



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«Межгодовая изменчивость и пространственно-временные  
связи явления Эль-Ниньо»

Исполнитель: Чешкова Ксения Геннадьевна, студент группы ПОЗ-М19-1-6

Научный руководитель: к. геогр. н., Густоев Дмитрий Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_ кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_ Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«14» февраля 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

## Оглавление

Введение .....	3
Современное представление о явлении Эль-Ниньо.....	5
Основные параметры, характеризующие явление Эль-Ниньо .....	7
Проявления Эль-Ниньо .....	7
Временные масштабы .....	11
Пространственные масштабы.....	12
Пространственно – временные связи явления Эль-Ниньо.....	13
Эль-Ниньо и Южное колебание .....	16
Эль-Ниньо и ледовитость Антарктики.....	17
Некоторые гипотезы происхождения явления Эль-Ниньо .....	20
Исходные данные.....	21
Выводы.....	21
Методы исследований.....	21
Элементарная статистика.....	21
Эмпирические гистограммы.....	22
Функция спектральной плотности и автокорреляционная функция .....	22
Полосовая фильтрация. Полосовой фильтр Баттерворта.....	24
Полосовой фильтр Баттерворта .....	26
Статистико-вероятностные методы экстраполяции временных рядов .....	34
Методическое прогнозирование .....	39
Выводы .....	39
Особенности внутренней структуры временных рядов в регионе явления Эль-Ниньо.....	40
Вейвлет анализ.....	44
Методическое прогнозирование .....	45
Заключение .....	47
Список литературы .....	49

## Введение

«Эль-Ниньо возвращается!», «...осадки, обрушившиеся на Калифорнию нынешней зимой - результат влияния явления Эль-Ниньо...», «...явление Эль-Ниньо 1997-1998 гг. - одно из самых мощных за последние двести лет...», «...в стихийных бедствиях виновато Эль-Ниньо.»

Вот так комментируют средства массовой информации событие, происходящее в экваториальной части Тихого океана и носящее название Эль-Ниньо. Кроме тезисов, приведенных выше, Эль-Ниньо винят в штормах и ветрах, осадках и засухах, голоде и массовой гибели животных. К катастрофам подобного типа необходимо быть готовыми и чем раньше, тем лучше. Предсказывать катастрофические события очень непросто, а в данном случае ситуация усугубляется масштабами этого явления и сложнейшим характером взаимодействия океана и атмосферы в этом регионе. Учитывая ужасные последствия явления и то как явление Эль-Ниньо коррелирует с другими характеристиками климата планеты - изучение данного феномена представляется актуальной задачей.

Следует отметить, что любое прикладное исследование должно иметь практический выход. В данном случае речь идет об определении возможности предсказания явления с позиций статистико-вероятностных моделей.

Гипотеза о том, что процессы в атмосфере являются причиной долгопериодной изменчивости термических процессов в средних и низких широтах океана была выдвинута и обоснована сравнительно недавно. Собственно, именно в это время и была рождена идея о подключении к исследованиям самого совершенного аппарата прикладной статистики. В настоящее время ситуация еще более благоприятная в связи с бурным развитием вычислительной техники. Как видим, появились объективные причины использования и совершенствования методов прикладной статистики для решения самых разных проблем. К этому кугу можно отнести:

1. Познакомиться с явлением Эль-Ниньо, его природой и взаимодействием с другими характеристиками;
2. Оценить первичную статистику;
3. Рассчитать АКФ, СПФ и вейвлеты;

4. Оценить особенности внутренней структуры временной изменчивости Эль-Ниньо;
5. Оценить пространственно-временные связи явления Эль-Ниньо;
6. Выполнить методическое прогнозирование ряда интенсивности Эль-Ниньо статистическими методами.

Все определенные выше задачи можно решать и в случае исследования временной изменчивости явления Эль-Ниньо. Изучая вопрос изменения внутренних характеристик явления можно лучше понять происхождение данного феномена и его взаимосвязь с явлениями, которые происходят на соседних территориях, так же можно избежать или существенно снизить экономический и природный ущерб, наносимый явлением странам, которые находятся в существенной близости. Так же, учитывая пространственно-временные масштабы и то как взаимодействуют океан и атмосфера, прогноз этого явления позволит предсказывать климатические изменения, отсюда следует, что установить возможность прогноза Эль-Ниньо статистическими методами является целью работы.

В результате первого знакомства с явлением Эль-Ниньо (ЭН) и литературой, посвященной этой проблеме можно сделать следующие заключения.

1. Ввиду того, что явление ЭН оказывает значительное влияние на характер глобальных климатических процессов и является составной частью климатической системы планеты, задача исследования явления ЭН с выходом на прогноз представляется весьма актуальной;
2. Очень важен прогноз этого явления ввиду того, что каждый тепловой эпизод, называемый ЭН влечет за собой поистине катастрофические последствия, проявляющиеся в экологии, экономике, и социологии;
3. Малая изученность, как самого явления, так и его временных связей с другими крупномасштабными процессами открывает широкие просторы в исследовательской деятельности;
4. Широкий доступ в использовании вычислительной техники открывает прекрасную возможность применения и совершенствования известных методов статистического анализа и прогноза.

## Современное представление о явлении Эль-Ниньо

Были времена, когда по новостям рассказывали про явление Эль-Ниньо, про его масштабы и его последствия, но никто по-настоящему не понимал, что это такое. Само явление на прямую характеризуется не только более теплой водой в Тихом океане у побережья Южной Америки, но оно меняет погодные условия по всему земному шару.

В наши дни Эль-Ниньо отслеживается экспертами климатологами с использованием спутниковых данных и океанских буев, но изначально за явлением наблюдали рыбаки, ведущие свой промысел на побережье Эквадора и Перу.

В переводе с испанского, Эль-Ниньо означает «Христос во младенчестве» или «младенец Христос», поскольку чаще всего оно появлялось на Рождество. Примерно в 18 веке Эль-Ниньо описывалось как: - «...появление в прибрежной зоне океана широких полос воды красного цвета...». В соответствии с цветом воды подобные события получили название «красный прилив». Среди эрудированных обывателей этот термин употребляется и в настоящее время.

Цвет воды не единственный признак явления. Рыбаки отмечали, что наряду с теплой и “красной” водой, в районе совершенно исчезает практически вся рыба. Люди пребывали в большом шоке, так-как на период явления исключительно обильные осадки не только не позволяли заниматься сельским хозяйством, но и уничтожали результаты ранее проделанной работы. По мере исследования этого феномена постепенно выяснилось, что ЭН - процесс связанный и зависящий от многих параметров, сложно с ними взаимодействующий и оказывающий большое влияние на явления, происходящие по всей планете. В настоящее время явление Эль-Ниньо трактуется как: «...явление возникновения аномально теплых вод вдоль побережья Эквадора и Перу, распространяющихся на юг от Лимы (12°ю.ш.), в период которого нормированные значения АТПО превышают уровень  $1\sigma$  в течение 4 месяцев.»

Следует отметить, что подобные явления отмечаются не только в Тихом океане, но и в других регионах, например, в Атлантическом океане, Индийском

океане. Кроме того, распространение теплой воды на юг носит эпизодический характер. В самом начале явления, аномалии действительно продвигаются на юг, но затем достаточно резко меняют направление и распространяются на север и далее вдоль экватора на запад.

В настоящее время считается, что явление Эль-Ниньо 1982-1983 годов было самым сильным за последнее время. Ранее у ученых не было возможности точно определить время начала феномена, но сейчас, основываясь на теории, накопленную временем, можно сказать, что в мае 1982 года начали ослабевать приземные ветры, которые обычно дули по всей экваториальной зоне Тихого океана от Галапагосских островов до Индонезии. Далее, чуть западнее линии перемены дат отмечается поворот ветра на запад, наступает штормовая погода и океан сразу же реагирует на все изменения в атмосфере. Близ острова Рождества уровень моря поднимается, в то время как на западе Тихого океана отмечалось его падение.

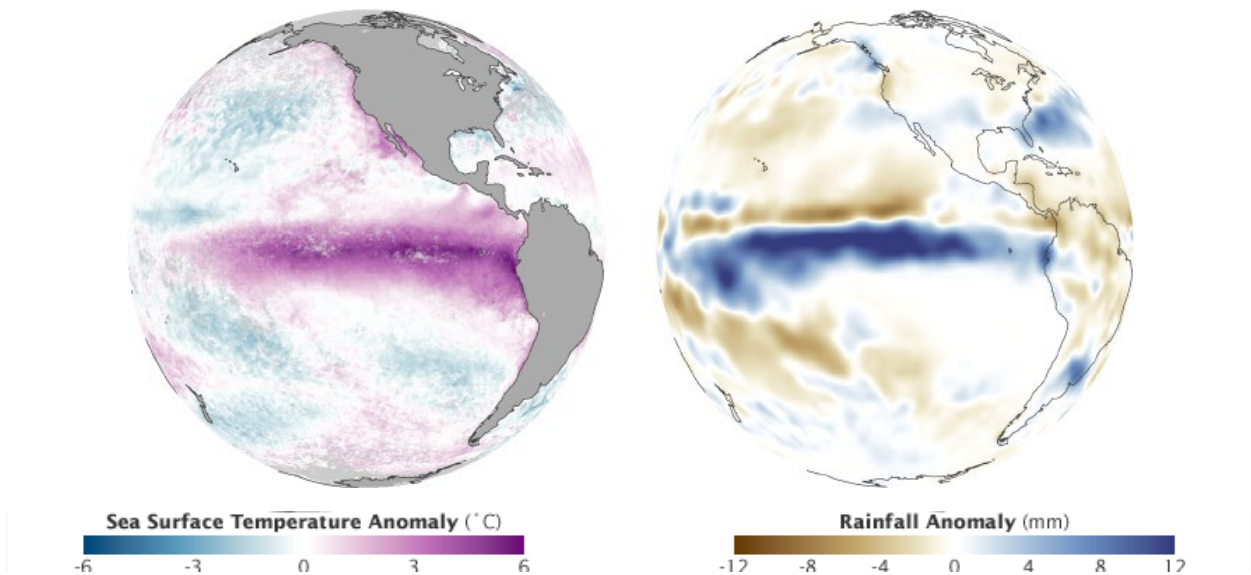


Рис. 1 Аномалии ТПО, °С и аномалии осадков, мм за декабрь 1997г.[14]

Отмечая все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что изучение и прогноз явления Эль-Ниньо крайне важен в настоящее время, поскольку оно имеет обширное влияние практически на все процессы, происходящие в системе океан-атмосфера по всему земному шару. Прогноз явления поможет снизить ущерб, который оно наносит во время своего действия и после него, а его малая изученность ведет к обширной научной деятельности.

## Основные параметры, характеризующие явление Эль-Ниньо

Первое, на что люди обращали внимание, когда проявлялось явление Эль-Ниньо – это окрашивание поверхности воды в красный цвет. По этому признаку определяли данный феномен приблизительно с 16 века, но цвет воды лишь следствие изменения термического состояния океана.

Конечно, в первую очередь явление проявляется в аномальном повышении температуры воды, причем не только на поверхности, но и в некотором слое океана. На самом деле в регионе ЭН экстремально теплое состояние океана не является единственным. Можно выделить еще два: нормальное и аномально холодное, получившее название Ла-Нинья. Это заставляет задуматься т.к. каждое состояние формируется под воздействием своих собственных причин. К катастрофам, тем не менее, приводит именно Эль-Ниньо, так что исследовать будем именно его. Кроме океана явление проявляется и в атмосфере, причем и в том и в другом случае изменения касаются нескольких характеристик. Остановимся же на них несколько подробнее.

### Проявления Эль-Ниньо

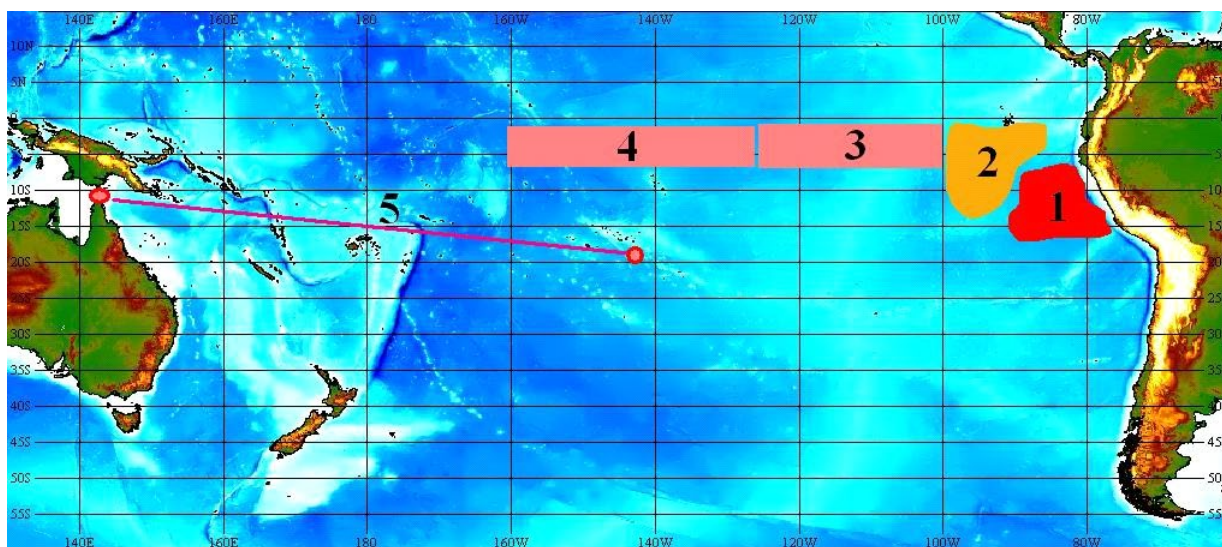


Рис. 1.1 Стадии развития Эль-Ниньо и Южное Колебание.

Параметров, в которых проявляется ЭН - несколько. Естественно, что основными являются характеристики океана и атмосферы.



Аномалии встречаются повсеместно. Аномалия, в нашем понимании, это выход значений определенных параметров за уровень  $1\sigma$ .

Эль-Ниньо прежде всего проявляется в существенном повышении температуры воды в некотором слое океана. На рис. 1.2 представлен графический ход среднемесячных значений комплексного индекса ЭН принятого в NOAA. Собственно говоря, те же самые тенденции присутствуют и во временном ходе ТПО. Как уже известно, характерное время начала Эль-Ниньо – зимнее время года. Аномальное повышение ТПО начинается в ноябре-декабре, а заканчивается в апреле-мае. Таким образом, средняя продолжительность явления составляет 5-6 месяцев. Известны случаи, самых ярких – Эль-Ниньо 1982-1983 и 1997-1998 гг., когда аномалии держатся 9-13 месяцев.

По мнению некоторых ученых, такая продолжительность обусловлена двумя стадиями развития явления.

