особенно заметно изменение уловов анчоуса и сардины в перуанских водах после завершения Эль-Ниньо 1971-1972 годов, 1982-1983 годов и 1997-1998 годов. Снижение уловов анчоуса также наблюдалось после последних двух Эль-Ниньо и для сардины. [8]

Эль-Ниньо оказывает существенное воздействие на погоду и климат южного полушария, особенно на регионы Австралии и Южной Америки. Этот метеорологический феномен также имеет заметное влияние на погоду в Африке

и Юго-Восточной Азии. Воздействие Эль-Ниньо на северное полушарие, включая Россию, менее выражено, но все же присутствует. Учитывая, что температура поверхностных вод в экваториальной зоне Тихого океана может повышаться на 2-3° выше обычной, и учитывая ключевое значение Тихого океана как регулятора климата, эти факты не могут быть недооценены.

Воздействие Эль-Ниньо на Россию ранее не было таким очевидным. Тем не менее в октябре 1997 года в Западной Сибири была зафиксирована температура воздуха выше 20 градусов, что привело к обсуждению вопроса об отступлении на север границ вечной мерзлоты. В августе 2000 года специалисты МЧС объясняли серию ураганов и ливней, охвативших страну, воздействием Эль-Ниньо. [9]

1.2 Механизм формирования Эль-Ниньо

Метеоролог Джейкоб Бьеркнес предположил в 1969 году, что Эль-Ниньо обычно связан с Южным колебанием, поскольку существует физическая связь между аномальной фазой высокого давления в западной части Тихого океана и редкой фазой потепления в восточной части Тихого океана, что сопровождается ослаблением восточных пассатов. Таким образом, низкое давление в западной части Тихого океана связано с похолоданием в восточной части Тихого океана (явление Ла-Нинья) и усилением восточных ветров.[10]

Южная осцилляция – это периодические колебания в атмосферном давлении в южном полушарии, имеющие природное происхождение. Ее еще называют качели атмосферного давления, которые, например, разрушают область высокого давления у Южной Америки и заменяют ее областью низкого давления, отвечающей обычно в юго-восточной Азии за бесчисленные дожди. Так происходят изменения в атмосферном давлении. Этот процесс происходит в год Эль-Ниньо. Пассаты теряют силу из-за ослабевающей зоны высокого давления у Южной Америки. Экваториальное течение не гонится как обычно пассатами с востока на запад, а движется в обратном направлении. [11]

Этот процесс продолжается 2-3 месяца, пока эта струя достигает берегов Южной Америки, формируя обширную полосу теплой воды вдоль западного побережья континента. Это приводит к возникновению сильных стихийных бедствий во время явления Эль-Ниньо. В это время циркуляция Волкера меняется, что способствует передвижению воздушных масс на восток. Поднимаясь над областью теплой воды (зона низкого давления), эти воздушные массы с сильными ветрами направляются обратно к Юго-Восточной Азии. Затем они начинают опускаться над холодными водами (зона высокого давления).

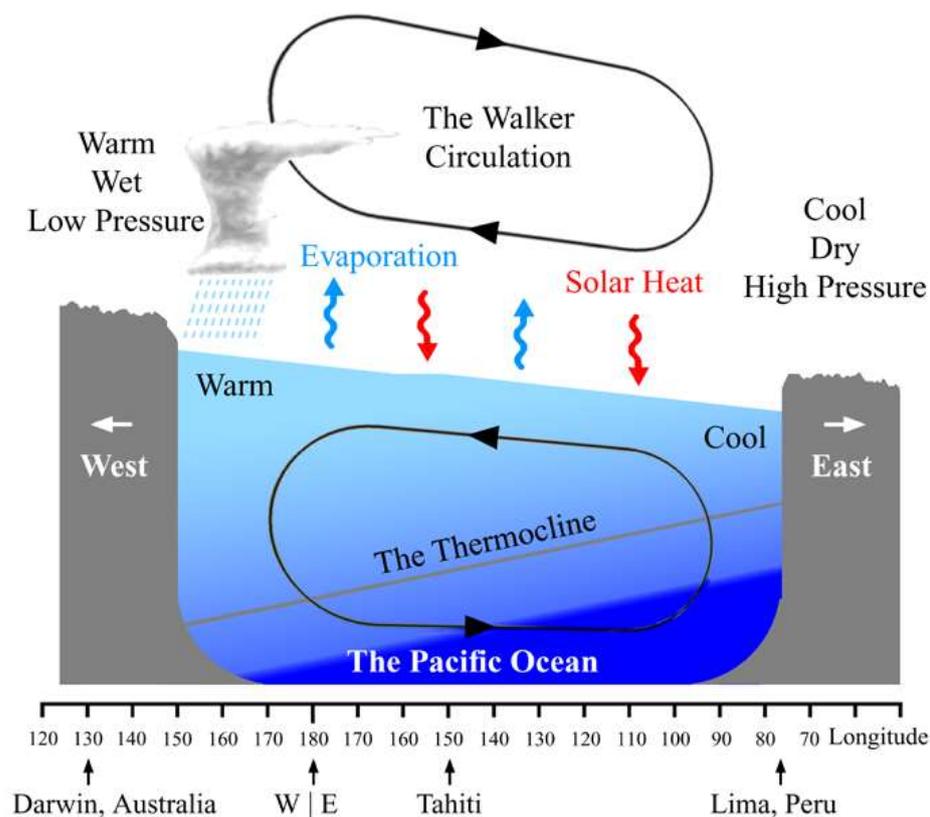


Рисунок 1.2.1. Циркуляция Уолкера [11]

Эта циркуляция океана получила свое название в честь своего открывателя сэра Гильберта Уолкера. Взаимодействие между океаном и атмосферой начинает изменяться, и это явление на данный момент хорошо изучено. Во время Эль-Ниньо, на которое сейчас имеется довольно подробные данные, в Тихом океане возникают аномалии в распределении тепла. У берегов Австралии появляется холодная вода, в то время как у берегов Южной Америки наблюдается теплая вода, заменяющая обычное холодное Гумбольдтово течение. В результате верхний слой воды у побережья Перу и Эквадора нагревается в среднем на 8°C , что является характерным признаком явления Эль-Ниньо.

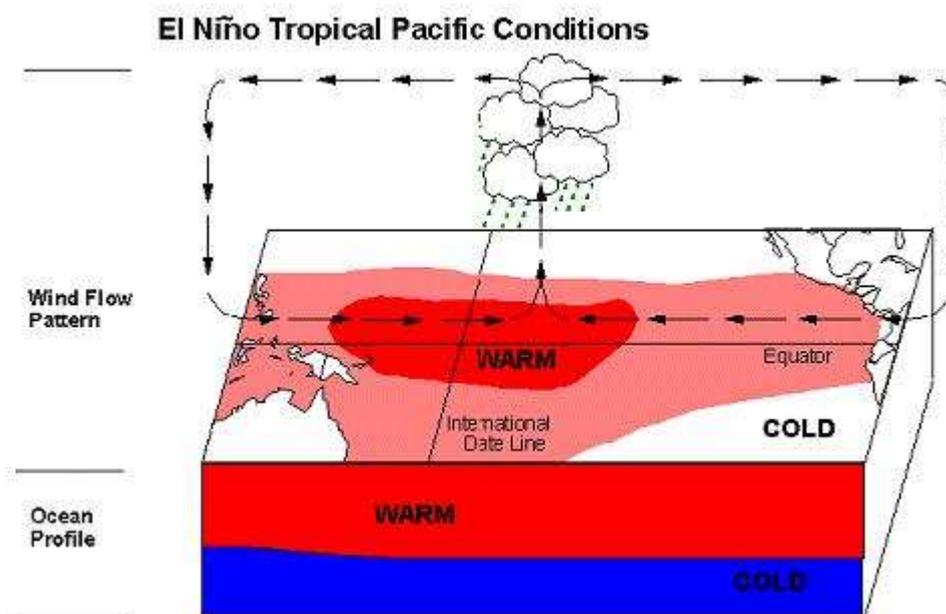


Рисунок 1.2.2 Схема возникновения Эль-Ниньо в Тихом океане [11]

Изменения в климате океана в западной части Тихого океана влияют на формирование погодных явлений в регионах у Перу, Эквадора и Чили, а также на северо-американском континенте. Увеличение температуры поверхности морской воды влечет за собой образование облаков и интенсивные осадки в указанных районах, а также усиливает явление Эль-Ниньо, вызывая сильные штормы и приводя к обильным дождям. В то же время у самого побережья Мексики повышенная температура воды способствует образованию мощных ураганов, таких как ураган Полин в 1997 году, что наносит серьезный ущерб.

Кроме того, повышенная температура верхнего слоя воды приводит к серьезным природным бедствиям, так как это изменение влияет на популяцию водорослей и рыб. Уменьшение количества водорослей создает проблемы для рыб и заставляет их искать пищу в более холодных местах. Этот сдвиг в поведении рыб нарушает естественные пищевые цепи, что приводит к голоду и потере среды обитания для других животных, зависящих от этих цепей.

Первые признаки Эль-Ниньо:

- Повышение воздушного давления над Индийским океаном, Индонезией и Австралией.

- Падение давления над Таити, над центральной и восточными частями Тихого океана.
- Ослабление пассатов в южной части Тихого океана вплоть до их прекращения и изменения направления ветра на западное.

- Теплая воздушная масса в Перу, дожди в перуанских пустынях. [8]

Само по себе повышение температуры воды у берегов Перу на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ считается лишь условием возникновения Эль-Ниньо. Обычно такая аномалия может существовать в течение нескольких недель, а затем благополучно исчезнуть. И только пятимесячная аномалия, классифицирующая как явление Эль-Ниньо, может нанести существенный ущерб экономике региона за счет падения уловов рыбы.

Для того чтобы своевременно спрогнозировать возникновение Эль-Ниньо, берется индекс южной осцилляции (SOI). Он показывает разницу в атмосферном давлении между Дарвином (Северная Австралия) и Таити. Один средний показатель атмосферного давления в месяц вычитается от другого, разница и составляет SOI. Так как на Таити обычно атмосферное давление выше, чем у Дарвина, и, таким образом, над Таити господствует область высокого давления, а над Дарвином – низкого, то SOI в таком случае имеет положительное значение. В годы Эль-Ниньо или как предвестник Эль-Ниньо SOI имеет отрицательное значение. Таким образом, условия атмосферного давления над Тихим океаном поменялись. Чем больше разница в атмосферном давлении между Таити и Дарвином, т.е. чем больше SOI, тем сильнее проявляется Эль-Ниньо или Ла-Нинья. [12]

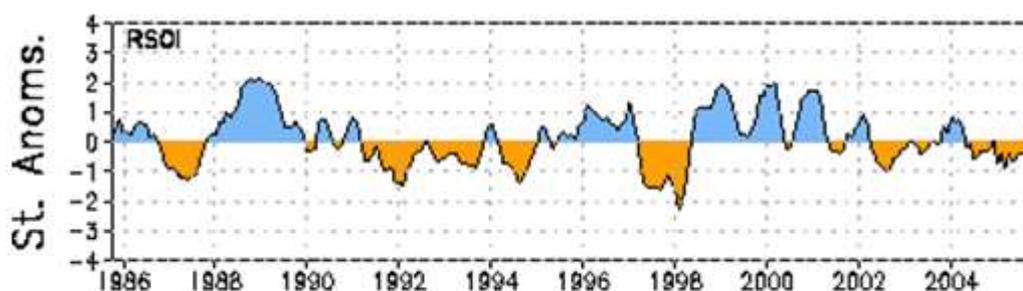


Рисунок 1.2.3 Пример зависимости от времени индекса SOI [12]

Для определения фазы ЭНЮК по индексу SOI наиболее чаще всего применяется критерий, предложенный Ропелевски и Халпертом. Согласно ему, в течение пяти и более месяцев 5-месячные скользящие средние значения индекса SOI по модулю должны превышать 0.5 среднеквадратического отклонения этого процесса (отрицательные значения индекса SOI соответствуют теплому эпизоду ЭНЮК, положительные – холодному).

Поскольку при возникновении Южного колебания обостряются аномалии температуры поверхности Тихого океана, в качестве характеристик этого процесса используют также глобальные климатические индексы Nina 1, Nina 3, Nina 3.4, Nina 4.

Индекс Nina 1- оценивается как аномалия температуры поверхности тропической зоны восточной части Тихого океана, в квадрате (0-10S, 90W-80W).

Индекс Nina 3- оценивается как аномалия температуры поверхности тропической зоны восточной части Тихого океана, в квадрате (5N-5S, 150W-90W).

Индекс Nina 3, 4- оценивается как аномалия температуры поверхности тропической зоны восточной части Тихого океана, в квадрате (5N-5S)(170-120W).

Индекс Nina 4- оценивается как аномалия температуры поверхности тропической зоны восточной части Тихого океана, в квадрате (5N-5S) (160E-150W).

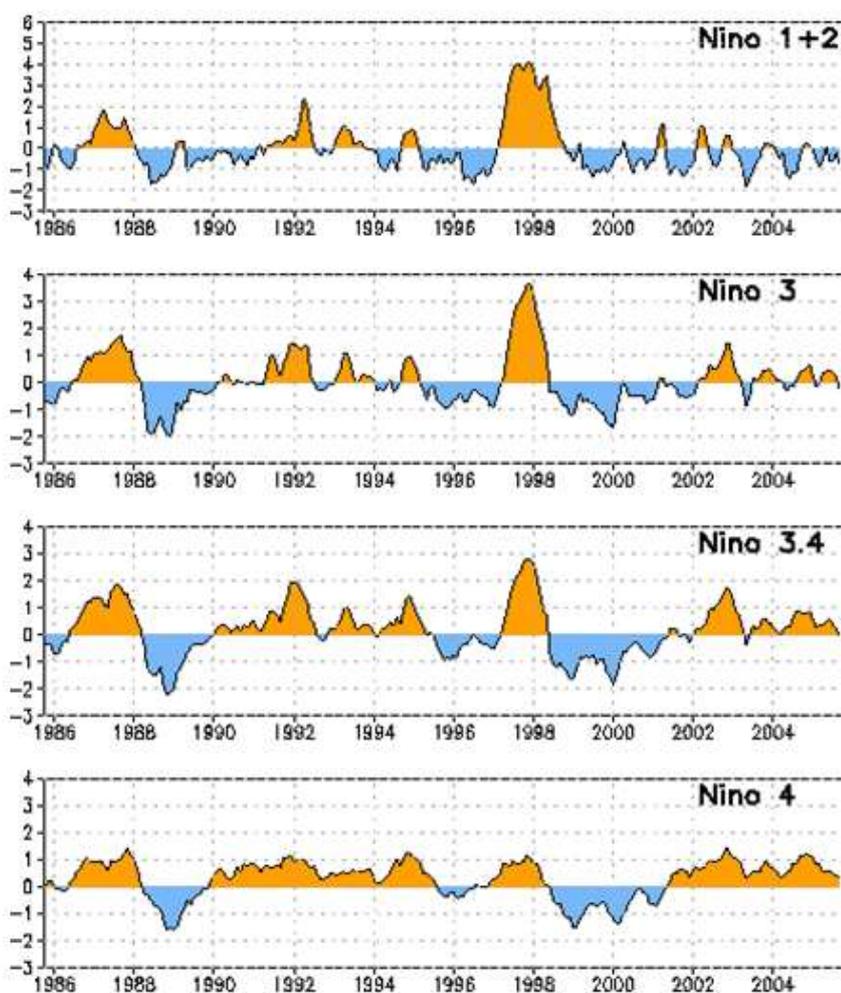


Рисунок 1.2.4 - Зависимости от времени индексов Nina 1, Nina 3, Nina 3.4, Nina 4 [13]

Niño1+2 (90° з.д.- 80° з.д., 10° ю.ш.- 0°), Niño 3 (90° з.д.- 150° з.д., 5° ю.ш.- 5° с.ш.) , Niño 4 (160° в.д.- 150° з.д., 5° ю.ш.- 5° с.ш.) [13]

Из рисунка 1.2.4 следует, что положительные значения каждого из этих индексов означают развитие Эль Ниньо или теплой фазы ЭНЮК, отрицательные значения индекса соответствуют развитию холодной фазы ЭНЮК или Ла Нинья. Данные океанического индекса ЭНЮК (Эль Ниньо и Ла Нинья) доступны на сайте Климатического центра США для всего периода наблюдений с 1950 г.

Согласно соглашению стран Северной Америки, начиная с 2005 г., для идентификации явления ЭНЮК в качестве основного индикатора был принят Океанический индекс, который рассчитывается по данным ТПО в экваториальном районе Niño 3-4. Значение индекса рекомендуется

рассчитывать, как среднее за три месяца отклонение температуры поверхности океана от нормы. [13]

Уровень воды в океане в области внетропической зоны конвергенции играет ключевую роль в формировании явления Эль-Ниньо-Южное колебание. Когда индекс SOI (индекс Южной осцилляции), характеризующий Явление Ла-Нинья, имеет большие положительные значения, пассаты усиливаются и теплые поверхностные воды смещаются к побережью Индонезии, что приводит к увеличению уровня океана. При этом на восточном побережье океана происходит отток воды, холодение поверхностных вод и повышение атмосферного давления.

Во время отрицательных значений SOI (Эль-Ниньо) образуется обратная ситуация: пассаты ослабевают, давление увеличивается в районе Индонезии, и теплые воды начинают двигаться на восток в виде волны Кельвина. Взаимосвязь между уровнем океана и явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья вместе с окружающими областями океана мало изучена. Для анализа использовались данные о поверхности океана, полученные с помощью спутников за период с 1993 по 2019 годы из базы данных AVISO (Франция).

Выполнен расчет линейных трендов уровня океана в узлах сетки архива AVISO в широтной зоне 20° с.ш. – 20° ю.ш. Тихого океана (рисунок 1.2.5). Видно, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают +5,2 мм/год. В центральной и восточной части рассматриваемой акватории оценки тренда практически одинаковы и равны примерно +2,2 мм/год.

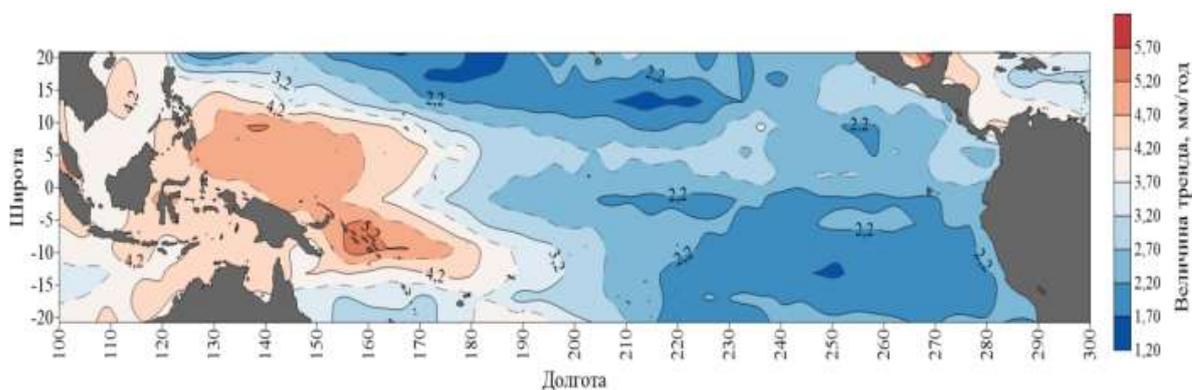


Рисунок 1.2.5 Пространственное распределение тренда среднегодовых значений уровня поверхности в широтной зоне 20 с.ш. – 20 ю.ш. Тихого океана за период 1993—2019 гг. по данным архива AVISO. [14]

В результате расчетов выявлено, что во время Эль-Ниньо уровень в центральной и восточной частях экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья отмечается обратная картина. При этом разность высот уровня океана между его западной и восточной частью достигает 350 мм. Отметим, что влияние ЭНЮК распространяется на уровень большей части Тихого океана. Например, в Перуанском апвеллинге аномалии уровня составляют примерно 30-50 мм. [14]

Эль-Ниньо является частью непрерывного цикла обратной связи между атмосферой и океаном: аномальное потепление поверхности воды в восточной части Тихого океана у берегов Перу приводит к усилению конвекции, которая увеличивает атмосферное скрытое тепло, что еще больше влияет на аномалии в атмосферной циркуляции. Усиленная конвекция создает западные аномалии ветра на экваторе, влияя на циркуляцию океана, и помогает перемещать теплые воды с западной и центральной части Тихого океана на восток. Кроме того, из-за аномальных изменений ветров в центральной части, апвеллинг над восточной частью уменьшается, потепление верхнего слоя океана, и дальнейшее увеличение аномалий температуры водной поверхности, запускает цикл снова.