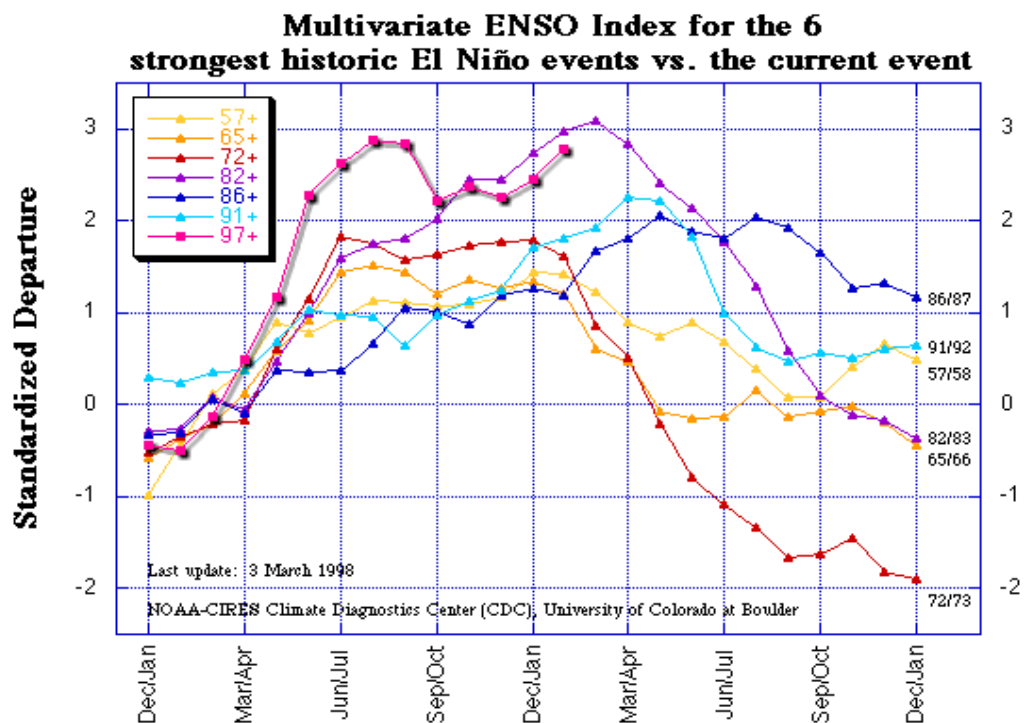


Рис. 1.2 Графический ход среднемесячных значений комплексного индекса ЭН принятого в NOAA.

Первая стадия начинается в конце календарного года в западных регионах тропической части Тихого океана. Появлению теплой воды у Эквадора и Перу предшествует ослабление юго-восточного антициклона,



показателем которого является давление на о. Таити. Эти аномалии сохраняются в течение 5-6 месяцев смягчая, тем самым, холодный сезон в юго-западных частях Тихого океана (рис.1.1; районы 1 и 2).

Вторая стадия потепления (районы 3 и 4) захватывает центральную область тропической части Тихого океана и начинается примерно через 6 месяцев после начала явления. Вторая стадия обычно обуславливается характером протекания первой стадии и в большинстве случаев определяется очень большим теплозапасом Эль-Ниньо.

Следующим проявлением наступления аномального потепления вод является заглублиение термоклина у побережья Северной Америки (рис.1.4). На самом деле до конца не выяснено, является ли это событие предиктором или предиктантом Эль-Ниньо, однако заглублиение имеет место быть в период явления.

В обычный сезон глубина залегания термоклина составляет 50-60м., а в период действия явления она увеличивается до 100-120м. Понятно, что вследствие этого изменения растет теплосодержание вод.

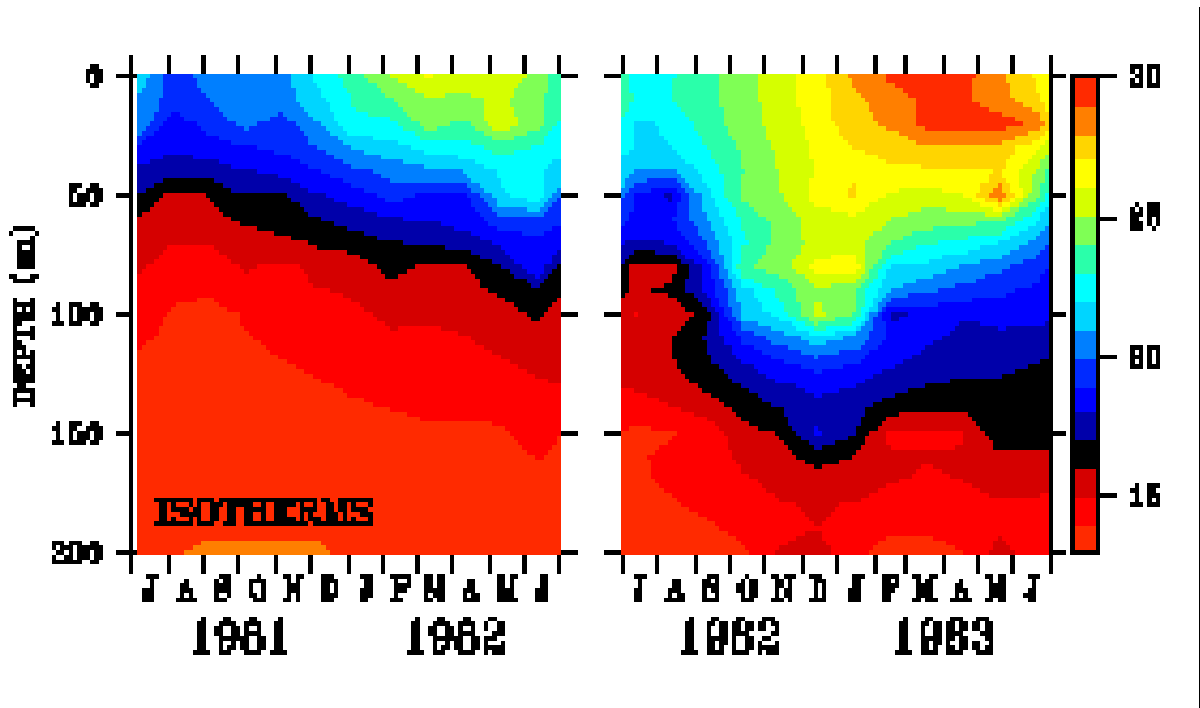


Рис. 1.3 Заглублиение термоклина у берегов Эквадора и Перу.

Рассмотрим, как проявляется Эль-Ниньо в атмосфере. В этом регионе существует два типа циркуляции, называемые ячейками.

Британский математик Гилберт Уокер был первым ученым, изучившим это явление. Он изучил 40 лет метеорологических данных и заметил, что высокое давление над восточной частью южной части Тихого океана всегда сочетается с низким давлением над западной частью Тихого и Индийского океанов. В этой ситуации восточная часть экваториальной зоны Тихого океана становится засушливой, а над Индией и Индонезией выпадает большое количество осадков.

Уокер пришел к выводу, что разница между высоким давлением на востоке и низким давлением на западе создает пассатные ветры с востока на запад вдоль экватора. Воздух поднимается над областью низкого давления, заходит на восток через верхние слои атмосферы, а после опускается обратно в зону высокого давления. Эта атмосферная ячейка и называется циркуляцией Уокера.

Уокер обратил свое внимание на то, что области высокого и низкого давления порой меняют свое местоположение. Он определил это колебание высокого и низкого давления как Южное колебание. На данный момент Эль-Ниньо и Южное колебание считается одним процессом ЭН-Южное колебание.

Ячейка Уокера (рис. 1.4) отвечает за передачу свойств в экваториальной зоне Тихого океана. При нормальных условиях движение происходит с запада на восток (см. Рис.1.4.а) образуя одноячеечную структуру. При действии явления Эль-Ниньо структура становится двухъячеечной и движение происходит как с востока на запад, так и с запада на восток (рис. 1.4.б).[15]

Отличие ячейки циркуляции Уокера от ячейки циркуляции Хэдли в том, что во втором случае перемещение воздуха происходит от экватора к полюсам. В период действия Эль-Ниньо, ячейка Хэдли увеличивается в вертикальных размерах и вытягивается в направлении высоких широт. Такие изменения, происходящие в атмосфере, вызывают изменения не только в осадках, но меняют центры действия атмосферы в ближайших районах, однако эти изменения происходят с некоторой задержкой по времени и считать, что это из-за Эль-Ниньо не нужно. [6]

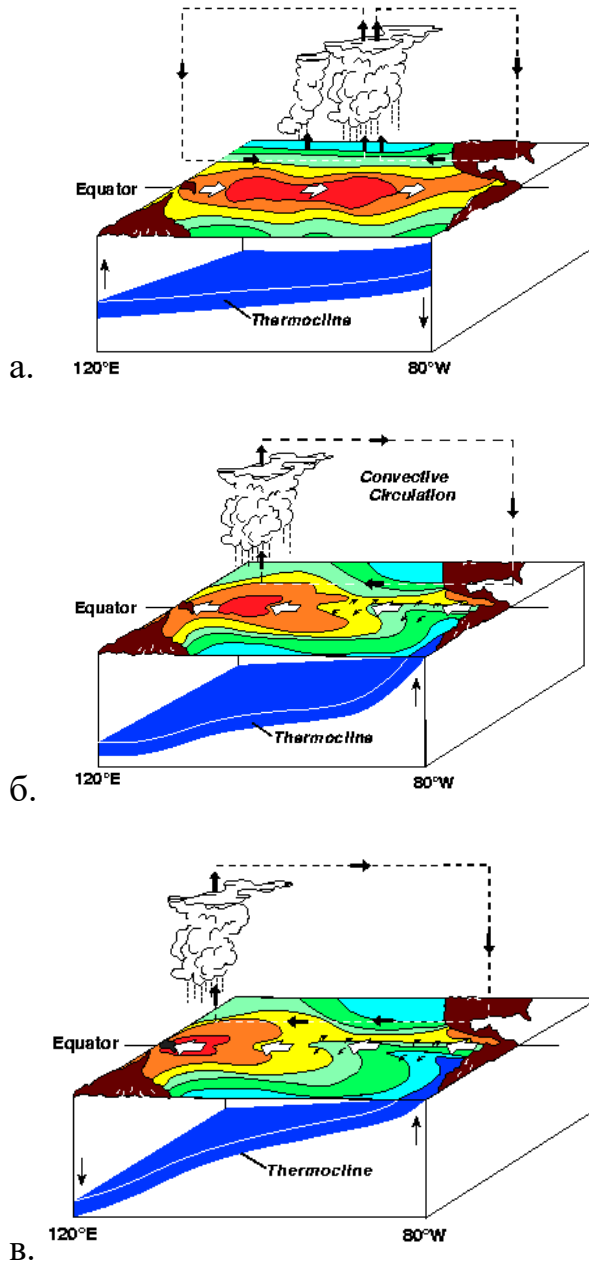


Рис. 1.4 а. – ЭН, б. – нормальное состояние, в. – ЛН.

## Временные масштабы

По имеющимся многолетним наблюдениям сложно оценить квазипериодичность явления Эль-Ниньо без какой-либо предварительной их обработки. Временные интервалы между явлениями составляют от 2-х до 11 лет. Наиболее часто встречающийся промежуток между явлениями 5-6 лет.

Средняя продолжительность явления 5-6 месяцев. Иногда длительность увеличивается до 9-10 месяцев. Наиболее мощные явления протекают в две стадии. Самым ярким примером может служить Эль-Ниньо 1982-1983 г. и 1997-1998 г. При развитии в одну стадию, как правило, сильных явлений не наблюдается.[6]

Оценка временных масштабов, повторяемости явления и продолжительности существования аномалий можно сказать, что Эль-Ниньо - явление сезонное. Если учитывать, что феномен тесно связан с другими процессами в океане и атмосфере, то временные масштабы могут составить и годы. Однако в этом случае рассматривается не само явление Эль-Ниньо и поэтому приходится говорить не о временных масштабах, а о механизмах дальних связей явления.

### **Пространственные масштабы**

Представим пространственные масштабы с двух сторон.

Для начала, при действии явления мы имеем область с аномально теплой водой. Так же, изменение масштабов действия некоторых процессов на нашей планете, на которые больше всего влияет Эль-Ниньо. Площадь аномалий АТПО, в зависимости от характера протекания явления составляет 104 - 105 км<sup>2</sup>. Чаще всего, это довольно условные цифры, т.к. площадь, занимаемая аномалиями, постоянно меняется.

Учитывая интенсивный обмен теплом с атмосферой и, как следствие интенсификацию ячеек циркуляции, пространственные масштабы увеличиваются до 106 - 107 км<sup>2</sup>. Под влияние крупных аномалий, таким образом, попадают и умеренные, и даже высокие широты.

Исходя из этого, Эль-Ниньо можно отнести к крупномасштабным явлениям. Вполне вероятно, что существуют достаточно определенные в физическом и статистическом плане связи Эль-Ниньо с другими глобальными процессами. Анализ таких связей позволит существенно расширить границы исследований. [6]

## Пространственно – временные связи явления Эль-Ниньо

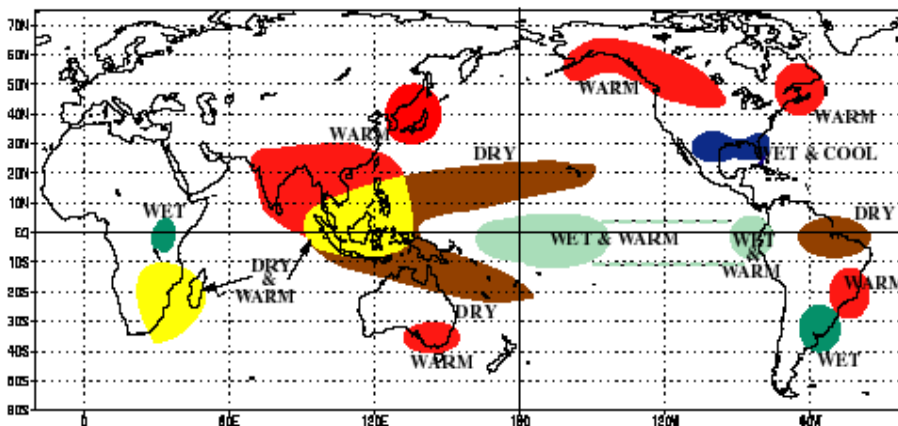


Рис.1.5 Климатические изменения в зимние месяцы.