Однако, несмотря на длительную историю исследований ЭНЮК, механизм формирования и особенно прогноз Эль-Ниньо и Ла-Нинья остается одной из важнейших современных научных задач, которая не решена до сих пор. Хотя формально ЭНЮК — региональный фактор, однако его влияние распространяется далеко за пределами Тихого океана.

В Атлантическом океане выделяют квазипериодический межгодовой климатический режим Atlantic Niño, который приводит к чередованию эпизодов потепления и похолодания температуры поверхности моря, сопровождаемых изменениями в атмосферной циркуляции. Атлантический Ниньо (АН) обычно появляется северным летом и не совпадает с меридиональным

(межполушарным) режимом, который состоит из диполя север—юг через экватор и действует в основном в течение северной весны. АН характеризуется аномалией температуры поверхности моря с центром на экваторе между 0° и 30° з.д. (рис. 1.2.6). В отличие от своего тихоокеанского аналога, Атлантический Ниньо не имеет аномалий температуры поверхности моря, меняющих знак с востока на запад и представляет собой аномалию в масштабе всего бассейна. Амплитуда АН обычно составляет примерно половину амплитуды Эль-Ниньо, причем аномалия температуры поверхности моря тесно связана с изменчивостью пассатов в циркуляционной ячейке Уокера. Положительная аномалия вызвана ослаблением атлантических пассатов, а отрицательная аномалия обусловлена их усилением.

Между АН с ЭНЮК отмечаются разнообразные двусторонние связи, причем они неодинаковы в различные периоды времени. Очень важную роль для экваториальной зоны Атлантики играет Северное Пассатное течение. Его продолжения (с одной стороны, Антильское течение, а с другой — Флоридское) образуют самое мощное течение в Атлантическом океане — Гольфстрим. По сути, именно от пассатной циркуляции зависит существование Гольфстрима.

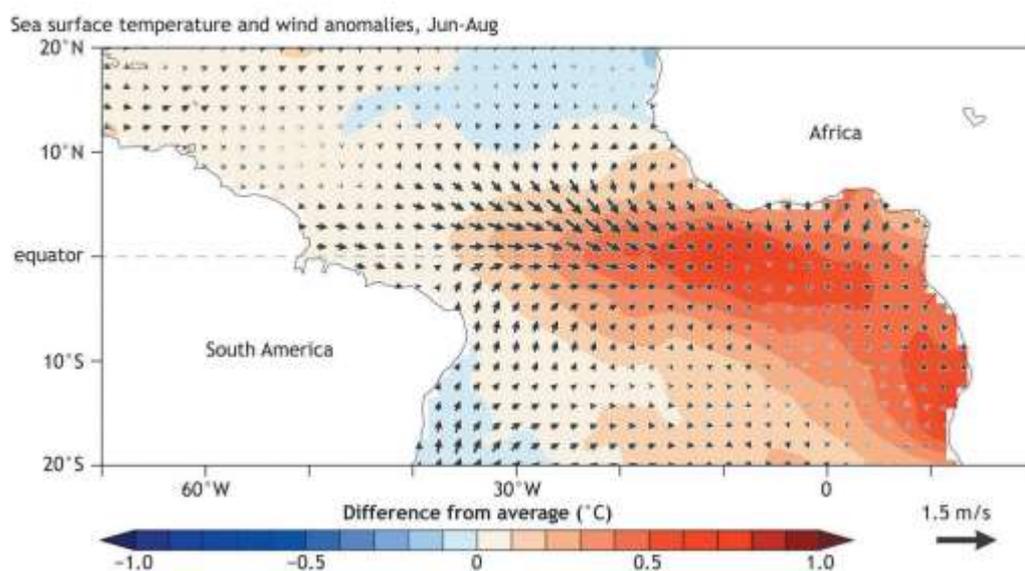


Рисунок 1.2.6 - Пространственное распределение аномалий температуры поверхности океана и скорости ветра в летний (июнь—август) период года во внутритропической зоне конвергенции Атлантического океана [15]

Эль-Ниньо, хотя в основном наблюдается в Тихом океане, вероятно, окажет влияние на всю Землю, поскольку массы горячей и холодной воды циркулируют по всему океану. Если их направление меняется в одном месте, оно меняется везде. На сухих берегах Южной Америки идут сильные дожди. В свою очередь, засухи случаются в обычно влажных регионах Юго-Восточной Азии и Северной Австралии. Некоторые гипотезы связывают возникновение Эль-Ниньо с более прохладной снежной зимой в Соединенных Штатах, более сухим и жарким летом в восточной части Южной Америки и даже в Европе и засухой в Африке. Западная Америка была затоплена во время одной из атак Эль-Ниньо.

Во время Эль-Ниньо из океана в атмосферу перетекает большое количество энергии, вызывая кратковременное повышение средней температуры поверхности Земли и повышая вероятность рекордно жаркого года. Однако, поскольку существуют нейтральные условия, чередующиеся с Эль-Ниньо и Ла-Нинья, во время которых энергия может возвращаться в океан, это явление не вызывает долгосрочного изменения климата. [15]

Основные характеристики Эль-Ниньо

1. Во время Эль-Ниньо происходит перераспределение тепла в океане, что влияет на атмосферное давление следующим образом:

Во время Эль-Ниньо в западной части Тихого океана наблюдается пониженное атмосферное давление из-за увеличения температуры поверхности воды. Это приводит к изменениям ветровых потоков и циркуляции атмосферы.

В то же время восточная часть Тихого океана испытывает повышенное атмосферное давление из-за охлаждения поверхностных вод. Это также влияет на погодные условия и климатические процессы в регионе.

2.Изменение температуры поверхности воды: Эль-Ниньо характеризуется аномальным повышением температуры морской воды в центральной и восточной частях Тихого океана.

3. Изменение погодных условий: Эль-Ниньо может вызывать глобальные изменения в погоде, такие как засухи, наводнения, ураганы и другие погодные явления.

4. Воздействие на рыболовство и сельское хозяйство: Эль-Ниньо может приводить к снижению уровня улова рыбы и урожайности в некоторых регионах и прежде всего в области Перуанского апвеллинга, из-за изменений океанических и атмосферных условий.

5. Влияние на экосистемы: Эль-Ниньо может вызывать изменения в морских экосистемах, включая миграции рыб и других морских видов. Из-за повышения температуры воды возможна гибель икры и тем самым сокращение популяции.

6. Цикличность: Эль-Ниньо проявляется периодически, обычно каждые несколько лет, и может длиться несколько месяцев до нескольких лет. Эти характеристики Эль-Ниньо имеют значительное влияние на мировой климат и экономику, поэтому изучение и прогнозирование этого явления является важной задачей для научного сообщества.

1.3 Современное состояние изученности явления Эль-Ниньо

8 июня Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) США подтвердило наличие явления Эль-Ниньо.

Один из признаков- в течении всего июня температура воздуха была выше, чем в июне за предыдущие года. (ВМО)

В июле Всемирная метеорологическая организация (ВМО) объявила 4 июля датой начала явления Эль-Ниньо в 2023-2024 годах. В июле 2023 года температура приземного воздуха на планете превысила все предыдущие показатели этого месяца в истории, что свидетельствует о нарастании климатических проблем. [16]

С начала июня 2023 года каждый последующий месяц устанавливал новый рекорд высокой температуры. Температура поверхности океана в экваториальной части Тихого океана соответствовала явлению Эль-Ниньо.

Максимальное значение температуры примерно на 2,0 °C превышало среднюю температуру поверхности моря с 1991 по 2020 год для восточной и центральной тропической части Тихого океана. Это событие оказалось одним из пяти самых мощных случаев Эль-Ниньо за всю историю, хотя было менее интенсивным, чем явления, произошедшие в 1997/98 и 2015/2016 годах.

К началу марта 2024 года в экваториальной части Восточной части Тихого океана появились очаги аномалий температуры поверхности моря ниже средней - явный признак того, что явление Эль-Ниньо отступает.

Обычно последствия ощущаются наиболее сильно на второй год активного развития явления. На этом этапе Эль-Ниньо обычно достигает максимальной силы и может существенно изменить обычные погодные условия по всеу миру.

Сезон 2023 был самым активным сезоном штормов и ураганов в Атлантике во время Эль-Ниньо, начиная с 1933 года.

В северной части Тихого океана наблюдалось повышенное количество ураганов, что является типичным признаком сильного Эль-Ниньо. Однако

активность ураганов и штормов в Северо-Западной части Тихого океана была значительно ниже обычного уровня.

Несмотря на неоднозначность ситуации в бассейнах северной части Тихого океана, в 2023 году оба бассейна этого океана пережили разрушительные последствия: тайфун Доксури в Северо-Западной части и ураган Отис в Северо-Восточной части принесли ущерб, превышающий 10 миллиардов долларов. [17]

Эль-Ниньо обычно оказывает наибольшее влияние на глобальный климат на второй год своего развития – в данном случае в 2024 году.

Рассмотрено влияние Эль-Ниньо 2023-2024 на регионы:

Южная Америка. Засуха, жара и природные пожары, экстремальные осадки и рекордный по силе ураган оказали серьёзное влияние на Южную Америку. Условия Эль-Ниньо способствовали продолжительной засухе в центральноамериканском «сухом коридоре» и на севере Южной Америки, а также интенсивным дождям и паводкам вдоль побережья Эквадора и Перу.

Ураган Отис обрушился на Акапулько в Мексике вышел на сушу и превратился в разрушительный ураган 5-й категории, в результате которого погибло много людей, а материальный ущерб составил миллиарды долларов. Сильная засуха снизила уровень воды в реке Риу-Негру у Манауса в бразильской Амазонии до самого низкого уровня за более чем 120 лет наблюдений и серьезно нарушила судоходство через Панамский канал.

Азия. 20 июля правительство Индии, ведущего мирового экспортера риса, ввело запрет на экспорт риса, за исключением класса басмати, с целью сдержать рост цен на внутреннем рынке и обеспечить его доступность в условиях кризиса. Это решение связано с геополитическими факторами, климатическим кризисом и воздействием явления Эль-Ниньо. В течение августа 2023 года в стране в целом наблюдалось значительное отсутствие дождей, при том, что август второй после июля дождливый месяц в Индии. Август 2023 года оценивается как самый засушливый с тех пор, как метеорологические параметры начали регистрироваться в 1901 году. В Индии последствия Эль-Ниньо развиваются

таким образом, что осадки подавляются почти по всей стране, за исключением территорий, расположенных на востоке и северо-востоке.

Океания. С начала 2024 года регион Океания столкнулся с отсутствием традиционных восточных пассатов и увеличением температуры вод в восточной части Тихого океана. Поскольку пассаты отсутствуют, на западе Тихого океана не происходит необходимых осадков, что приводит к появлению засух в Азии и Океании.

Австралия. С мая по август 2023 года наблюдалось мало дождей, при этом и в ноябре-декабре 2023 года отмечена более жаркая и сухая погода. Поэтому в долгосрочном прогнозе в 2024 году ожидается большее количество лесных пожаров.

Африка. Сильное наводнение в Восточной Африке, в результате которого погибло более 300 человек. [16]

Глава 2. Исходные данные и статистические методы их обработки

2.1 Методы статистического исследования

Сущность взаимосвязей между различными явлениями и процессами в природе заключается в том, что их можно охарактеризовать как обусловленные определенной причинно-следственной логикой либо как зависящие от вероятности. В детерминированных связях наблюдается четкая функциональная зависимость между исследуемыми показателями и факторами, при этом каждому значению одной переменной соответствует определенное значение другой переменной.

Однако из-за изменчивости природных процессов, обусловленной сложными взаимосвязями и воздействием множества факторов, а также наличием как прямых, так и обратных влияний, оказывается сложно построить точные детерминированные модели. В результате для описания этих процессов приходится прибегать к вероятностному подходу, согласно которому каждому значению переменной будет соответствовать с определенной вероятностью значение другой переменной.

Таким образом, в науке используется вероятностное описание природных процессов, основанное на представлении о случайных изменениях и колебаниях в их параметрах. Этот подход позволяет ученым учитывать различные случайности и изменения в процессах природы, что помогает более полно понять и предсказать их поведение. [18]

Статистические методы играют важную роль в анализе и прогнозировании явления Эль-Ниньо. Вот несколько способов, которыми статистические методы могут быть использованы для анализа феномена:

1. Анализ временных рядов: Статистический анализ временных рядов может помочь выявить тренды и цикличность в данных о поверхностных температурах океана, атмосферном давлении и других параметрах, связанных с

Эль-Ниньо. Это позволяет ученым определить характеристики и длительность событий Эль-Ниньо.

2. Анализ Фурье и гармонический анализ являются мощными инструментами для изучения периодических и сезонных явлений, таких как Эль-Ниньо. Вот как эти методы могут быть использованы для анализа Эль-Ниньо:

Анализ Фурье позволяет разложить сложные временные ряды на более простые составляющие, представленные в виде суммы синусоидальных функций различных частот. В контексте Эль-Ниньо, анализ Фурье может помочь выделить основные циклы и периоды изменений в климатических данных, связанных с этим явлением. Это позволяет ученым определить доминирующие временные шкалы и частоты, характеризующие Эль-Ниньо.

Гармонический анализ также используется для анализа периодических данных и выделения доминирующих циклов. Этот метод помогает идентифицировать основные гармоники, составляющие сложные временные ряды, что позволяет выделить сезонные и периодические компоненты в данных об Эль-Ниньо. Гармонический анализ может быть полезен для определения частотных характеристик и сезонных колебаний, связанных с этим климатическим явлением.

2.2 Этапы статистического исследования, исходные данные

Первым этапом исследования было выявление тренда временного ряда.

Тренд показывает долгосрочное движение данных в определенном направлении: вверх (положительный тренд), вниз (отрицательный тренд) или отсутствие четкого направления (без тренда). Тренд характеризует наличие или отсутствие ярко выраженной временной изменчивости выбранного ряда

Основными характеристиками тренда являются: коэффициент детерминации и величина тренда

Коэффициент детерминации (R-квадрат) и величина тренда - это две важные характеристики, используемые для анализа тренда.

1. Коэффициент детерминации (R-квадрат): Этот коэффициент измеряет, насколько хорошо модель соответствует данным. Он указывает, какой процент изменчивости зависимой переменной объясняется изменениями независимой переменной в модели. R-квадрат принимает значения от 0 до 1, где 1 означает идеальное соответствие модели данным. Коэффициент детерминации (для линейного тренда) или его нелинейный аналог (корреляционное отношение), характеризует вклад тренда в общую дисперсию ряда. Значимый коэффициент детерминации говорит о присутствии статистически значимого тренда, незначимый – о его отсутствии.

2. Величина тренда: Изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Как правило, величина тренда рассчитывается как изменение характеристики за год. Величина тренда равна коэффициенту a_1 линейного тренда и имеет размерность характеристики y за единицу дискретности.

Это характеристика, которая описывает силу или меру изменения данных в направлении тренда. Например, для возрастающего тренда величина будет положительной, а для убывающего — отрицательной. Величина тренда позволяет оценить скорость и направление изменения данных.

3. Оценка значимости линейного тренда

производится на основе оценки значимости коэффициента тренда a_1 по t -критерию Стьюдента:

$$H_0 : a_1 = 0; H_1 : a_1 \neq 0 ;$$

Для проверки рассчитывается критерий Стьюдента t^* :

$$t_{a_1} = \frac{|a_1|}{\sigma_{a_1}}$$
$$\sigma_{a_1} = \frac{\sigma_y(1 - r^2)}{\sigma_t(\sqrt{N - 1})}$$

где σ_a – стандартная случайная погрешность расчета коэффициента a_1 ; r – коэффициент корреляции исходного ряда и ряда времени, σ_y и σ_t – стандартные отклонения исходного ряда и ряда времени; N – длина ряда.

Критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu)$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-2$, где N -длина ряда.

Сравниваем t^* с $t_{кр}$. Если $t^* > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, коэффициент тренда значим, следовательно линейный тренд значим.

Если $t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, коэффициент тренда незначим, значит линейного тренда нет

4. Для определения важности нелинейного тренда осуществляется оценка значимости коэффициента тренда в нелинейном члене a_2 относительно времени по критерию Стьюдента, так же как и для линейного тренда. Если как линейный, так и нелинейный тренды оказываются значимыми в анализируемой выборке, то при проведении анализа предпочтение отдается нелинейному тренду. [19]

Обе эти характеристики важны для понимания и анализа тренда в данных и могут использоваться в статистических моделях и прогнозировании.

Также необходимо отметить оценки временного тренда:

1) Уравнение Линейное:

$$ТПО = a_1 t + a_0$$

Нелинейное:

$$ТПО = a_2 t^2 + a_1 t + a_0$$

2) Существование тренда определяется через оценку значимости коэффициентов регрессии:

- для линейного тренда – коэффициента a_1

- для нелинейного тренда – коэффициента a_2

3) Вклад в дисперсию исходного ряда R^2 Оценка значимости вклада в дисперсию – через оценку значимости коэффициента корреляции $R = \sqrt{R^2}$

4) Величина тренда определяется только для линейного тренда (если он есть) по коэффициенту a_1

Следует также иметь в виду, что само существование тренда полностью определяется длиной ряда. При изменении его длины тренд может появляться, исчезать, менять свою интенсивность и форму. Тренд может быть как линейного, так и нелинейного вида. Линейный тренд показывает, в какую сторону (повышения или понижения) идет развитие процесса во времени. Нелинейный тренд может иметь один экстремум (максимум или минимум). В этом случае он одновременно характеризует рост (снижение) и снижение (рост) процесса во времени.

Следующим этапом будет гармонический анализ.

Гармонический анализ в статистике используется для анализа периодических данных, таких как временные ряды или колебания. Он помогает выявить основные компоненты периодического процесса, такие как амплитуда, частота и фаза. В статистике гармонический анализ обычно связан с преобразованием Фурье, который позволяет разложить сложные периодические функции на более простые гармонические компоненты. Этот метод позволяет выделить основные составляющие периодического процесса и оценить их влияние на общую динамику данных.

Гармонический анализ также используется для моделирования и предсказания периодических явлений, таких как сезонные колебания в экономике, климатические изменения или другие циклические процессы.

В основе гармонического анализа лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т.е. на конечное число гармоник.

Гармониками называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда.

Формула гармоника

$$G_k = A_k \cos(\omega_k \cdot t - \varphi_k), \quad \omega_k = 2\pi/T_k$$

где k – номер гармоника; A_k – амплитуда k -той гармоника; ω_k – частота k -той гармоника; T_k – период k -той гармоника; φ_k – фаза k -той гармоника; t – время.

Полное разложение в ряд Фурье предполагает определение гармоник количеством $N/2$. Гармоника, как правило, нумеруются. Гармоника № 1 (G_1) имеет период равный длине ряда N , далее период гармоника уменьшается: G_2 имеет период $N/2$; G_3 – $N/3$ и т.д. Последняя гармоника имеет период равный 2 единицы дискретности, соответствующая ей частота называется частотой Найквиста. Характеристики гармоника определяются на основании коэффициентов Фурье a_k и b_k :

Свойства гармонического разложения.

1. Амплитуда гармоника функционально связана с ее дисперсией по определенному закону, который отражает взаимосвязь между уровнем колебаний и мерой изменчивости частоты гармоник.