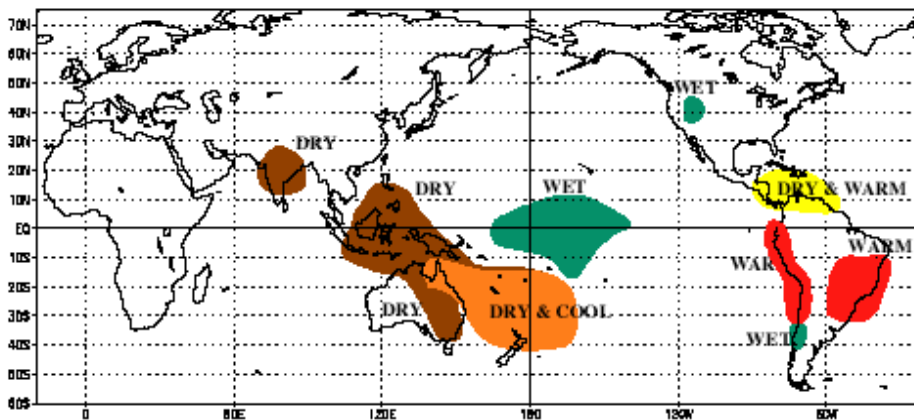


Рис.1.6 Климатические изменения в летние месяцы.

Независимо от того, протекает явление в моменте или нет, климат земли меняется постоянно в течение всего времени.

Климатологи выдвигают версии о том, что изменение солнечной активности определяет то, как влияет Эль-Ниньо на климат, так как в теории отмечалось изменение силы потока лучистой энергии за 6 – 8 месяцев до начала самого явления. Так же, имеет место быть связь феномена с изменением скорости вращения планеты и движении ее полюсов[5,15].

Теоретически отслеживается связь, которая могла быть основополагающей, но это очень ненадежная и не устойчивая связь. Поэтому данные вопросы не поднимаются к подробному рассмотрению.

Изменения в климатической системе нашей планеты происходят во всех ее уголках. Исходя из рисунков 1.5 и 1.6, стоит отметить, что большее влияние на изменения подобного рода Эль-Ниньо оказывает в зимние месяцы, а не в летние. Большинство этих изменений приходится на область действия самого явления и соседние районы, рисунки отражают ситуацию в момент действия феномена без временного сдвига. [8,6]

Система океан-атмосфера быстро и остро реагирует на изменения, происходящие в ней. Хорошо картину отражают тропические дожди, которые влияют на ветры по всей планете.

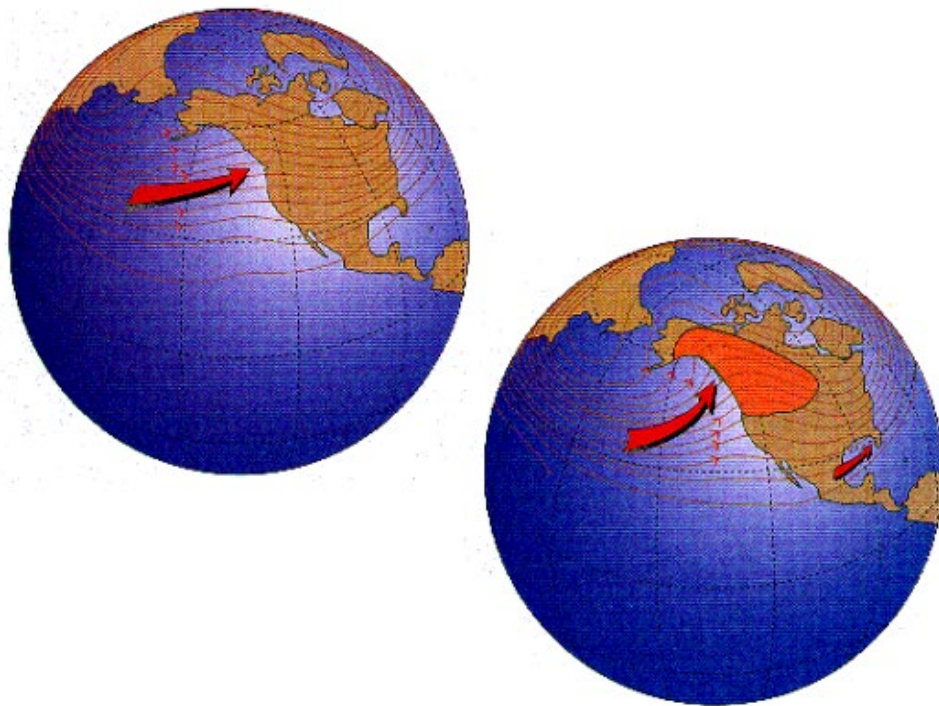


Рис.1.7 Глобальные эффекты.[15]

На рисунке 1.7 представлены глобальные эффекты, а именно нормальное состояние зимы и зима в период действия феномена.

Как всем известно, атмосфера гораздо быстрее реагирует на все изменения, чем океан. Мы можем узнать о последствиях явления уже через несколько недель путем переноса на большие расстояния, например, течениями.[6] Примером может послужить цепочка, где при увеличении силы Гольфстрима произойдет рост температуры в североευропейской части Евразии, что приведет к аномалиям во льдах в северных морях и мы получим изменение в местоположении некоторых атмосферных образований.

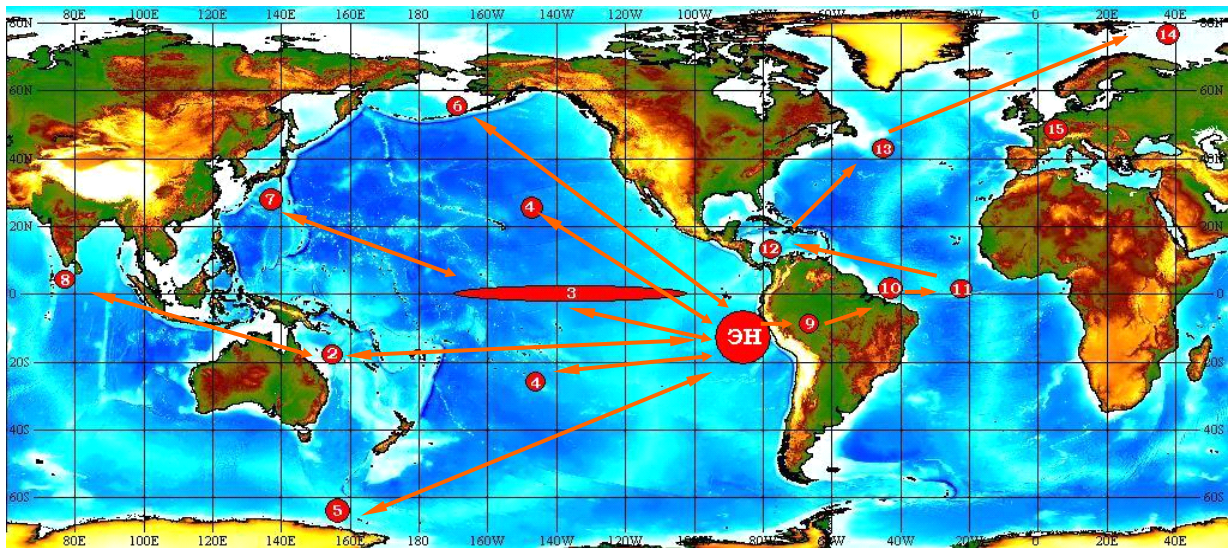


Рис. 1.8 Пространственные и временные связи явления ЭН и других крупномасштабных процессов.

Индексы на рисунке 1.8 означают следующее:

2. Индекс ЮК начинает резко падать примерно за 6 месяцев до начала ЭН.
3. Перемещение аномально теплых вод к центральной части ТО происходит в течение примерно 6 месяцев. Интенсификация ячейки циркуляции Уокера происходит примерно через две недели после начала ЭН.
4. Интенсификация ячейки циркуляции Хэдли происходит примерно через две недели после начала ЭН.



5. Изменчивость ледовых условий (интенсивное стаивание) в Антарктике происходит через 2-3 года после ЭН. Кроме того, отколовшиеся от Антарктиды ледяные поля через 2-3 года достигают региона ЭН.
6. Смещение Алеутского минимума начинается через 4-6 недель после начала ЭН.
7. Интенсификация циклонической деятельности и увеличение числа ураганов в центральной и ЮЗ частях Тихого океана – через 1-2 месяца после начала ЭН.
8. Засухи на п-ове Индостан наблюдаются через 4-5 месяцев после потепления в регионе ЭН.
9. Интенсивные осадки на побережье Эквадора и Перу выпадают через 2-3 недели после начала ЭН.
10. Изменение мутности воды у восточного побережья Южной Америки - через 1-2 месяца после развития ЭН.
11. Интенсификация увеличение числа ураганов и изменение их траекторий в центральной и ЮЗ частях Атлантического океана – через 2-3 месяца после начала ЭН.
12. Изменение гидрологического режима Карибского бассейна – 3-5 месяцев после ЭН.
13. Интенсификация течения Гольфстрим – через 7-12 месяцев после события ЭН.
14. Изменение ледового режима Баренцева моря – через 2-3 года после события ЭН.

### **Эль-Ниньо и Южное колебание**

Выше мы убедились в том, что при наличии пространственно-временных связей по факту явления ЭН можно предвидеть изменчивость климатических характеристик на планете. В этом случае ЭН является предиктором. А есть ли предикторы у ЭН?

Одним из возможных предикторов ЭН может являться Южное Колебание. ЮК представляет собой разность давлений между станциями на м. Дарвин (Австралия) и о. Таити. Впервые крупномасштабные климатические колебания (разность  $P_a$ ) между Тихим и Индийским океанами описал Уокер. Многие ученые отмечают устойчивую связь ЭНЮК и выражают уверенность,

что эти два явления можно объединить в одну группу. Мнения ученых не всегда совпадают. Именно это обстоятельство и способствует продвижению современных научных изысканий.

ЭН и ЮК имеют различную внутреннюю структуру изменчивости и совмещать эти два процесса в единую систему не желательно. Однако факты есть факты. Ход индекса ЮК и прогрева воды у берегов Эквадора и Перу в сопряженных временных интервалах практически всегда одинаков. Начало резкого падения индекса ЮК происходит за 5-6 месяцев до начала ЭН. Все было бы очень просто, если бы не одно обстоятельство. Дело в том, что бывают ситуации, когда в период ЭН наблюдается два минимума ЮК. Первый соответствует моменту наибольшего прогрева вод, а второй - после того, как океан возвращается в свое обычное состояние (например, ЭН 1972г.). Почему это происходит, пока не понятно. Ясно одно, ЮК - один из возможных предикторов ЭН. Как осуществляется связь ЭНЮК? Этот вопрос остается пока до конца не решенным.

### **Эль-Ниньо и ледовитость Антарктики**

Вечная проблема всех антарктических метеорологических исследований – это очень короткий период наблюдений, который составляет около 50 лет на Антарктическом полуострове и намного меньше в других точках наблюдений.

Учеными подтверждено, что феномен, происходящий в тропической части Тихого океана, оказывает сильные климатические сигналы на Антарктику.

Во многих смыслах антарктический морской лед представляет собой один из наиболее привлекательных способов исследования того, как влияет ЭНЮК на климат в высоких широтах, так как большая часть льда тает каждый год, а развитие морского льда в зимний период крайне зависит от атмосферной циркуляции. Но на данный момент, наших знаний по вопросу того, как океан влияет на развитие и поддержание морского льда, недостаточно.

Учеными отмечено, что зимний морской ледяной покров в восточной части моря Росса и в море Беллинсгаузена находится под сильным влиянием атмосферного потока через прямое воздействие поля ветра на морской лед. Поэтому можно ожидать, что найдутся некоторые данные ЭНЮК в морском

льду Антарктики на временных шкалах относительно сезонов, но связь между циркуляцией и площадью морского льда является сложной.

Самым ранним исследованием, в котором предполагалась связь между морским льдом Антарктики и ЭНЮК, было исследование 1965 года. Была обнаружена периодичность от 2 до 4 лет в ледовом покрове в секторе моря Уэдделла, но тогда теория о связи с ЭНЮК не выдвигалась.

Исследования показали, что изменения, которые вносит Эль-Ниньо в тропическую атмосферную циркуляцию, приводят к возникновению крупномасштабных атмосферных волн и чередующихся областей высокого и низкого давления, которые распространяются от тропической части Тихого океана на юг до Антарктиды. Эти волны называются волнами Россби. Они оказывают влияние на погоду и климат Северного полушария, как ЭНЮК и другие явления. Атмосферные волны в южной части Тихого океана во время Эль-Ниньо описываются давлением выше среднего вблизи экватора, ниже среднего к востоку от Новой Зеландии и выше среднего над Южным океаном вблизи Антарктиды[14].

Существует область, которая называется, как низкий уровень моря Амундсена. Это область низкого давления, где, учитывая влияние ЭНЮК, давление в море Амундсена меньше среднего значения и именно поэтому ЭНЮК оказывает влияние на Антарктику.

Под руководством Фернандо Паоло, учеными было определено общее количество шельфовых льдов, относительно того, сколько выпадает снега, и какая часть льда тает у его основания.

Когда давление над морем Амундсена выше нормы, как обычно происходит во время Эль—Ниньо, ветры дуют с северо-запада на юго-восток. Происходит перенос более теплого и влажного воздуха в Антарктиду, из-за чего выпадает большое количество снега. Но также происходит подъем теплых вод из глубины, что ведет к таянию льда у его основания.

Цель исследования, которое проводил Паоло, - это возможность выяснить что именно оказывало большее влияние на шельфовые ледники Антарктики: количество осадков или таяние основания ледника. Известно, что снег со временем уплотняется в лед, что увеличивает массу ледника. Но они обнаружили, что в основе таяние снизу, вызванное увеличением подъема

приполярных глубинных вод оказывает самое сильное влияние на шельфовый ледник. В конечном итоге Эль-Ниньо приводит к уменьшению массы ледяного шельфа в Антарктике.