2. Гармоника являются независимыми друг от друга и не коррелируют между собой. Это означает, что изменения в одной гармонике не влияют на другие, что делает их отдельными и независимыми компонентами разложения.

3. Количество исчисляемых гармоник равно половине количества точек данных во временном ряде. Это связано с особенностями математических вычислений и эффективным использованием информации о колебательных явлениях в исходных данных.

4. Период первой гармоника соответствует длине исходного временного ряда, а каждая последующая гармоника является кратной предыдущей. Это приводит к тому, что частоты гармоник увеличиваются в геометрической прогрессии, а последняя гармоника соответствует удвоенной частоте дискретизации временного ряда.

Процедуру гармонического анализа удобно разбить на пять этапов.

- 1) Определение средней арифметической величины;
- 2) оценка коэффициентов Фурье a_i , b_i и построение функции аппроксимации исходных данных;
- 3) оценка вклада отдельных гармоник в общую дисперсию ряда;
- 4) интерпретация значимых гармоник;
- 5) исключение значимых гармоник из исходного ряда с целью анализа остатков.

Характеристики гармоники

Амплитуда гармоники показывает наибольшее отклонение характеристики от среднего значения на данном периоде.

Фаза гармоники может быть определена в единицах дискретности (времени): $\phi_{kt} = \frac{\phi_k T_k}{2\pi}$

Фаза характеризует время наступления максимума на данном периоде. [20]

Вклад дисперсии гармоники в общую дисперсию ряда, по сути, является аналогом коэффициента детерминации r^2 , поэтому можно из него получить коэффициент корреляции ($R = \sqrt{r^2}$), который потом проверить на значимость. При проверке можно сделать вывод о значительном вкладе в дисперсию ряда или незначимости гармоники. [20]

Для исследования были взяты временные ряды индекса южной осцилляции (SOI).

Индекс SOI измеряет разницу в атмосферном давлении между Таити и Дарвином. Этот индекс широко используется для изучения климатических колебаний в тропиках и оценки состояния Южного колебания. Положительные значения SOI указывают на наличие феномена Ла-Нинья, который характеризуется снижением атмосферного давления над Таити и повышением над Дарвином. С другой стороны, отрицательные значения SOI свидетельствуют о явлении Эль-Ниньо, при котором наблюдается увеличение атмосферного давления над Таити и снижение над Дарвином.

Индекс SOI используется для отслеживания и измерения фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Он основан на разнице в атмосферном давлении между Таити и Дарвином, Австралия.

Как считается Индекс SOI:

Шаг 1: Измерение атмосферного давления: вначале измеряются средние значения атмосферного давления на Таити и в Дарвине. Обычно используются данные о давлении на уровне моря.

Шаг 2: Расчет аномалий давления: для каждого местоположения вычисляются аномалии давления путем вычитания долгосрочного среднего значения давления из текущего измеренного значения.

Шаг 3: Вычисление разности: затем разница между аномалиями давления на Таити и в Дарвине дает нам SOI. Формула проста: $SOI = \text{аномалия давления на Таити} - \text{аномалия давления в Дарвине}$.

Шаг 4: Нормализация: чтобы привести значения к стандартным условиям, SOI может быть нормализован или преобразован в стандартные отклонения от среднего значения.

Шаг 5: Интерпретация: Высокие значения SOI указывают на Ла-Нинью (холодное событие), тогда как низкие значения SOI свидетельствуют о Эль-Ниньо (теплое событие).

Индекс SOI является важным инструментом для мониторинга климатических изменений и прогнозирования фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Он помогает ученым и метеорологам понять текущее состояние океано-атмосферной системы и предсказать возможные последствия для погоды и климата. [17]

Формула расчета индекса SOI

$$SOI = \frac{(sSLP_{\text{Таити}} - sSLP_{\text{Дарвин}})}{\sigma_{\text{ежемесячно}}}$$
$$sSLP = \frac{(aSLP - mSLP)}{\sigma}$$

где, SLP-давление на уровне моря, sSLP-стандартизированный SLP, σ -стандартное отклонение, aSLP-фактический SLP, mSLP-среднее значение SLP. [3]

Исходными данными для исследования и анализа служат временные ряды индекса южного колебания SOI за период 1876-2023 гг.[3]

Глава 3. Результаты расчетов и их обсуждение

3.1 Исследование тренда

Исходными данными для исследования стали временной ряд 1876-2023 год, с среднемесячными или среднегодовыми показателями.

Первым действием стал анализ временных рядов, с целью вычисления тренда

Расчет линейного тренда рассчитывается по следующей формуле:

$$Tr=a_1*t+a_0$$

Нелинейный тренд рассчитывается по формуле:

$$Tr=a_2t^2+a_1*t+a_0 [19]$$

Среднемесячные данные индекса SOI

Уравнение линейного тренда SOI = -0.0003+0.46

$R^2=0.0002$ 0.02% чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель. Модель не качественная

Таблица 3.1.1. Значения t^* и $t_{кр}$ для линейного тренда- среднемесячные данные.

t^*a_1	по	
модулю		0.629
$t_{кр}$		1.96

$t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, коэффициент тренда незначим, значит тренда нет

Уравнение нелинейного тренда SOI= 0.00000018 t^2 -0.00062 t + 0.551

$R^2=0.0002$ 0.02% чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель. Модель не качественная.

Критическое значение $t_{кр}$ определяется по уровню значимости α (принимается α равным 5%) и числу степеней свободы ν , где $\nu=N-2$, N -длина ряда.

Таблица 3.1.2. Значения t^* и $t_{кр}$ для нелинейного тренда- среднемесячные данные.

t^*a1	по	
модулю		0.322
$t^* a2$		0.17
$t_{кр}$		1.96

$t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, коэффициент тренда незначим, значит тренда нет.

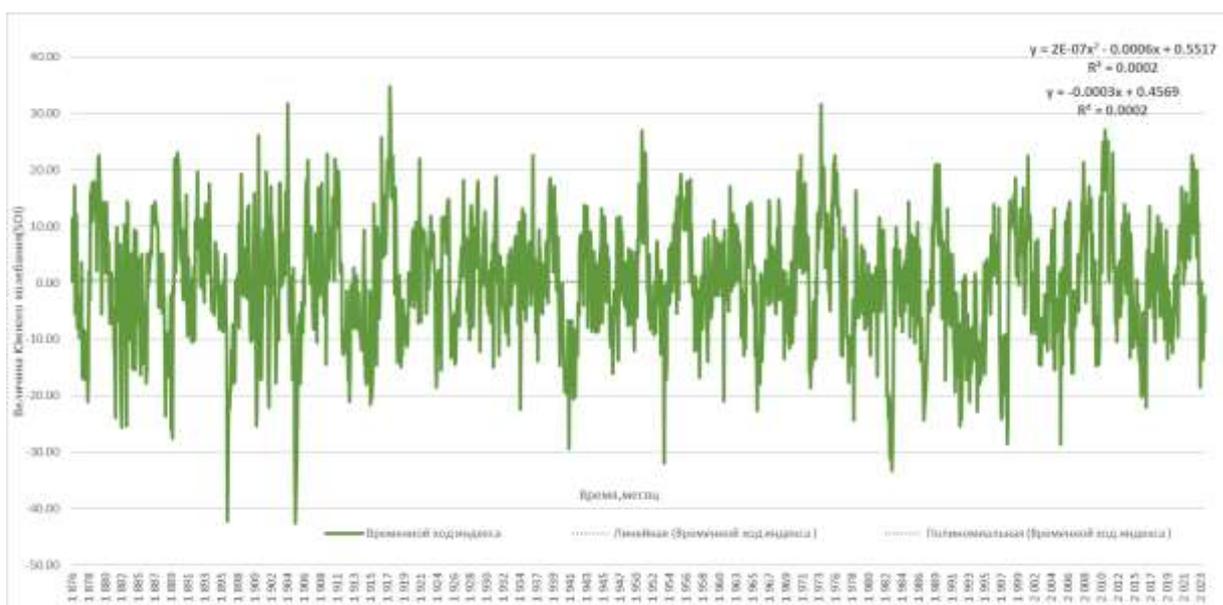


График 3.1.1. Совмещенный временной ход среднемесячных значений индекса Южного колебания и линейного и нелинейного тренда за период с 1876 до 2023 гг.

Среднегодовые данные индекса SOI

Уравнение линейного тренда $SOI = -0.0037t+0.46$

$R^2=0.0005$ 0.05% чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель. Модель не качественная

Таблица 3.1.3. Значения t^* и $t_{кр}$ для линейного тренда- среднегодовые данные.

$t^* a1$ по модулю	0.28
$t_{кр}$.	1.98

$t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Коэффициент тренда не является статистически значимым, что означает отсутствие тренда.

Уравнение нелинейного тренда $SOI=0.000023t^2-0.007t+0.55$

$R^2=0.0006$; 0.06% чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель. Модель не качественная.

Таблица 3.1.4 Значения t^* и $t_{кр}$ для нелинейного тренда-среднегодовые данные.

$t^* a1$ по модулю	0.135
$t^* a2$	0.068
$t_{кр}$	1.98

$t^* < t_{кр}$ нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Коэффициент тренда не является статистически значимым, что означает отсутствие тренда.

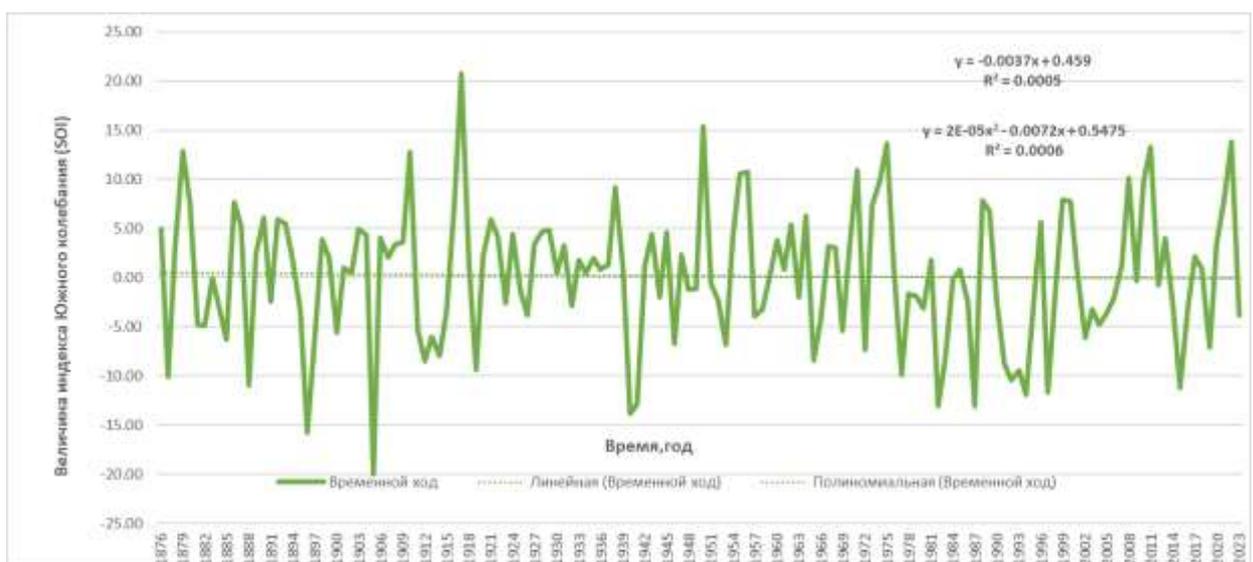


График 3.1.2. Совмещенный временной ход среднегодовых значений индекса Южного колебания и линейного и нелинейного тренда за период с 1876 до 2023 гг.

Тренд отражает наличие во временной изменчивости исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, существенно превышающим длину выборки.

Коэффициент детерминации, этот коэффициент измеряет, насколько хорошо модель соответствует данным. Он указывает, какой процент изменчивости зависимой переменной объясняется изменениями независимой переменной в модели. R-квадрат принимает значения от 0 до 1, где 1 означает идеальное соответствие модели данным. В расчетах показатели варьировались от 0.002 до 0.006, что показывает, что модель не качественная.

Исследование показало, что тренд отсутствует, но тут не должно быть выраженного тренда за счет того, что градиент приземного давления был стандартизирован, то есть поделено на стандартное отклонение. Эта процедура и убирает значимый тренд.

Процесс стандартизации исследуемого ряда позволяет лучше исследовать явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Для ряда индекса Южного колебания характерны отрицательные значения при явлении Эль-Ниньо, положительные - Ла-Нинья. При Эль-Ниньо наблюдается уменьшение градиента приземного давления между центрами устойчивого давления о.Таити и портом Дарвин (Австралия), что ведет к ослаблению пассатов. При Ла-Нинья, наоборот, наблюдается повышение градиента и увеличение индекса Южного колебания. Таким образом, трендовая составляющая в данном случае убирается для более детального рассмотрения фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

3.2 Гармонический анализ

Общая формула для расчета гармоник:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k \cdot t - \varphi_k), \omega_k = 2\pi/T_k$$

Среднемесячные данные

Из ряда исходных данных было удалено среднее (0.19) по исходному ряду, так как отсутствует тренд. По полученной в ходе расчетов по периодограмме (Приложение 1) были выделены ряд гармонических колебаний, которые представлены в таблице 1 и их основные характеристики.

В таблице 3.2.1 представлены характеристики пяти гармонических колебаний, которые имеют периодичность:

Таблица 3.2.1 Параметры среднемесячных гармоник

параметры гармоник	G1	G2	G3	G4	G5
Частота, 1\мес.	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Период,мес.	143.43	57.26	45.08	42.64	34.55
Частота,рад\мес.	0.04	0.11	0.14	0.15	0.18
A,	2.17	2.30	2.33	2.66	2.66
Фаза, рад	-1.42	-1.31	0.07	-0.92	-0.62
Фаза, мес.	-32.36	-11.90	0.47	-6.24	-3.43
Дисперсия гармоники	2.36	2.64	2.72	3.53	3.55
Дис-я исх ряда отклонений от тренда	109.48	109.48	109.48	109.48	109.48
Вклад гармоники в ряд отклон. от тренда	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
t*-критерий Стюдента	6.32	6.71	6.82	7.81	7.84

1 гармоника: 143.43 месяцев

2 гармоника: 57.26 месяцев

3 гармоника 45.08 месяцев

4 гармоника 42.64 месяцев

5 гармоника 34.55 месяцев

Амплитуда гармоники отражает максимальное расстояние между значением характеристики в данном периоде и ее средним значением. Амплитуда максимальна для 4 и 5 гармоник (периоды 42,64 и 34,55, соответственно) и составляет 2,66, минимальная у 1 гармоники (период 143,43) – 2,17.

Чем выше амплитуда, тем больше будет разброс значений сигнала от его среднего значения, что приведет к более выраженным колебаниям данной гармоники. В обратном случае, при меньшей амплитуде размах колебаний будет менее заметным.

Фаза гармонических колебаний показывает в какой момент наступает точка экстремума у колебаний. Так для 1 гармоники точка максимума наступает в мае 1873 года, следовательно следующая точка максимума наступит через величину периода 143 месяца - в феврале 1985.

Для второй гармоники максимума наступает в конце января 1875, точка минимум наступит через величину периода, то есть через 57.26 месяцев, в октябре 1879года.

Третья гармоника имеет точку максимума в середине января 1876 года, и следующая точка будет в октябре 1878 года с периодом 45.08 месяцев.

Четвертая гармоника, максимум июне 1875 году, и максимум будет с периодом 42.64 месяцев, в декабре 1878 года.

Пятая гармоника точка максимума в середине сентября 1875 года и точка максимума с периодом 34.55 месяцев в июле 1878 году.

Дисперсия ряда отклонений составила 109,48. При этом 1, 2 и 3 гармонические колебания имеют вклад в дисперсию ряда отклонений примерно

2% (2,36, 2,64 и 2,72, соответственно). 4 и 5 гармоники имеют вклад примерно 3%(3,53 и 3,55)

Проверка на значимость проводилась при помощи критерия Стьюдента и показала, критическое значение для каждой гармоники:

G1 с периодом 143.43 мес. $t^* > t$ кр вклад значим (2%)

G2 с периодом 57.257 мес $t^* > t$ кр вклад значим (2%)

G3 с периодом 45.080 мес $t^* > t$ кр вклад значим (2%)

G4 с периодом 43.642 мес $t^* > t$ кр вклад значим (3%)

G5 с периодом 34.549 мес. $t^* > t$ кр вклад значим (3%)

Таким образом можно сделать вывод, что в исследовании, все гармоники являются значимыми и их сумма будет являться рядом восстановленных гармонических колебаний.

На рисунке 3.2.1 представлен временной ход суммы значимых гармонических колебаний и исходного ряда индекса Южного колебания с убранной трендовой составляющей.

Расчет гармонических колебаний проводился по формулам:

$$G_1 = 2,17 \cos 0,04 * t - 1,42$$

$$G_2 = 2,30 \cos 0,11 * t - 1,31$$

$$G_3 = 2,33 \cos 0,14 * t + 0,07$$

$$G_4 = 2,66 \cos 0,15 * t - 0,92$$

$$G_5 = 2,66 \cos 0,18 * t - 0,62$$



Рисунок 3.2.1 Совмещенный временной ход среднемесячных значений индекса Южного колебания и ряда восстановленных гармонических колебаний за период с 1876 до 2023 гг.

Из полученного временного ряда можно сделать выводы, что пяти выделенных гармонических колебаний недостаточно для лучшего описания исходного ряда. Также стоит отметить наличие и других мощных колебаний с меньшими периодами.

G1 Отмечается наличие колебания с периодом 143,43 месяца (11,95 года), что совпадает с периодом изменения солнечной активности, а именно 11-ти летним циклом солнечной активности. Соразмерно одиннадцатилетним циклам солнечной активности (циклы Швабе) это течение то теплеет, то становится прохладнее. Упрощённо, механизм цикличности Эль-Ниньо заключается в том, что благодаря "синусоидальной" активности Солнца температура океанической поверхности также синусоидально колеблется, отклоняясь то в одну, то в другую сторону от среднемноголетней. [21]

G2 с периодом 57.257 мес. 4.72 года

G3 с периодом 45.080 мес. 3.75 года

G4 с периодом 43.642 мес. это 3,63 года

Гармоники G2-G5 попадают в периоды 2-7 лет, что входит в самый часто встречающийся цикл Эль-Ниньо.

Среднегодовые данные

По полученной в ходе расчетов по периодограмме (Приложение 2) Составлена аналогична таблица по среднегодовым данным гармоник.

Таблица 3.2.2. Параметры среднегодовых гармоник.

Параметры гармоник	G1	G2	G 3	G4	G 5
Частота, 1\год	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
Период, год	13.2	6.4	4.8	3.6	2.9
Частота, рад\год	0.5	1.0	1.3	1.8	2.2
A	2.06	2.17	2.09	2.44	1.97
Фаза,рад	2.20	3.66	-0.58	-0.32	-2.99
Фаза, год	4.61	3.74	-0.44	-0.18	-1.37
Дисперсия гармоник,	2.12	2.36	2.19	2.97	1.94
Дис-я исх ряда отклонений от тренда Dk	46.74	46.74	46.74	46.74	46.74
Вклад гармоник в ряд отклон от тренда Du	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04
t*-критерий Стюдента	2.67	2.84	2.72	3.23	2.55

В таблице 3.2.2 представлены характеристики пяти гармонических колебаний, которые имеют периодичность:

1 гармоника: 13.2 лет

2 гармоника: 6.4 года

3 гармоника 4.8 года

4 гармоника 3.6 гола

5 гармоника 2.9 года

Амплитуда гармоники показывает наибольшее отклонение характеристики от среднего значения на данном периоде. Амплитуда максимальна для 4 гармоник (периоды 3,6) и составляет 2,44), минимальная у 5 гармоники (период 2,9) – 1,97.

Фаза гармонических колебаний показывает в какой момент наступает точка экстремума у колебаний. Так максимум для 1 гармоники наступает в июле 1880 года, следующая точка наступит через величину периода, то есть через 13.2 года в сентябре 1893 года.