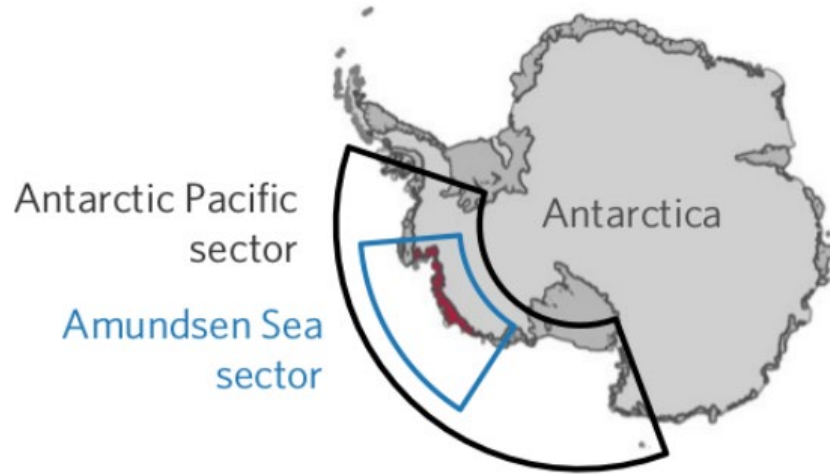


Рис.1.9 Карта областей в Западной Антарктиде, на которые Эль-Ниньо оказывает наибольшее влияние

В результате, шельфовые ледники в море Амундсена во время Эль-Ниньо сильно увеличиваются в объеме наземной части, но при этом сильно тают под водой. При этом, опираясь на мнение ученых, масса выпавшего снег в пять раз меньше массы растаявших подводных частей ледника, растаявших за тот же период из-за теплых течений. [4]

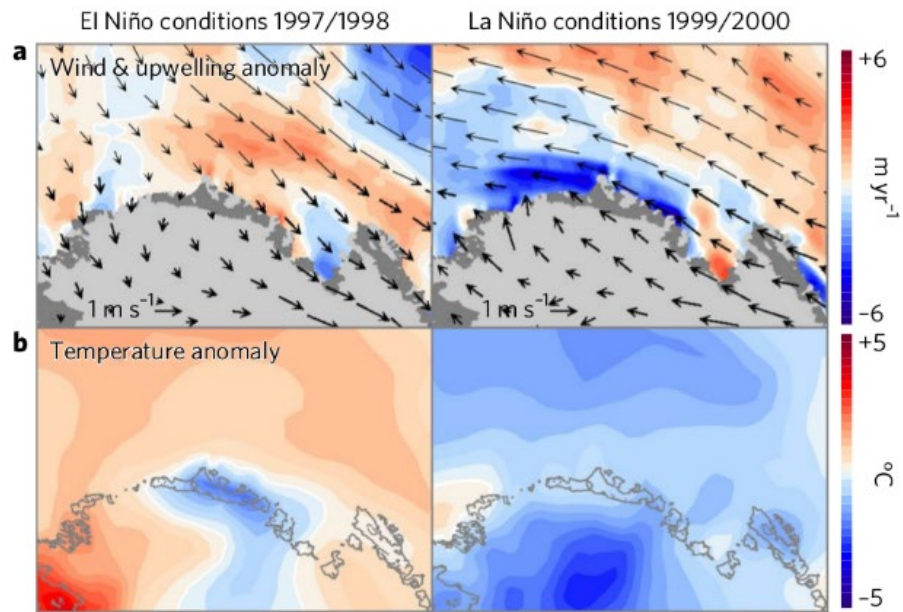


Рис. 1.10 Карта ветровых и температурных аномалий на побережье моря Амундсена в течение Эль-Ниньо (слева) и Ла-Ниньи (справа).

Вовремя Ла-Нинья наблюдается обратное: ветер дует в обратном направлении, в результате чего температура и количество осадков понижаются.

### **Некоторые гипотезы происхождения явления Эль-Ниньо**

Теоретически можно выделить три главных гипотезы о том, как произошло явление.

Во-первых, все зависит от процессов, которые происходят в области действия феномена. То есть, ослабление пассатных ветров недалеко от Южной Америки влечет за собой ослабление апвеллинга и уменьшение сгона холодных вод, что ведет к увеличению ТПО. Однако не понятно, почему ослабевает апвеллинг, почему он не прекращается полностью и почему увеличение ТПО происходит локально, а не на всей территории Тихого океана.

Во-вторых, влияние оказывают процессы, которые происходят в ближайших районах, относительно области действия явления. В данном случае можно рассмотреть волны Кельвина, вызванные разницей в давлении. Волны движутся вдоль экватора, но изменяя свою амплитуду, у берегов Эквадора и Перу влекут заглубливание термоклина. И эта теория имеет место быть за одним исключением, не понятно, почему ослабевают ветра и ослабевает апвеллинг близ побережья.

В-третьих, рассматриваются все изменения в климатической системе на глобальном уровне. Поговорим о вероятном влиянии внешних факторов (луна, солнце) при формировании Эль-Ниньо? Теоретически считается, что вспышки на солнце напрямую отражаются на климате планеты.

Если говорить про гипотезы формирования явления, то следуют рассматривать их в комплексе, а не по отдельности. Эти гипотезы говорят нам о том, что Эль-Ниньо – явление, которое сильно проявляется в климатической системе планеты, но также становится понятно, что точной, официальной гипотезы возникновения до сих пор нет.

## Исходные данные

Исходные данные представлены рядом интенсивности явления Эль-Ниньо с 1525 по 2019 года, рассматриваемый временной интервал составляет 494 года.

Так же для анализа внутренней структуры явления Эль-Ниньо рассматривались три ряда: Ряд Эль-Ниньо – Южное Колебание, дендрологический ряд и ряд отклонений ЭНЮК. Все ряды с 1119 по 1994гг, рассматриваемый период составляет 876 лет.

## Выводы

### Методы исследований

В рамках данной работы будем использовать следующие методы:

1. Расчет первичных статистических моментов;
2. Расчет АКФ и СПФ;
3. Использование полученных результатов для выполнения экстраполяции статистико-вероятностными методами;
4. Методическое прогнозирование выбранного параметра.

### Элементарная статистика

В данной работе использовались следующие статистики для общего представления об исследуемом параметре[13]:

Среднее 
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.1)$$

Амплитуда колебаний 
$$A = X_{\max} - X_{\min} \quad (2.2)$$

Дисперсия 
$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.3)$$

Среднеквадратическое отклонение 
$$\sigma = \sqrt{D} \quad (2.4)$$

Коэффициент асимметрии

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n\sigma^3} \quad (2.5)$$

Коэффициент эксцесса

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 - 3}{n\sigma^4} \quad (2.6)$$

### Эмпирические гистограммы

Цель данного анализа – это определение характеристик интенсивности процесса или явления и повторяемости его характерных и экстремальных значений. [13]

Гистограмма строится при использовании следующих соотношений:

количество интервалов:  $K_{\text{инт.}} = 5 \lg N \quad (2.7)$

размер интервала:  $R_i = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) / K_{\text{инт.}} \quad (2.8)$

Далее считается количество значений, что попадают в определенный интервал и проводится анализ результатов.

### Функция спектральной плотности и автокорреляционная функция

Спектр – это периодичность во внутренней структуре исходного ряда. Используется для исследования закономерностей его частотной структуры, при моделировании и прогнозе квазистационарных процессов.

Параметрами функций принято считать:

1. Период ( $\tau$ ),
2. Частоту (линейную ( $f=1/\tau$ ) или циклическую ( $\omega=2\pi/\tau$ )),
3. Амплитуду (размах колебаний ( $\dot{A}$ ))
4. Фазовый угол (сдвиг по времени относительно начала отсчета ( $\varphi$ )).



Спектральные оценки рассчитываются по автокорреляционной функции (АКФ) обратным преобразованием Фурье (алгоритм быстрого преобразования Фурье) или на основе регрессионных оценок. [10]

$$S(f) = 2/m \left\{ R_0 + 2 \sum_{i=1}^m R_i * \text{Cos}(2\pi f_i / f_h) + R_m * \text{Cos}(2\pi f_i / f_h) \right\} \quad (2.9)$$

где:

$f=1/\tau$  - частота;

$F_h = 1/2\Delta t$  - частота Найквиста;

$R_0, R_i, R_m$  - оценки автокорреляционной функции.

Оценки автокорреляционной функции проводились по формуле:

$$R_i = \frac{1}{\sigma_X^2(N-M) \sum_{j=1}^{N-M} (X_j - \bar{X}) * (X_{i+j} - \bar{X})}; \quad i=0, \dots, M \quad (2.10) [12]$$

Для снижения влияния длины исходной выборки и максимального сдвига АКФ на результирующую оценку спектральной плотности используют специальную функцию называемую "спектральное окно". Эта функция способствует удалению из АКФ мелких флуктуаций, обусловленных влиянием ограниченности исходного ряда. Конкретный вид спектрального окна задается по-разному [3,10]:

$$\text{окно Хемминга: } H_i = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \text{Cos}(\pi i / \tau_0) & i \leq \tau_0 \\ 0 & i > \tau_0 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{окно Парзена: } H_i = \begin{cases} 1 - 6\tau^2 / \tau_0 (1 - i/\tau)^2 & i \leq \tau_0 \\ 0 & i > \tau_0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Характерной особенностью практически всех спектральных окон и частотно-весовых функций - они производят сглаживание АКФ-оценок (окно Хемминга может приводить к появлению отрицательных ординат спектра) и, следовательно, искажают оценки спектральной плотности.

Верхний и нижний доверительные интервалы, соответственно рассчитываются по соотношениям:

$$S_0(f) - \frac{X^2}{\nu} < S(f) < S_0(f) + \frac{X^2}{\nu}. \quad (2.13)$$

где:  $S_0(f) = \sum_{f=0.01}^{2\pi} S_0(f) / N$ ;  $\nu = \frac{2N - m / 2}{m}$  [6,10,13]

Спектр красного шума рассчитывается по формуле:

$$S(f)_{\text{к.ш.}} = \frac{1 - R_1^2}{1 + R_1^2 - 2R_1 \cos(2\pi f)} \quad (2.14)$$

Таким образом, физический смысл функции спектральной плотности состоит в том, что она означает плотность дисперсии случайной квазистационарной функции на данной частоте.

### **Полосовая фильтрация. Полосовой фильтр Баттерворта.**

Фильтрация - одна из очень важных и полезных процедур при глубоком и тщательном анализе особенностей внутренней структуры временных рядов. Метод полосовой фильтрации возник из технических приложений и используется для выделения из исходного процесса полезного сигнала при условии, что известен его частотный диапазон.

В океанологии, полосовая фильтрация может применяться в целях выделения долгопериодных колебаний (трендов), отделение синоптической изменчивости от внутригодовой, выделение суточных колебаний и т.д. Кроме того, при помощи полосовых фильтров можно представить сложную структуру исходного ряда в виде набора простых составляющих и использовать результаты такого представления в аналитических или прогностических целях. [12]

Наиболее распространенными являются четыре типа фильтрации:

1. низкочастотная;

2. высокочастотная;
3. полосовая;
4. режекторная.

При низкочастотной фильтрации подавляются высокочастотные составляющие исследуемого процесса и выделяются низкочастотные (например, тренд). При высокочастотной - гасятся низкочастотные составляющие (например, исключение годового хода из ряда ежесуточных наблюдений). Полосовая (пропускающая) фильтрация позволяет выделить из исходной выборки некоторую, интересующую исследователя, полосу частот (например, выделение сезонной изменчивости из ряда, где есть годовой ход и внутрисуточные колебания). Режекторная (заграждающая) фильтрация решает задачу, обратную полосовой. [9]

Основным достоинством полосовой фильтрации следует считать возможность учета "неправильности" природных колебаний. Например, традиционно удаление годового хода производится путем вычитания из исходных данных средних многолетних аномалий, рассчитанных за каждый месяц года. Однако, в подавляющем большинстве случаев, сохраняется пик спектральной плотности с близким к годовому ходу квазипериодом между одноименными минимумами.[6,12] Следовательно, эта составляющая исключена не полностью. Это происходит потому, что на самом деле временной промежуток между максимумами (или минимумами) в ходе выбранного в примере параметра, строго не равен календарному году. Таким образом, при удалении квазипериодической составляющей традиционным способом мы не достигаем полноты фильтрации.

Полосовая фильтрация позволяет выделять интересующую исследователя изменчивость именно в терминах "квази", т.е. отфильтровать из исходного ряда не только сам "фиксированный" пик, но и его колебания в пределах некоторого интервала. Для исследователя это важно со следующих основных позиций:

1. существенная чистота эксперимента, т.к. изменчивость отфильтрованная из исходного ряда в некотором частотном диапазоне, далее не проявляется;

2. в чистом виде выделенная квазипериодическая составляющая позволяет провести детальный анализ ее временной изменчивости, оценить нестационарность по амплитуде и ее вклад в общую изменчивость ряда.

Используя полосовую фильтрацию, исходный ряд, обладающий сложной внутренней структурой можно представить в виде набора простых структур, причем без существенных потерь информации об исследуемом процессе.[12]

### Полосовой фильтр Баттерворта

Фильтр Баттерворта является наилучшим вариантом между затуханием и фазовой характеристикой. У него нет пульсаций в полосе пропускания или полосе остановки, и из-за этого его иногда называют максимально плоским фильтром. Фильтр Баттерворта достигает своей плоскостности за счет относительно широкой области перехода от полосы пропускания к полосе пропускания со средними переходными характеристиками. [12]

Одним из наиболее мощных, на сегодняшний день, инструментов фильтрации является полосовой цифровой фильтр Баттерворта. Один из способов представления цифровых фильтров является линейное дифференциальное уравнение в частотно-разностной рекуррентной форме, которое связывает отфильтрованный ряд  $\{Y_i\}_{i=1}^N$  с неотфильтрованным  $\{X_i\}_{i=1}^N$  следующим соотношением:

$$Y_i = \sum_{k=0}^K b_k X_{j-k} - \sum_{l=1}^L \alpha_l Y_{j-l} \quad (2.15) [12]$$

где:

$b_k, \alpha_l$  - действительные числа, коэффициенты фильтра.

Применив к уравнению (2.13) дискретное преобразование Фурье, получим другое выражение для фильтра:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{k=0}^K \beta_k Z^{-k}}{\sum_{l=1}^L \alpha_l Z^{-l}} \quad (2.16)$$

где:

$Z = \exp(i\omega\Delta)$  - интервал дискретизации рядов  $\{X_i\}$  и

$\{Y_i\}$ ;

$X(\omega)$  и  $Y(\omega)$  - их Фурье изображения.

Функция  $H(\omega)$  называется передаточной функцией фильтра и является его характеристикой. Она выражает связь между частотными представлениями рядов  $\{X_i\}$  и  $\{Y_i\}$ ; и имеет значения в комплексной области, т.е.  $H(\omega)$  можно представить в виде:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(-i\varphi(\omega)) \quad (2.17)$$

При таком представлении функцию  $|H(\omega)|$  называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра. Она выражает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и неотфильтрованного ряда с некоторой заданной частотой, в каждой точке частотного диапазона. Фазочастотная характеристика фильтра  $\varphi(\omega)$  выражает зависимость сдвига фаз от частоты в отфильтрованном и неотфильтрованном рядах. Эти характеристики вычисляются по следующим формулам [11,12,13]:

$$|H(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Im}^2[H(\omega)] + \operatorname{Re}[H(\omega)]^2} \quad (2.18)$$

Так как выражение (2.14) - дробно-рациональная функция с полиномами в числителе и знаменателе, ее можно представить, как множители первого и второго порядка с действительными коэффициентами. Рассмотрим специальный вид передаточной функции:

1. числитель и знаменатель имеет четные порядки;
2. в числителе и знаменателе отсутствуют сомножитель первого порядка;
3. все сомножитель второго порядка в числителе равны между собой.