Вторая гармоника, точка максимума в августе 1879 году, и через 6.4 года в январе 1886 года.

Третья гармоника имеет максимум в августе 1875 года и через 4.8 года была точка максимума в 1880 в марте.

Четвертая гармоника первую точку имеет в ноябре 1875 года, далее, через 3.6 года – максимум в июне 1879 года.

Пятая гармоника точка минимума сентябре 1874 года и через 2.9 года максимум в августе 1877 года.

Дисперсия ряда отклонений составила 46.74. При этом 1, 2 и 3 гармонические колебания имеют вклад в дисперсию ряда отклонений примерно 5% (2,12, 2,36 и 2,19 соответственно). 4 гармоника примерно 6% (2,97) и 5 гармоники имеют вклад примерно 4%(1,97)

Проверка на значимость проводилась при помощи критерия Стьюдента и показала, критическое значение для каждой гармоники:

G1 с периодом 13.158 лет $t^* > t$ кр вклад значим (5%)

G2 с периодом 6.410 года $t^* > t$ кр вклад значим (5%)

G3 с периодом 4.762 года $t^* > t$ кр вклад значим (5%)

G4 с периодом 3.559 года $t^* > t$ кр вклад значим (6%)

G5 с периодом 2.882 года $t^* > t$ кр вклад значим (4%)

В контексте исследования гармонических колебаний можно сделать вывод, что каждая гармоника имеет свой вклад в формирование конечного ряда колебаний. Гармоники представляют собой сигналы или волны определенной частоты, которые могут быть разложены на составляющие частоты с помощью преобразования Фурье или других методов анализа колебаний.

Можно отметить, что в некоторых случаях все гармоники могут быть значимыми для восстановления исходного ряда, особенно если это колебание является сложным и содержит несколько частотных компонентов. В таких случаях сумма всех значимых гармоник может быть использована для приближенного восстановления исходного сигнала.

Тем не менее, в ряде практических ситуаций некоторые гармоники могут играть более важную роль, чем другие, и их вклад может быть более значимым для конечного результата. Поэтому в анализе гармонических колебаний важно учитывать как отдельные гармоники, так и их сумму для точного понимания и восстановления исходного сигнала.

На рисунке 3.2.2 представлен временной ход суммы значимых гармонических колебаний и исходного ряда индекса Южного колебания, с убранной трендовой составляющей.

Расчет гармонических колебаний проводился по формулам:

$$G_1 = 2,06 \cos 0,05 * t + 2,20$$

$$G_2 = 2,17 \cos 1 * t + 3,66$$

$$G_3 = 2,09 \cos 1,3 * t - 0,58$$

$$G_4 = 2,44 \cos 1,8 * t - 0,32$$

$$G_5 = 1,97 \cos 2,2 * t - 2,99$$

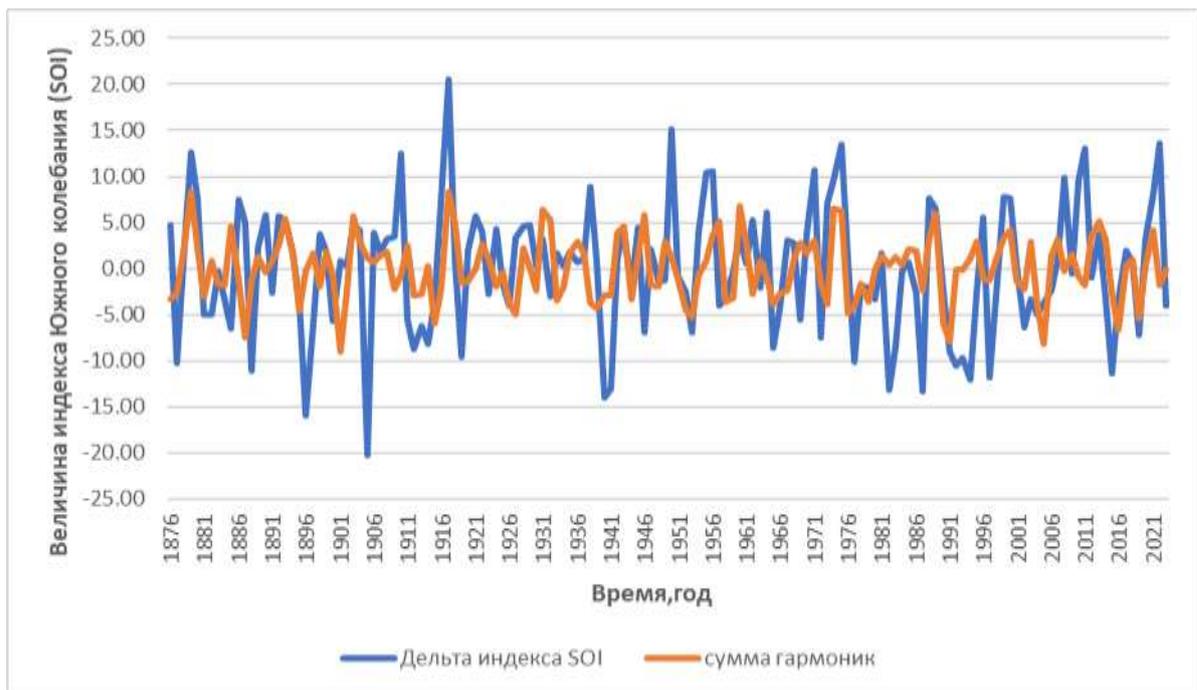


Рисунок 3.2.2 Совмещенный временной ход среднегодовых значений индекса Южного колебания и ряда восстановленных гармонических колебаний за период с 1876 до 2023 гг.

Анализируя полученные результаты исследования циклов и периодов гармоник, можно сделать выводы, что G1 имеет период 13 лет, что соответствует одному крупному из зафиксированному Эль-Ниньо, в 1972-1973гг.

G2 с периодом 6,4 года, G3 с периодом 4.7 года и G4 с периодом 3.5 года- G5 имеет период 2.9 (2.88) года, соответствуют стандартной оценке периода Эль-Ниньо 2-7 лет, которые встречаются чаще всего.

Есть два мнения оптимальному циклу Эль-Ниньо: 2-7 и 3-8 лет. Наиболее часто встречается 2-7 лет.

Заклучение

В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Исследование тренда показало, что значимые тренды отсутствуют.

В результатах ожидаемо не должно быть выраженного тренда за счет того, что градиент приземного давления был стандартизирован, то есть поделено на стандартное отклонение. Эта процедура и убирает значимый тренд.

Отсутствие тренда в данных SOI также является важным аспектом, поскольку позволяет убедиться, что основное внимание уделяется именно периодическим изменениям, а не общему направлению изменений в течение времени.

2. Гармонический анализ изменчивости, проводимый на основе данных SOI, позволяет выявить периодичность и цикличность изменений в атмосферном давлении. Этот метод помогает выявить сезонные и многолетние колебания в климатических данных.

Были выделены пять гармонических колебаний с периодами: 143, 57, 45, 43 и 34 месяца.

Все гармоники являются значимыми, и их сумма будет являться рядом восстановленных гармонических колебаний.

В ходе исследования изменчивости характеристик Эль-Ниньо было установлено, что среднемесячные ряды позволяют с точностью до месяца определить начало и окончание Эль-Ниньо, что имеет важное значение для изучения этого климатического явления.

G1 отмечается наличие колебания с периодом 143,43 месяца (11,95 года), что совпадает с периодом изменения солнечной активности, а именно 11-ти летним циклом солнечной активности

Гармоники G2-G5 попадают в период 2-7 лет, что входит в самый часто встречающийся цикл Эль-Ниньо.

Для ряда среднегодовые значений, были выделены пять колебаний с периодами: 13, 6.4, 4.7, 3.6, 2.9 года

Все гармоники являются значимыми, и их сумма будет являться рядом восстановленных гармонических колебаний.

Анализируя полученные результаты исследования циклов и периодов гармоник, можно сделать выводы, что G1 имеет период 13 лет, что соответствует одному крупному из зафиксированному Эль-Ниньо.

При сравнении G1 с классификацией, видно, что в 1951, 1965, 1978 и 1991 году наблюдались Эль-Ниньо. Перед каждым циклом Эль-Ниньо идет с таким же периодом цикл Ла-Нинья.

G2- G5 соответствуют стандартной оценке периоду Эль-Ниньо 2-7 лет, который встречаются чаще всего.

G2 с периодом 6.4 года, отмечается Эль-Ниньо в 1954 году, затем в 1961, и видно, что перед эти идут циклы Ла-Нинья. Так, к примеру в 1954 году начинается Ла-Нинья, которая закончится к 1961 году.

G3 с периодом 4.7 года, Эль-Ниньо начинается в конце 1965года, начала 1972 года, а Ла-Нинья -1961,1966 и т.д.

G4 с периодом 3.6 Эль-Ниньо наблюдается в 1982,1986 и Ла-Ниньо в 1978, 1982

G5 с периодом 2.9 года. Эль-Ниньо 1999,2001 и Ла-Ниньо наблюдалось 1998,2001 годах.

На рисунке 4.1 Проявление Эль-Ниньо-Ла-Нинья, хорошо можно отследить полученные закономерности.