Корни знаменателя (относительно  $\omega$  а не  $Z^{-1}$ ) называют полюсами передаточной функции, корни числителя - нулями. В силу наложенных ограничений полюса и нули встречаются парами комплексно-сопряженных. Таким образом, передаточная функция примет вид:

$$H(\omega) = \frac{M_1 (b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2})}{\prod_{m=1}^{M_1} (1 + a_{1m} Z^{-1} + a_{2m} Z^{-2})} \quad (2.19)$$

Величина  $M=2M_1$  называется порядком передаточной функции или порядком фильтра;  $M$  совпадает с порядком полиномов, стоящих в числителе и знаменателе  $H(\omega)$ . Таким образом, передаточная функция будет выглядеть следующим образом [12]:

$$H(\omega) = H_1(\omega) + H_2(\omega) + \dots + H_{M1}(\omega) \quad (2.20)$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{\operatorname{tg}(\omega\Delta/2)}{\operatorname{tg}(\omega_c\Delta/2)} \right]^{2M}}} \quad (2.24)$$

где:  $\omega_c$  - частота среза.

График квадрата этой функции при различных  $M$  и фиксированных  $\Delta$  и  $\omega_c$  приведен на рис.2.1. Из рисунка видно, что при повышении порядка фильтра крутизна  $|H(\omega)|$  вблизи частоты среза увеличивается, приближаясь к идеальной (сплошная вертикальная линия).

Алгоритм вычисления коэффициентов фильтра основан на том, что передаточная функция с точностью до постоянного множителя определяется своими плюсами и нулями, а нули и плюсы модуля передаточной функции у нее самой совпадают.

Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра Баттерворта при различных значениях порядка фильтра.

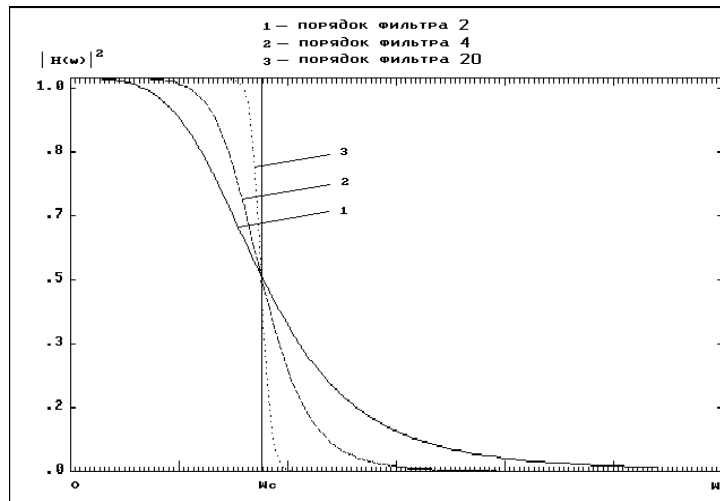


Рис. 2.1 Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра Баттерворта при различных значениях порядка фильтра. [12]

Приведем результат:

$$a_{1m} = -2 \frac{1 - t^2}{1 + 2t \operatorname{Sin}(\gamma_m) + t^2}$$



$$a_{2m} = \frac{1 - 2t \sin(\gamma_m) + t^2}{1 + 2t \sin(\gamma_m) + t^2} \quad (2.25)$$

где:

$$t = \operatorname{tg}(\omega_c \Delta / 2), \quad \gamma_m = (-\pi + 2\pi m) / 2M, \quad m=1, 2, \dots, M_1$$

$$b_0 = \frac{1}{4} \left[ \prod_{m=1}^{M_1} (1 + a_{1m} + a_{2m}) \right]^{\frac{2}{M}} \quad (2.26)[12]$$

$$b_1 = 2 b_0$$

$$b_2 = b_0$$

Поскольку фазочастотная характеристика не постоянна на интервале  $[0, \pi/\Delta]$ , то различные частоты в отфильтрованном ряду оказываются сдвинутыми на различные фазовые углы. Это вносит искажения в процесс фильтрации. [12]

Недостаток этот можно устранить, если фильтровать исходный ряд одним и тем же фильтром дважды: сначала в одном направлении, потом в другом. В результате первой фильтрации каждая гармоника сдвинется на  $\Delta\varphi(\omega_0)$ , в результате второй на  $-\Delta\varphi(\omega_0)$ , т.е. окажется в той же фазе, что и в исходном ряду. [2,12] Реальный сдвиг по времени для каждой частоты вычисляется по формуле:

$$\Delta n_j = \varphi(\omega_j) / (\omega_j \Delta)$$

$$\text{где } 0 \leq \varphi(\omega_j) \leq 2\pi \quad (2.27)$$

Значения  $\varphi(\omega_j)$  вычисляется согласно формуле (2.23) с учетом соотношения:

$$\arg(Z_1 \cdot Z_2) = \arg(Z_1) + \arg(Z_2); \quad (2.28)$$

$$\varphi(\omega_j) = M_1 \varphi_1(\omega_j) - \sum_{m=1}^{M_1} \varphi_{2m}(\omega_j) \quad (2.29)$$

где:

$$\varphi_1(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ -\frac{b_1 \sin(\omega\Delta) + b_2 \sin(2\omega\Delta)}{b_0 + b_1 \cos(\omega\Delta) + b_2 \cos(2\omega\Delta)} \right];$$

$$\varphi_{2m}(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ -\frac{a_{1m} \sin(\omega\Delta) + a_{2m} \sin(2\omega\Delta)}{1 + a_{1m} \cos(\omega\Delta) + a_{2m} \cos(2\omega\Delta)} \right]. \quad (2.30)$$

Чтобы не потерять информацию об исходном процессе, необходимо перед первой фильтрацией продолжить ряд вправо на величину:

$$n_{\varphi} = \max_j \Delta n_j \quad (2.31)$$

где:  $\omega_j \in (0, \pi/\Delta)$

Таким образом, исключая фазовые ошибки, мы увеличиваем время фильтрации вдвое и возводим в квадрат модуль передаточной функции, уменьшая крутизну  $|H(\omega)|$  вблизи частоты среза. [12]

Для любого фильтра начало фильтрации не определено. Кроме того, фильтр имеет определенное время настройки, которое зависит от  $M$ ,  $\Delta$ ,  $\omega_c$  и равно времени затухания импульсной функции отклика (т.е. обратного преобразования Фурье от передаточной функции фильтра). Для тангенсных фильтров Баттерворта эмпирическая оценка времени затухания импульсной функции отклика (количества точек) выражается соотношением:

$$n_T \approx 3,8(M+1)/(\omega_c \Delta) \quad (2.32)$$

Эта оценка дает затухание импульсной функции отклика до 1% и ее использование достаточно для практических нужд фильтрации. [12,15] Настройка фильтра может сильно исказить ряд. В связи с этим перед фильтрацией необходимо продолжить ряд влево, а поскольку предусмотрена фильтрация в обратную сторону, то и вправо.

Одним из способов продолжить ряд - вероятностное прогнозирование. В качестве метода прогнозирования выбрана модель линейного роста Брауна с адаптивными коэффициентами. Прогнозирование распадается на два этапа: 1) адаптация коэффициентов модели по ряду; 2) продолжение ряда.

Рассмотрим продолжение ряда вправо (продолжение влево производится аналогично). Поскольку процесс адаптации пошаговый, необходимо задать начальное приближение для коэффициентов модели:  $g_1^{(0)} = x_0$ ;  $g_2^{(0)} = 0$ . [12]

Очередное приближение получается следующим образом:

$$\hat{x}_{j+1} = g_1^{(j)} + g_2^{(j)}$$

$$\varepsilon = x_{j+1} - \hat{x}_{j+1}$$

$$g_1^{(j+1)} = \hat{x}_{j+1} + (1 + \beta^2)\varepsilon$$

$$g_2^{(j+1)} = g_2^{(j)} + (1 + \beta)^2 \varepsilon \quad (2.33)$$

где:  $g_1^{(j)}$ ,  $g_2^{(j)}$  -  $j$ -е приближение коэффициентов модели;

$x_j$  - значение ряда в точке;

^

$x_j$  - прогноз значения в  $j$ -й точке сделанный на шаг раньше.

При помощи такого решения получим значения коэффициентов модели в последней точке ряда  $g_1^{(N)}$ ,  $g_2^{(N)}$ . Продолжая ряд вправо, моделируем необходимое количество значений:

$$x_{N+k} = g_1^{(N)} + k g_2^{(N)} \quad (2.34)$$

Параметр  $\beta$  в формулах (2.32) характеризует время "забывания" значений ряда при адаптации коэффициентов и принимает значения в интервале (0,1).[12]

При  $\beta$  близких к 1, прямая (2.33) будет средней линией большего числа последних точек ряда, при  $\beta$ , близких к 0,-меньшего. При практическом использовании рекомендуется пользоваться формулой:

$$\beta = 1 - \omega_c \Delta / \pi \quad (2.35)$$

Таким образом, алгоритм фильтрации выглядит следующим образом:

1. назначение параметров  $M$ ,  $\Delta$ ,  $\omega_c$  ;
2. вычисление коэффициентов фильтра по формулам (2.24)-(2.25);
3. вычисление  $n_\phi$  по формулам (2.26)-(2.30)
4. вычисление  $n_r$  по формуле (2.31);
5. продолжение ряда вправо и влево при помощи алгоритма (2.32) -(2.34);
6. фильтрация продолженного ряда по (2.22);
7. получение результата фильтрации отбрасыванием продолженных точек.

Высокочастотная фильтрация мало чем отличается от низкочастотной. Амплитудно-частотная характеристика тангенсного высокочастотного фильтра Баттерворта порядка  $M$  задается формулой:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\operatorname{tg}(\omega_c \Delta / 2)}{\operatorname{tg}(\omega \Delta / 2)} \right)^{2M}}} \quad (2.35)[10]$$

Ее вид нетрудно себе представить:

$$|H(\omega_c)| = 1/\sqrt{2} \quad (2.36)$$

Коэффициенты фильтра вычисляются тем же способом, что и для низкочастотного фильтра, т.е. при помощи нулей и плюсов. Для них справедливы формулы:

$$a_{1m} = -2 \frac{c^2 - 1}{1 + 2c \sin \gamma_m + c^2};$$

$$a_{2m} = \frac{1 - 2c \sin \gamma_m + c^2}{1 + 2c \sin \gamma_m + c^2}. \quad (2.37)$$

где:  $c = \text{ctg}(\omega_c \Delta / 2)$ ,  $\gamma_m = (-\pi + 2\pi m) / 2M$ ,  $m = 1, 2, \dots, M_1$ ;

$$b_0 = \frac{1}{4} \left[ \prod_{m=1}^{M_1} (1 - a_{1m} - a_{2m}) \right]^{\frac{2}{M}};$$

$$b_1 = -2b_0; \quad b_2 = b_0. \quad (2.38)$$

Напомним, что  $M$ -четное и  $M = 2M_1$ .

Для высокочастотного фильтра справедливы все приведенные выше замечания о трудностях фильтрации, и алгоритм отличается лишь видом формул во втором пункте. вместо формул (2.24)-(2.25) используются формулы (2.37)-(2.38) [10,12].

Полученные алгоритмы высокочастотной и низкочастотной фильтрации имеют следующие положительные черты:

1. обладают всеми достоинствами цифровых фильтров Баттерворта;
2. фильтрация бесфазовая, учтена настройка фильтра;
3. различия между алгоритмами невелики и их можно совместить в одной программе;
4. комбинацией высокочастотного и низкочастотного фильтров можно получить и полосовой и режекторный фильтры.

Следует отметить, что параметры  $\Delta$ ,  $\omega_c$  надо выбирать исходя из характеристик ряда и задач фильтрации. Примерами тому могут служить увеличение времени счета при повышении порядка фильтра и увеличение крутизны  $|H(\omega)|$  вблизи частоты среза. [13,12]

## Статистико-вероятностные методы экстраполяции временных рядов

Экстраполяция гидрометеорологических и биологопромысловых характеристик достаточно трудная задача. Во-первых, из-за того, что процессы, происходящие в океане и атмосфере сами по себе очень сложны, как по своей структуре, так и по характеру взаимодействия между собой, и, во-вторых, из-за недостатка научно обоснованных знаний, позволяющих адекватно описывать эти процессы. Кроме того, взаимодействие между фундаментальной теорией и результатами математического описания реальных данных (в аналитических и прогностических целях) остается крайне сложным. Исследования последних лет показали, что природным процессам свойственны неоднородность и нестационарность в изменчивости, что не позволяет рассматривать их как хорошо организованную поддающуюся строгому описанию систему. [11]

Следующим положительным моментом статистико-вероятностного подхода к проблеме прогнозирования, следует считать открывающуюся возможность "стандартизовать" процесс прогнозирования и ослабить загромождение науки интуитивными решениями, практически не поддающимися теоретическому осмыслению. В качестве примера можно привести прогностические схемы для одних и тех же регионов, обладающих одинаковой или почти одинаковой оправдываемостью. Такие схемы эффективны только для экстраполяции тех типов процессов и для тех пространственно-временных связей, на которые они настроены. При смене тенденции течения процесса или полной его перестройке схема как правило "разваливается" и для восстановления ее работоспособности требуются определенные усилия, а главное время. Определенные сложности возникают и в плане интерпретации результатов. Таким образом, применение комплекса статистико-вероятностных методов каждый из которых хорошо описывает "свои" типы процессов, может стать хорошим базовым инструментом для специалистов в области оперативного прогнозирования. [11]

Практически любая прогностическая схема - это некая модель развития исследуемого процесса. Причем зачастую не так уж и важно, глубоко физична или математически формальна эта модель. Основным критерий качества любой модели - адекватность описания фактических данных. В этой связи предпосылки для использования моделей основанных на учете закономерностей во внутренней структуре исследуемого процесса следующие:

1. Модели используют единственный входной сигнал - сам исследуемый процесс;
2. Алгоритмы расчетов хорошо поддаются автоматизации;
3. Расчеты не требуют мощных вычислительных ресурсов и сложной аппаратуры;
4. Результаты расчетов достаточно просты в интерпретации и наглядны.

Таким образом, основная задача сводится по существу к объединению наиболее широко известных, на настоящее время, прогностических моделей, основанных на статистико-вероятностных методах, в единый программный комплекс. Прогностическое направление в современной науке развито неизмеримо слабее, чем аналитическое и диагностическое. Частично это связано с тем, что большинство теорий являются полуэмпирическими. При прогнозировании приходится учитывать влияние параметров и явлений, от которых теория, как правило, абстрагируется.[10,11] Это требует постоянного возвращения от прогноза к диагнозу и анализу исходных данных. Таким образом, теория может одновременно хорошо описывать, удовлетворительно объяснять и плохо предсказывать. Совершенствование моделей связано с совершенствованием теорий, их уточнением и наоборот. Отсюда следует, что для реализации такого подхода необходимо учитывать основные методологические принципы построения моделей:

1. принцип системности;
2. согласованность модели со структурой исходных данных;
3. полнота, адаптивность и эволюционность модели;
4. простота модели;

В результате, общая логическая последовательность операций разработки прогностической модели сводится к принципу проведения научных исследований о единстве описания (анализ), объяснения (диагноз) и предсказания (прогноз), как основных звеньев проведения исследования. Очевидно, что именно с этих позиций следует подходить к проблеме экстраполяции различных характеристик, в том числе и промыслово-биологического характера. [8,10]

При реализации моделирования внутренней структуры рядов использовались методы, каждый из которых обладал бы свойством настройки на "свою" структуру развития процесса. В настоящее время таких моделей разработано предостаточно. Однако, моделей, действительно существенно отличающихся по типу воспроизводимых ими процессов, не так много. К ним можно отнести следующие методы:

1. Климатический;
2. Инерционный;
3. Байесовский;
4. Динамико-статистический;
5. Авторегрессионные;
6. Фурье;
7. Средняя комплексация;
8. Регрессионная комплексация.

Таблица.2.1 Соотношения, используемые в статистико-вероятностных методах экстраполяции.[10]

Название метода	Формула
Климатический	$X_i = \bar{X}$
Инерционный	$X_i = X_{i-1}$
Байесовский	$X_i = P_{\max} \cdot X_{i-1}$
Динамико-статистический	$X_i = \sum_{n=1} A_n \cdot X_{i-n}$
Динамико-стохастический	$X_i = A_1 (I) \cdot X_{i-1}$
Авторегрессия-1-го порядка	$X_i = A_{11} \cdot X_{i-1}$
Авторегрессия-2-го порядка	$X_i = A_{21} \cdot X_{i-1} + A_{22} \cdot X_{i-2}$
Авторегрессия-3-го порядка	$X_i = A_{31} \cdot X_{i-1} + A_{32} \cdot X_{i-2} + A_{33} \cdot X_{i-3}$
Фурье	$X_i = \sum_{j=1}^N (A_j \cdot \cos(j\omega t) + B_j \cdot \sin(j\omega t))$
Средняя комплексация	$X_i = 1/m \sum_{j=1}^M X_j$
Регрессионная комплексация	$X_i = 1/m \sum_{j=1}^M B_j \cdot X_j$

Название метода	Формула
	$j=1$

Итоговое прогностическое значение получается после проверки качества работы каждой статистико-вероятностной модели. Для этой цели в исходной выборке необходимо выбрать участок на котором и определяется устойчивость работы методов, оправдываемость прогнозов, области максимальных и минимальных ошибок и т.д

На основе этих оценок формируется итоговое прогностическое значение и рекомендации к его использованию. Применяются следующие критерии проверки надежности метода и выбора лучшего из них[6]:

1. средняя и максимальная ошибка метода;
2. дисперсия ошибки методических прогнозов;
3. оценка оправдываемости моделей по знаку;
4. оценка оправдываемости по критериям  $0.67\sigma$  и  $0.8\sigma$
5. оценка надежности модели;
6. оценка предельной заблаговременности прогноза.

Соотношения, используемые при верификации методических прогнозов представлены в Таблице. 2.2.

Таблица. 2.2. Соотношения, используемые при верификации методических прогнозов

Название соотношения	Формула
Средняя ошибка прогноза	$N$ $Y = 1/N \sum_{i=1}^N Y_i$
Дисперсия ошибки прогноза	$N$ $\sigma^2_y = \sum_{i=1}^N (y_i - y)^2$
Оправдываемость прогнозов по знаку	$P = n_+ / n_+ + n_- * 100$



Оправдываемость по критерию $0.67\sigma$	$P=n0.67\sigma/N*100$
Оправдываемость по критерию $0.8\sigma$	$P=n0.8\sigma/N*100$
Оценка надежности модели	$P=\sigma_y / \sigma_x$
Оценка предельной заблаговременности	$L=\ln[1-\sigma_y(l)]/2\ln r$

Проведя подобную верификацию на методическом участке ряда, отбирается итоговое прогностическое значение. В данной работе право экспертного выбора итогового значения предоставлялось ПЭВМ. [10,13]

Для определения возможности углубленного анализа внутренней структуры анализируемых выборок использовалась полосовая тангенсная фильтрация Баттерворта. Алгоритм расчетов представлен на рисунке 2.3[10].

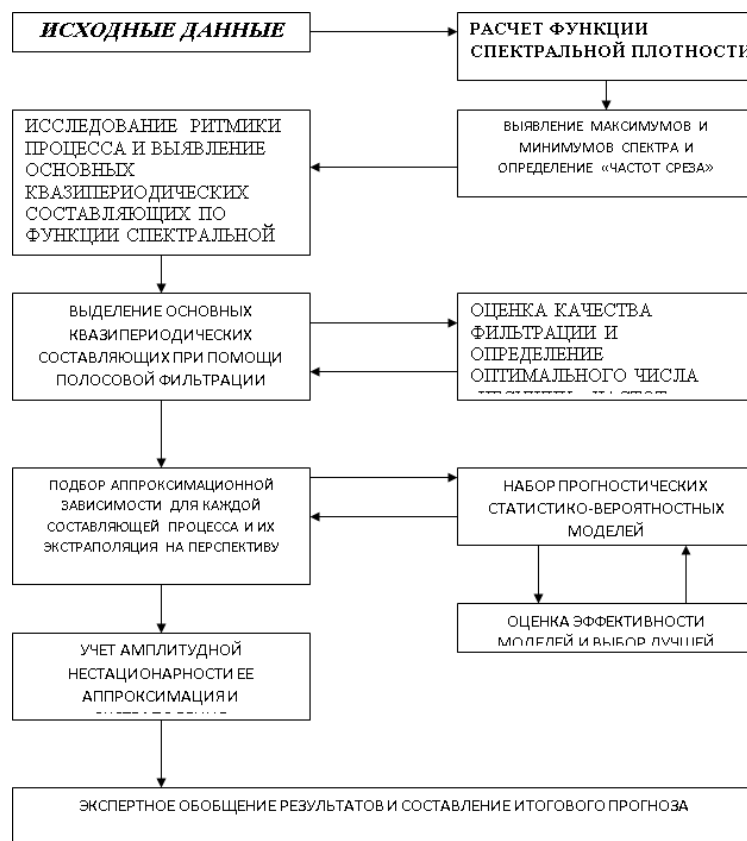


Рис. 2.3 Блок-схема статистико-вероятностного прогнозирования с использованием полосовой фильтрации.

От приведенного выше алгоритма приведенная схема отличается наличием раздела, где проводится полосовая фильтрация и статистико-вероятностные модели применяются для аппроксимации и экстраполяции

отдельных квазипериодических компонент, с последующим суммированием результатов.[12]

Экстраполяция и процедура фильтрации выполнялись при помощи системы статистико-вероятностного прогнозирования “АСАППЛЮС” и пакета программ «ПРИЗМА» разработанных в НВП “Система-А”.

### **Методическое прогнозирование**

АСАП+ - программа для первичной статистической обработки временных рядов.

Это простое и удобное приложение для возможности прогнозирования статистико-вероятностными методами.

Достоинства программы:

1. Простое и доступное приложение для прогнозирования.
2. Не требует большого объема исходных данных для начала работы.
3. Исходные данные могут быть любого характера.
4. Можно легко проанализировать внутреннюю структуру выборки.
5. Большое количество прогностических моделей.

### **Выводы**

Таким образом, для проведения обработки исходной информации от момента получения временных рядов до момента выдачи прогностических рекомендаций необходимо сделать следующие шаги[11].

1. Рассчитать первичные статистические моменты.
2. Определить прогностический потенциал путем расчета функции спектральной плотности.
3. Провести аппроксимацию и экстраполяцию временной изменчивости выбранной характеристики статистико-вероятностными моделями.
4. Провести аппроксимацию статистико-вероятностными моделями.
5. Оценить качество работы моделей и выбрать лучшую.
6. Определить возможность использования статистико-вероятностных моделей для прогноза рядов ледовых характеристик.

# Особенности внутренней структуры временных рядов в регионе явления Эль-Ниньо

Говоря о внутренней структуре рядов явления Эль-Ниньо, мы пришли к следующим выводам:

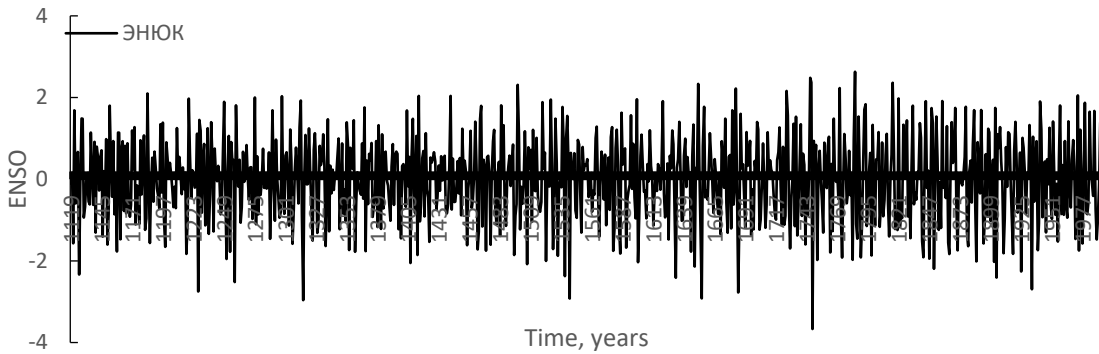


Рис.3.1 Межгодовое изменение ЭНЮК.[15]

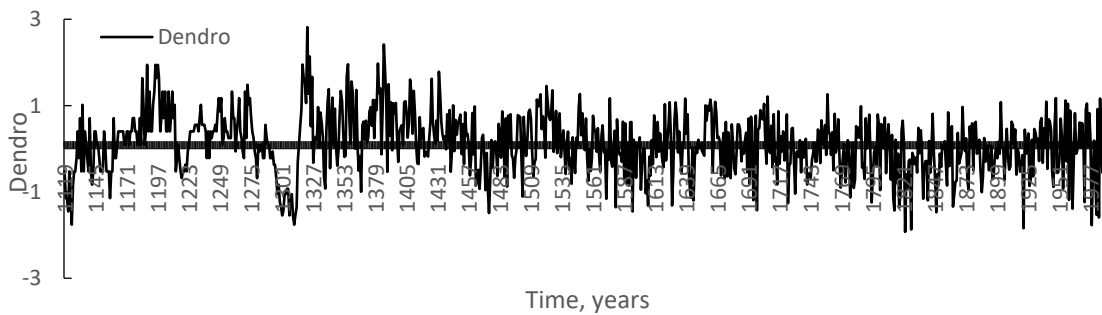


Рис.3.2 Межгодовое изменение дендрологического ряда.[15]

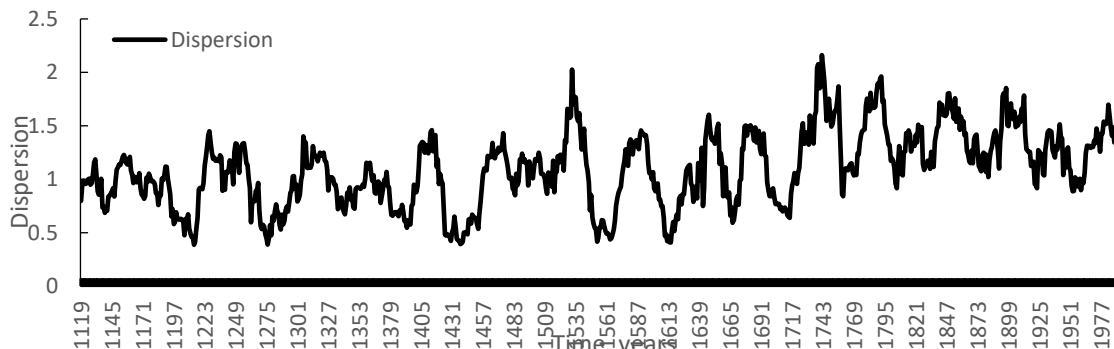


Рис.3.3 Межгодовое изменение отклонений ряда ЭНЮК.[15]

1. Если принять реакцию темпа роста деревьев как свойство, которое действительно отражает влияние ЭНЮК, то полученные результаты и их анализ говорят о том, что ЭНЮК не всегда сказывается на климатической системе планеты.
2. Не найдено никаких пространственно-временных связей явления Эль-Ниньо, которые можно было использовать для прогноза. Теоретически найдена связь между рядом ЭНЮК и рядом дисперсий, но найденный

коэффициент связи настолько мал, что мы говорим об отсутствии связи вообще.

3. Ввиду отсутствия связи между двумя характеристиками необходимо перейти к более качественному описанию внутренней структуры, для того чтобы определить влияние внешних факторов на изменение характеристик.
4. Для описания и возможности изменения характеристик будем использовать статистико-вероятностные модели автопрогноза.[6,15]

Теперь разберемся во внутренней структуре интенсивности явления Эль-Ниньо.

Ниже представлены графики ряда интенсивности явления Эль-Ниньо без разделения на компоненты.

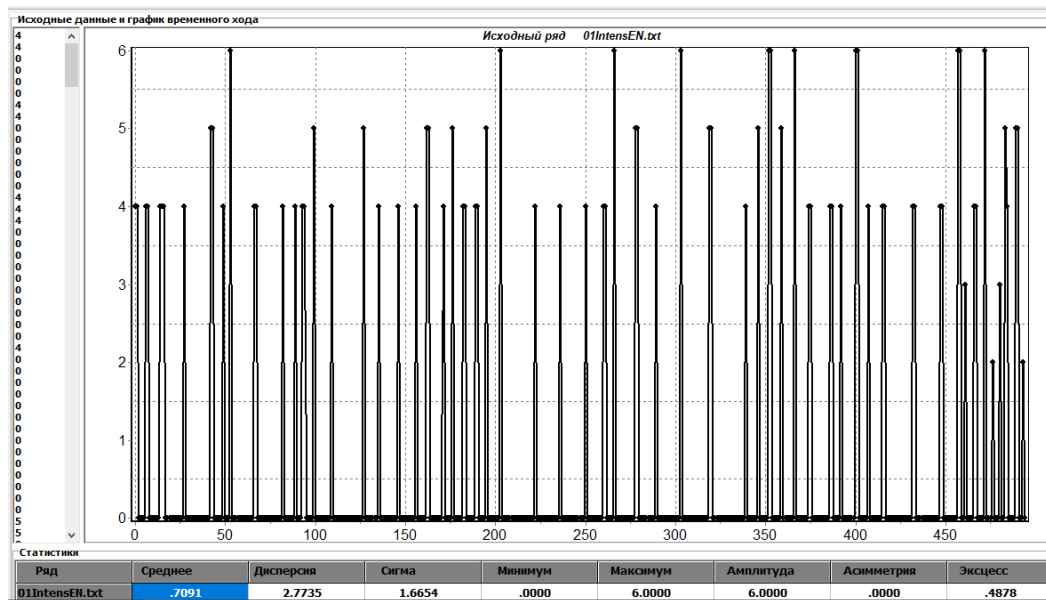


Рис. 3.1 Исходные данные и график временного изменения интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019 гг.