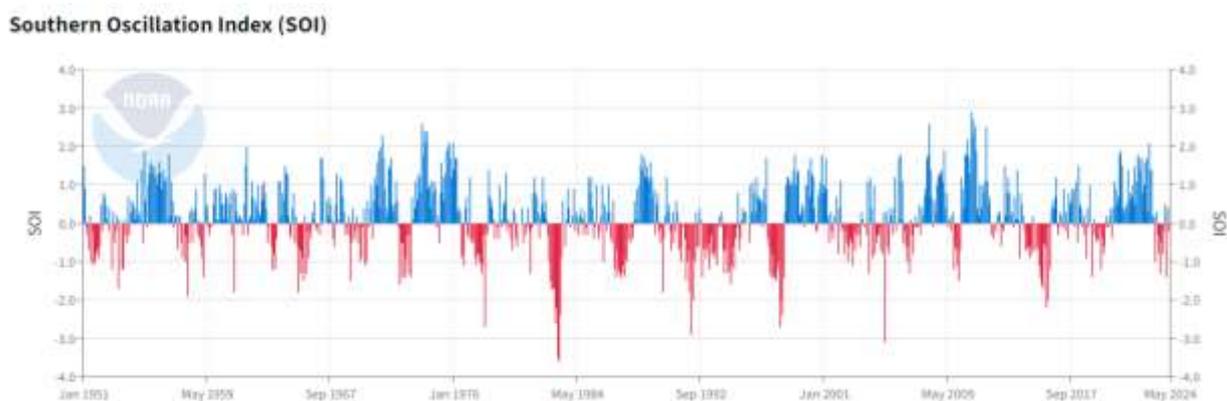


Рисунок 4.1 Проявление Эль-Ниньо-Ла-Нинья. [3]

Кроме того, анализ среднегодовых рядов позволяет изучать периоды возникновения самого явления Эль-Ниньо. Было установлено, что периодичность возникновения Эль-Ниньо составляет от 2 до 7 лет, а также возможны катастрофически сильные явления с периодичностью до 13 лет. Эти выводы указывают на сложность и разнообразие проявлений Эль-Ниньо в природе.

Известно, что многие исследователи используют только температуру поверхности моря (SST), не учитывая, что начало явления Эль-Ниньо связано с индексом SOI. Различные характеристики Международной Океанографической ассоциации (МО) имеют свою задержку в реакции (от 1 до 3 месяцев), что требует учета при исследовании данного явления.

Сравнивая индекс SOI с другими индексами Эль-Ниньо, можно выделить следующие:

1. Индекс NINO 3.4: это один из самых распространенных показателей для оценки состояния Эль-Ниньо-Ла-Нинья. Он базируется на температуре поверхности моря в районе Тихого океана между широтами 5°N и 5°S и долготами 120°W и 170°W . NINO 3.4 отвечает за оценку температурных аномалий, которые связаны с фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

2. Индекс ONI (Oceanic Niño Index): это еще один индекс, используемый для диагностики и мониторинга Эль-Ниньо и Ла-Нинья. ONI также основан на отклонениях температур поверхности моря в районе Эль-Ниньо 3.4, но он учитывает средние температуры за трехмесячные периоды.

3. Индекс SOI, в свою очередь, обеспечивает информацию о колебаниях атмосферного давления и взаимосвязи между Тихим океаном и Тихим океаном.

Эти индексы взаимосвязаны и вместе помогают ученым и метеорологам отслеживать и прогнозировать динамику Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Для более точного исследования приведен расчет коэффициента корреляции для индекса SOI и индексами ONI, NINO1+2, NINO3 NINO3.4, NINO4 [22].

Таблица 4.1 Значения коэффициента корреляции
индекса SOI с другими индексами Эль-Ниньо.

Коэффициент корреляции индекса SOI 1982г-2023г				
ONI	NINO1+2	NINO3	NINO4	NINO3,4
-0.91	-0.56	-0.77	-0.76	-0.85

Отрицательный коэффициент корреляции между индексом SOI и индексами ONI, NINO1+2, NINO3, NINO3.4, NINO4 указывает на обратную связь между этими показателями. Это означает, что при увеличении значений одного из индексов (например, SOI) значения другого индекса (например, ONI, NINO3, NINO3.4, NINO4) склонны уменьшаться, и наоборот. Такая обратная корреляция может указывать на определенные климатические явления и взаимосвязи между температурой воды в Тихом океане и южным колебанием.

Низкие значения SOI свидетельствуют о ослаблении пассатов и повышении температуры восточной части Тихого океана, что характерно для Эль-Ниньо. Напротив, высокие значения SOI указывают на усиление пассатов и холодных морских поверхностей в восточной части Тихого океана, что характерно для Ла-Нинья. Изменчивость индекса SOI отражает колебания в атмосферном давлении и влияние на климатические условия в тропиках, что позволяет ученым отслеживать и прогнозировать различные климатические явления, связанные с Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Таким образом, изучение индекса южного колебания SOI по мнению автора является ключевым для анализа и прогнозирования изменчивости явления Эль-Ниньо, что позволяет лучше понять его воздействие на климатические процессы и подготовиться к возможным последствиям.

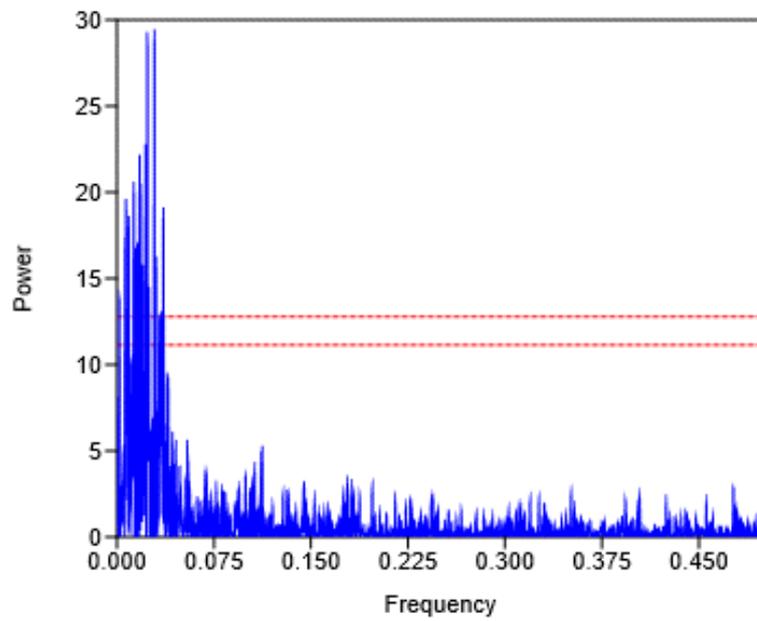
Список литературы

1. Малинин, В. Н. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо - Южное колебание / В. Н. Малинин, М. А. Смирнов // Гидрометеорология и экология. – 2022. – № 68. – С. 463-477. – DOI 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477. – EDN VINDTL.
2. Воскресенская, Е. Н. Пространственная классификация Эль-Ниньо и условия формирования события 2015 года / Е. Н. Воскресенская, А. С. Лубков, О. В. Марчукова // Системы контроля окружающей среды. – 2015. – № 2(22). – С. 80-90. – EDN VRDAZX..
3. Интернет-ресурс: Национальный центр экологической информации URL: www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi/. Дата последнего посещения: 19.06.2024
4. Интернет-ресурс: журнал Экосфера URL: <https://ecosphere.press/2024/06/10/el-nino-i-la-ninya-pochemu-malchik-i-devochka-menyayushhie-klimat-stali-prihodit-chashhe/>. Дата последнего посещения: 18.06.2024
5. Интернет-ресурс: Свободная энциклопедия Википедия. URL: <https://w.wiki/ARdx> Дата последнего посещения: 18.06.2024
6. Осипов, А. М. Эль-Ниньо 2015-2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии / А. М. Осипов, Д. Ю. Гущина // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 54-81. – DOI 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81. – EDN YNFLPN.
7. Интернет-ресурс: BBC. URL: https://www.bbc.com/mundo/especial/vert_earth/2016/03/160226_vert_que_acabo_con_civilizacion_maya_uv. Дата последнего посещения: 16.06.2024
8. Интернет-ресурс: Интернет журнал Морская индустрия URL: <https://mi32.narod.ru/01-99/el-ninio.html>. Дата последнего посещения: 18.06.2024

9. Халяк, А. С. Влияние Эль-Ниньо на глобальный климат / А. С. Халяк, О. В. Тасейко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 240-241. – EDN TAQFCR.
10. Фащук Д.Я. Мировой океан : История.География.Природа / Д.Я.Фащук. - Москва : Академкнига, 2002. - 282 с.
11. Интернет-ресурс: электронная библиотека BooksCafe.net URL: https://bookscafe.net/read/avtor_neizvesten-el_nino_sayt_oceanographers_ru-204519.html#p14xt.htm. Дата последнего посещения: 18.06.2024
12. Серых, И. В. О роли Эль-Ниньо - Глобальной атмосферной осцилляции и в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов / И. В. Серых // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 63. – С. 329-370. – DOI 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370. – EDN IVССКН.
13. Вязилова, Н. А. Эль Ниньо - Южное колебание. Методика определения / Н. А. Вязилова // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации - Мирового центра данных. – 2021. – № 188. – С. 71-80. – EDN АВYUOG.
14. Изменчивость уровня океана в области Эль-Ниньо- Южное колебание и его влияние на уровень в зоне Перуанского апвеллинга / М. А. Смирнов, В. Н. Малинин, Ю. В. Митина, Д. Мартина-Васкез // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. – С. 276-279. – EDN PVPSXL.
15. Малинин, В. Н. Влагообмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции / В. Н. Малинин, П. А. Вайновский // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 63. – С. 255-278. – DOI 10.33933/2713-3001-2021-63-255-278. – EDN ARELRU.
16. Интернет-ресурс: Всемирная метеорологическая организация (ВМО). URL: <https://wmo.int/>. Дата последнего посещения: 18.06.2024.

17. Интернет-ресурс: Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru/novosti/99-pogoda-v-mire/19959-el-nino-oslabevaet-no-posledstviya-prodolzhayutsya>. Дата последнего посещения: 17.06.2024
18. Интернет-ресурс: Британская энциклопедия. URL: <https://www.britannica.com/science/Southern-Oscillation>. Дата последнего посещения: 17.06.2024
19. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. – СПб, изд. РГГМУ, 2008. – 408 с
20. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Анализ временных рядов». – 32с. 2023
21. Интернет-ресурс: Лёвин А.С. Популярно о глобальном потеплении URL: https://rusargument.ru/44532_populyarno_o_globalnom_poteplenii_chast_4_el_nino_i_epilog_anatoly. Дата последнего посещения: 19.06.2024
22. Интернет-ресурс: Национальный центр экологической информации URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst>. Дата последнего посещения: 19.06.2024

Приложение 1. Приодограмма по среднемесячным данным
индекса Южного колебания за период с 1876 по 2023 гг.



Приложение 2. Приодограмма по среднегодовым данным индекса Южного колебания за период с 1876 по 2023 гг.