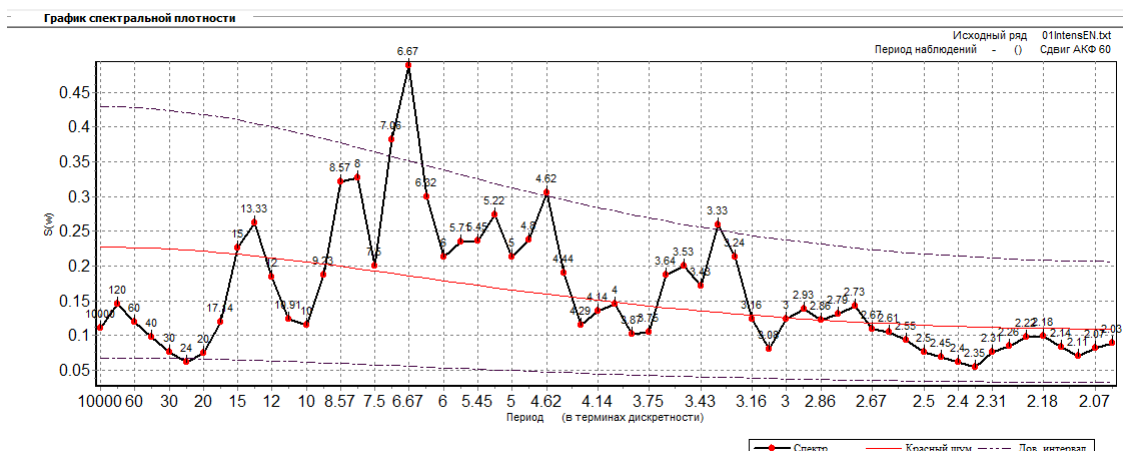


Рис. 3.2 График спектральной плотности интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019 гг.

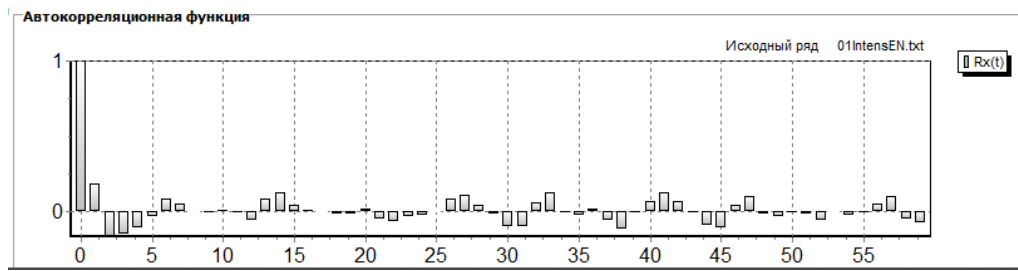


Рис. 3.3 АКФ интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019гг.

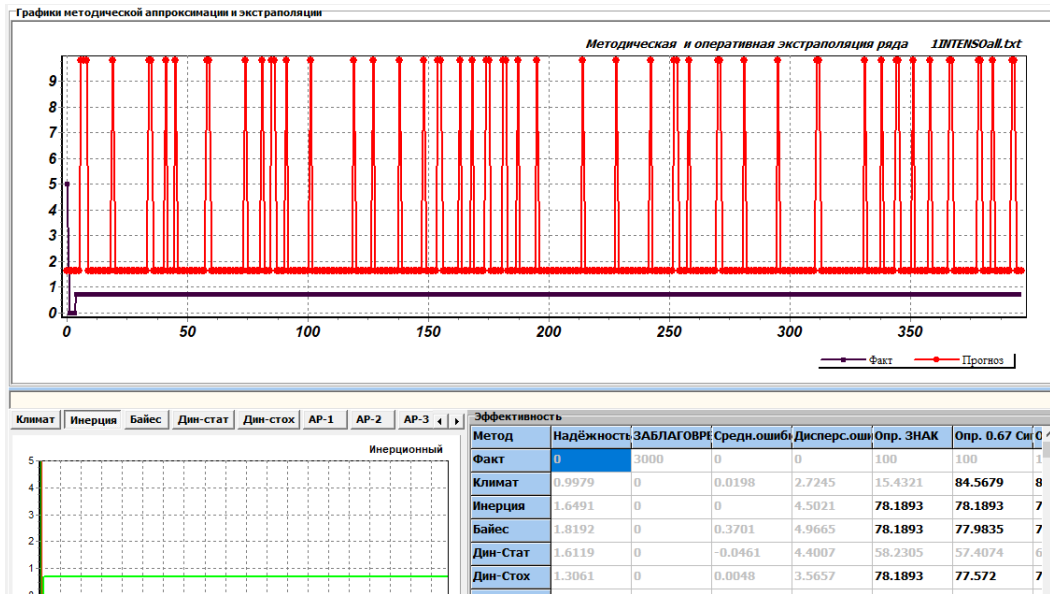


Рис. 3.4 Автопрогноз ряда интенсивности за период с 1525 по 2019гг.

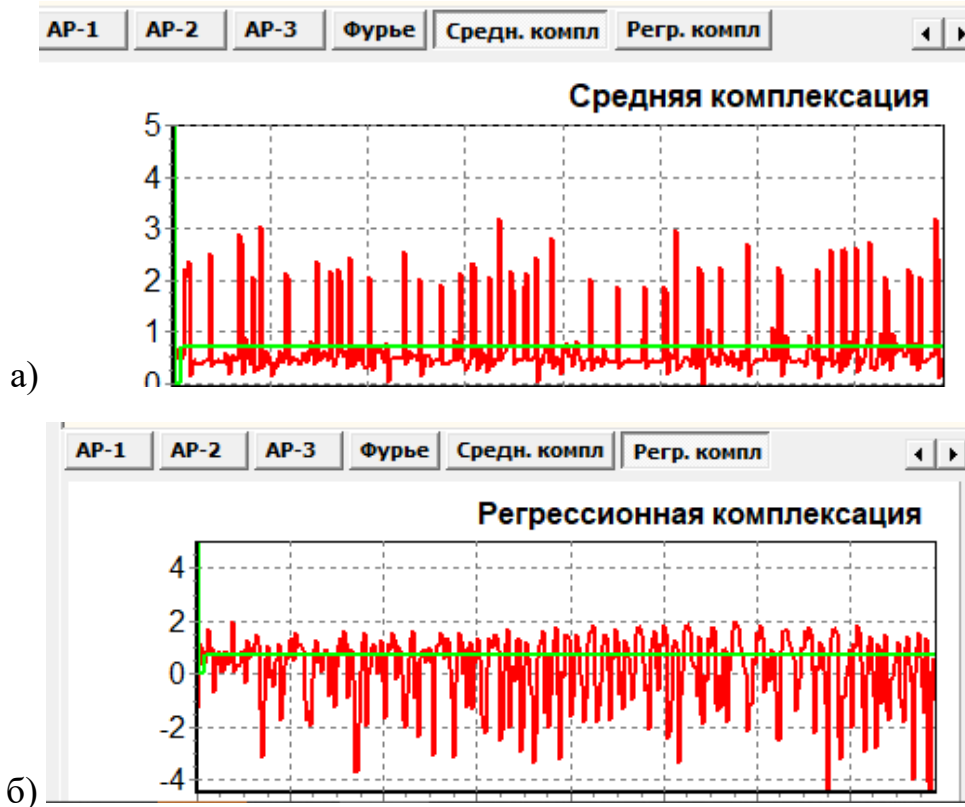


Рис. 3.5 Средняя а) и регрессионная б) комплексация ряда интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019 гг.

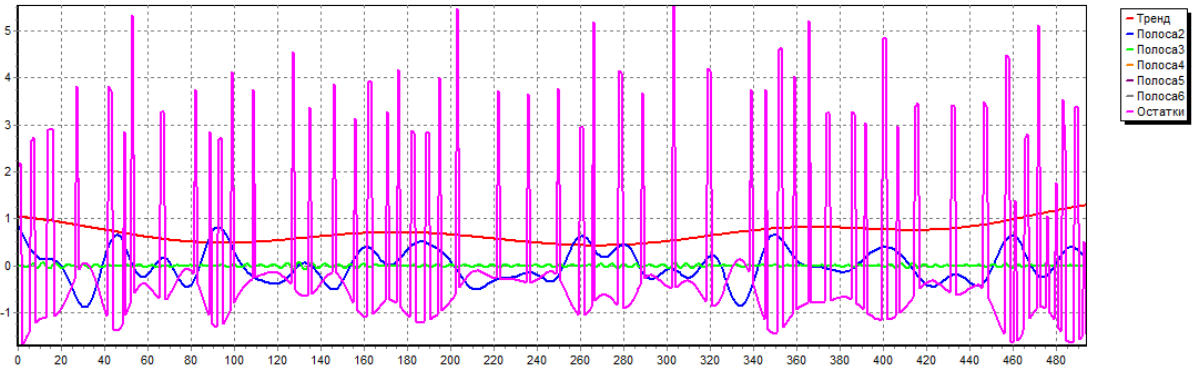


Рис. 3.6 Суммарная графика компонент ряда интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019 гг.

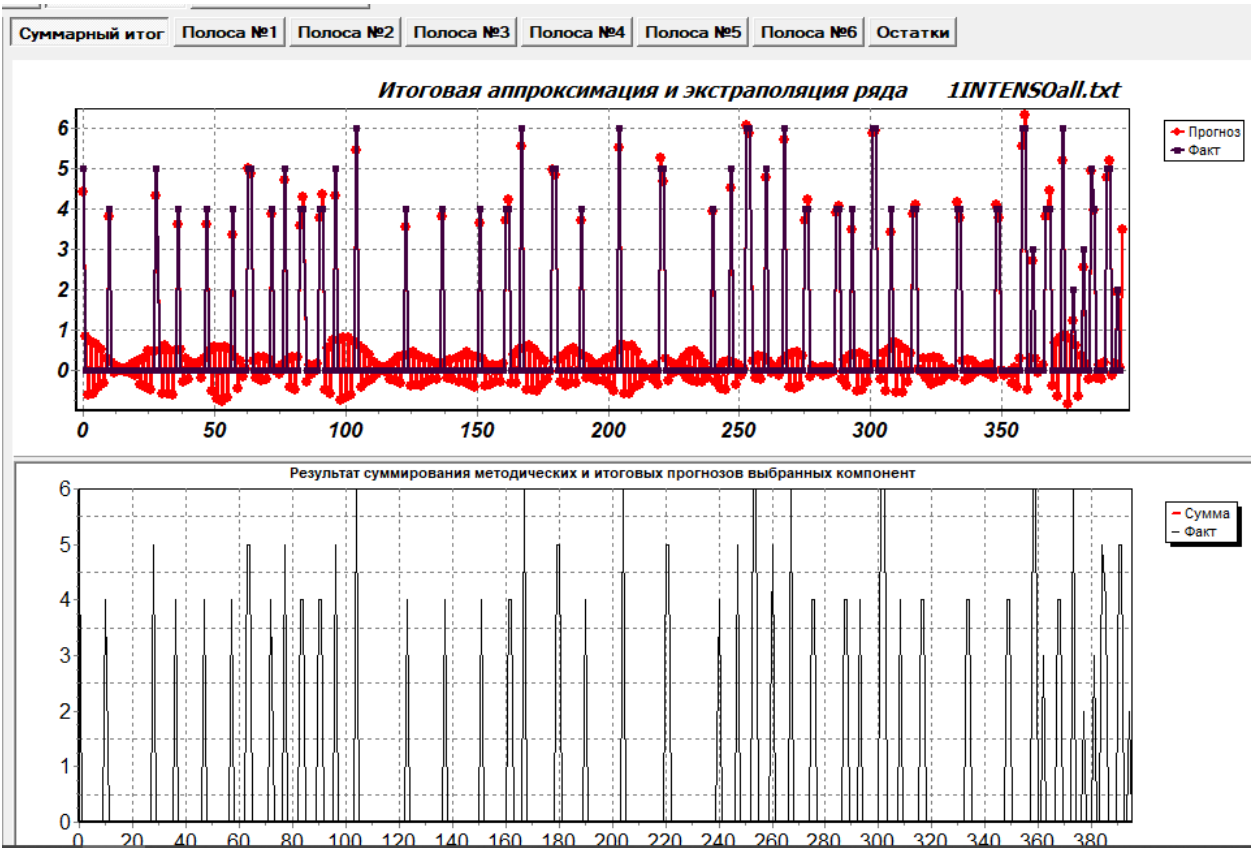
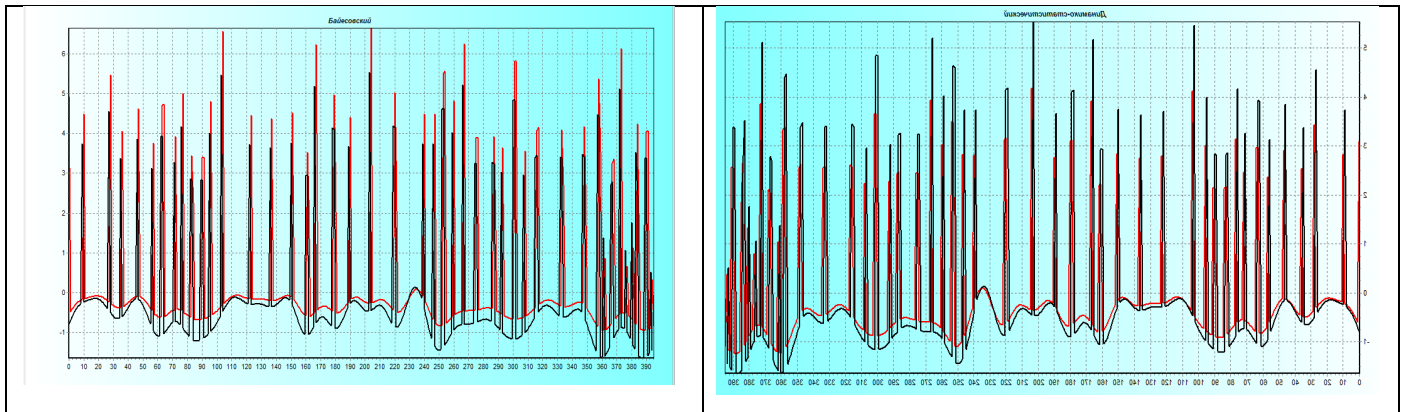


Рис. 3.7 Итоговая экстраполяция ряда интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019 гг.



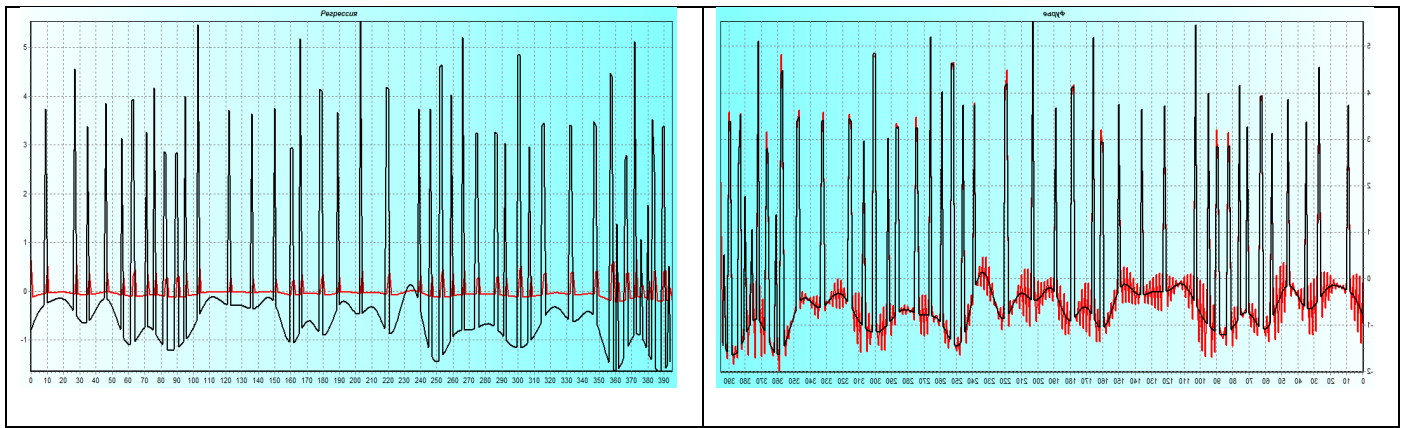


Рис. 3.8 Остатки ряда интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019гг.

По получившимся графикам видно, что внутренняя структура явления Эль-Ниньо очень непохожа на внутреннюю структуру изменения климата. Ввиду отсутствия тенденций можно сделать вывод, что достаточно яркое и сильное явление не отвечает за изменение климата.

На рисунке 3.6 изображены минимум 8 событий, которые во времени не постоянны по амплитуде, что говорит о зависимости нашей характеристики от внешних факторов. То есть, если бы климатическая система планеты формировалась только бы под действием внутренних факторов влияния, то такие результаты бы не получились.

Можно увидеть, что ряд интенсивности явления Эль-Ниньо характеризуется практическим отсутствием тенденции на всем участке, на первом участке тенденция не выражена вообще, а на втором участке отмечается тенденция интенсивности к небольшому повышению, но она так мала, что говорим об ее полном отсутствии.[15]

### Вейвлет анализ

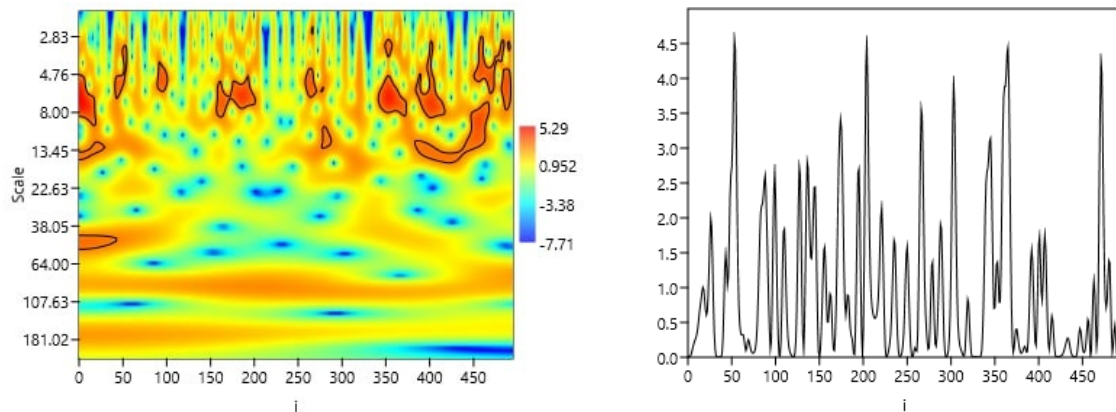


Рис. 3.9 Вейвлет-преобразование ряда интенсивности ЭН за период с 1525 по 2019гг.

На протяжении всего периода наблюдений в структуре ряда присутствуют закономерности с периодами 100 и 175 лет, их можно подвергнуть тщательному изучению. Отмечается эпизодическое проявление «солнечной» компоненты. Принятая закономерность в 5-6 лет такой не является. Она проявляется довольно ярко и стабильно, но не является постоянной, а эпизодической, то есть не все время определяется структура изменчивости ряда, а лишь некоторыми периодами.

Отсюда можно сказать, что прогнозировать явление Эль-Ниньо, опираясь только на закономерность 5-6 лет – нельзя.

## Методическое прогнозирование

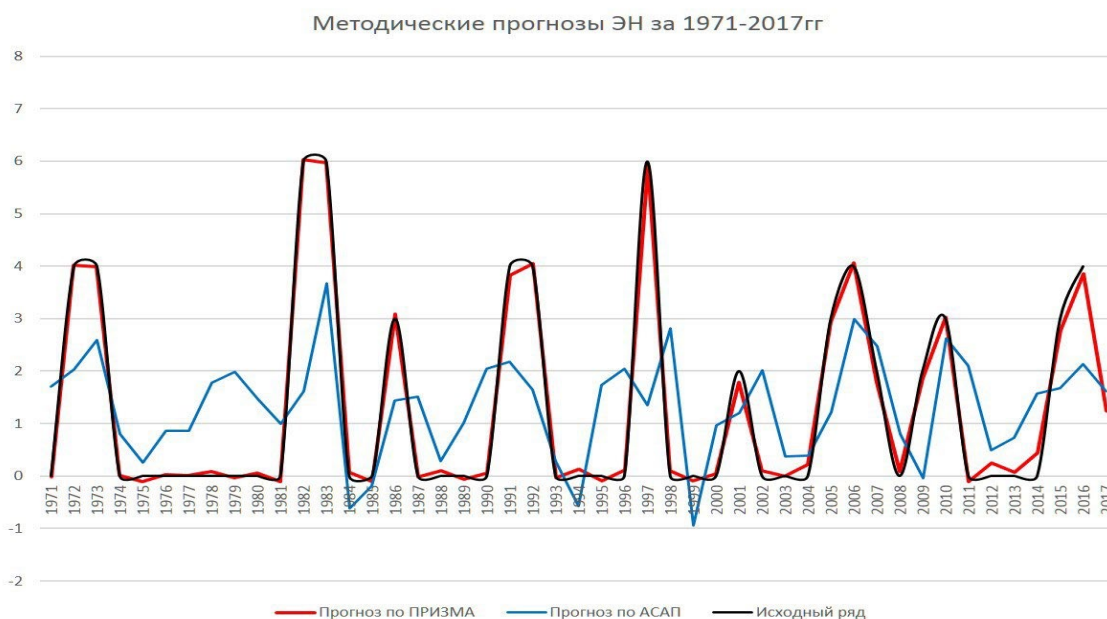


Рис. 3.10 Методический прогноз по АСАП и Призма

Таблица 3.1 Эффективность методического прогноза по АСАП (а) и эффективность методического прогноза по Призма (б).

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.ошибк	Дисперс.ошиб	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67 Сиг	Опр. 0.80 Сиг
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9783	0.7838	-0.3657	4.0458	52.1739	56.5217	56.5217
Инерция	1.47	0	-0.087	6.0794	54.3478	63.0435	63.0435
Байес	1.5418	0	0.3777	6.3766	54.3478	50	65.2174
Дин-Стат	1.2498	0	-0.2939	5.1688	60.8696	50	58.6957
Дин-Стох	1.1751	0	-0.155	4.8599	54.3478	60.8696	65.2174
АР-1	<b>0.9451</b>	0	-0.2934	3.9088	54.3478	50	56.5217
АР-2	<b>0.8115</b>	<b>1.7991</b>	-0.3443	3.3561	<b>78.2609</b>	56.5217	63.0435
АР-3	<b>0.8104</b>	<b>1.8051</b>	-0.3497	3.3517	<b>76.087</b>	56.5217	63.0435
Фурье	1.0896	0	-0.2593	4.5065	47.8261	43.4783	52.1739
Сред.компл.	<b>0.9448</b>	0	-0.1967	3.9075	54.3478	50	60.8696
Регр.компл.	<b>0.7328</b>	<b>2.2747</b>	-0.0142	3.0308	<b>73.913</b>	52.1739	65.2174

а)



Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.ошиб	Дисперс.оши	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67 Сиг	Опр. 0.80 Сиг
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9722	0	75.3236	121459	33.3333	52.7778	55.5556
Инерция	2.0423	0	-1.1164	255143.3	55.5556	19.4444	19.4444
Байес	1.9223	0	106.3459	240148.3	55.5556	25	30.5556
Дин-Стат	<b>0.648</b>	<b>2.8762</b>	60.6812	80950.86	<b>72.2222</b>	66.6667	<b>72.2222</b>
Дин-Стох	1.6011	0	17.535	200026.8	55.5556	25	25
АР-1	0.991	0	69.2007	123809.5	55.5556	47.2222	52.7778
АР-2	<b>0.2898</b>	<b>8.7919</b>	29.8818	36205.75	<b>83.3333</b>	<b>77.7778</b>	<b>86.1111</b>
АР-3	<b>0.2764</b>	<b>9.3028</b>	30.9534	34527.6	<b>86.1111</b>	<b>77.7778</b>	<b>86.1111</b>
Фурье	<b>0.7876</b>	0	-404.3268	98395.33	66.6667	41.6667	44.4444
Сред.компл.	<b>0.7273</b>	0	-1.7246	90855.3	69.4444	47.2222	66.6667
Регр.компл.	<b>0.2163</b>	<b>12.3581</b>	-3.7707	27024.87	<b>83.3333</b>	<b>83.3333</b>	<b>91.6667</b>

б)

Из получившихся результатов мы видим, что есть принципиальная возможность прогнозирования интенсивности явления Эль-Ниньо статистическими методами. При этом эффективность прогнозов при разделении внутренней структуры на компоненты и их отдельного прогноза (Призма) намного выше, чем прогноз без деления на компоненты (АСАП).

Заблаговременность прогноза Эль-Ниньо может составлять от 3 до 12 лет (см. таблицу 3.1б).

## Заключение

Эль-Ниньо - это аномалия, возникающая в результате взаимодействия океана и атмосферы. Хотя это периодическое явление, которое происходит каждые несколько лет, каждый раз население планеты ожидают катастрофические последствия.

Последствия Эль-Ниньо ощущаются во всем мире, где нарушение нормальных погодных условий может привести к ужасным социально-экономическим последствиям.

По мере того как теплая вода смещается на восток, большое количество тепла и влаги поднимается в атмосферу, меняя при этом атмосферные условия, что, в свою очередь, может повлиять на погодную систему по всему земному шару.

Существуют параметры, по которым можно заранее определить явление: повышение температуры воды, заглубление термоклина, изменение интенсивности и формы атмосферных циркуляций в соседних областях, начавшиеся катастрофы. Обычная длительность явления – 5-6 месяцев.

Проделанные расчеты и их анализ показали, что мы не всегда можем определить явление, как феномен, который оказывает непосредственное влияние на климатическую систему. Отсутствуют пространственно-временные связи феномена, что отменяет возможность прогноза, отсюда можно сделать выводы:

1. Во время явления Эль-Ниньо осадки на востоке приводят к дефициту осадков в западной части Тихого океана, где могут наблюдаться сильные засухи, в то время как на островах центральной части Тихого океана наблюдается избыток осадков.
2. В большинстве регионов количество тропических циклонов также зависит от Эль-Ниньо.
3. Пространственно-временные связи не показывают влияние ЭНЮК на климат в целом, что видно по отсутствию связи между рядом ЭНЮК и дендрологическим рядом.
4. Прогноз явления должен основываться на описании внутренней структуры ЭНЮК, так как пространственные и временные масштабы нельзя использовать в качестве параметров для прогноза, ввиду временного сдвига.[15]
5. Анализ внутренней структуры интенсивности ЭН показал, что прогнозировать ЭН, основываясь на закономерности периодов в 5-6 лет – нельзя. Однако, есть возможность прогнозирования явления

- статистическими методами, при этом качество прогноза при разделении внутренней структуры на компоненты будет гораздо выше, чем без нее.
6. По получившимся результатам можно сделать вывод, что следующий эпизод явления Эль-Ниньо, интенсивностью 3-4 балла (из 6 возможных) следует ожидать в 2024-2025 гг.

## Список литературы

1. Hasselman K. Stochastic climate models. P.1, Theory-Tellus, v.28,N6. 1976.
2. William H. Quinn and Victor T. Neal. "El-Nino occurrences over the past four and half centuries". Journal of Geophysical Research, v.92, No C13, p. 14449-14461, December 15 1987.
3. Gill A.E. and others. Interannual variability of the tropical oceans and the global atmosphere (TOGA) - WCP-49, 1983.
4. Nouvelot J.F. Pourrut. El-Nino, phenomene oceanique et atmospherique. Importanse en 1982-1983 et impact sur le littoral equatorien. - CaH. ORSTOM. Ser. Hidrol., v.21, №1, 1985.
5. Густоев Д.В., Карпов Ю.А. О возможном влиянии солнечного ветра на интенсивность явления Эль-Ниньо. // Тезисы X международной конференции по промысловой океанологии. - М.: Издательство ВНИРО. - 1997. С. 39.
6. Густоев Д.В. Предсказуемость явления Эль-Ниньо. Сборник трудов ЛГМИ.-СПб.;, 1991. Стр. 50-60.
7. Walker G.T., Bliss E.W. World weather.-V.Men.R.Meteorol.Soc. v.4, 1932.
8. Lockwood J.G. The southern oscillation and El-Nino.-Prog.Phis.Geogr., v.8, 1984.
9. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific.-Mon. Weather Rev., v.97, 1969.
10. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии. - М.: Мир, 1990. - 356с.
11. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). - М.: Наука, 1985. -
12. Громов А.Ю. Применение цифровых фильтров Баттерворта в океанологии. Режимобразующие факторы, информационная база и методы ее анализа.- Л., Гидрометеиздат, 1989. - с.
13. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации (одномерный анализ).- Л.: ЛГМИ, 1991. - 136 с.
14. <https://psl.noaa.gov/> - интернет-ресурс.
15. «Пространственно-временные связи явления Эль-Ниньо» дипломная работа Чешковой К.Г.