

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему «Изменчивость уровня океана в экваториальной зоне Тихого океана»

Исполнитель

Смирнов Максим Алексеевич (фамилия, имя, отчество)

Руководитель <u>доктор географических наук, профессор</u> (ученая степень, ученое звание)

> <u>Малинин Валерий Николаевич</u> (фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю» Заведующий кафедрой

(подпись)

<u>кандидат географических наук</u> (ученая степень, ученое звание)

<u>Хаймина Ольга Владимировна</u> (фамилия, имя, отчество)

«/Д» сисни 2023 г.

Санкт-Петербург 2023 ый тет

5;

БУ;

HF;

ощего

2079

Содержание:

1. Введение
2. Обзор исследований морского уровня в зоне Эль-Ниньо-Южное
колебание (ЭНЮК) и его влияния на сопредельные акватории Тихого
океана7
2.1. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на
область Перуанского апвеллинга11
2.2. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на
область Калифорнийского течения и апвеллинга12
2.3. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на
область залива Аляска14
2.4. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на
область Индонезийского моря16
2.5. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на
область экватора – тропиков Тихого океана (20°ю.ш. – 20°с.ш.) 17
3. Материалы и методы
4. Влияние Эль-Ниньо на уровень Тихого океана
4.1. Влияние Эль-Ниньо на экваториально-тропическую область Тихого
океана (20 с.ш. – 20 ю.ш.)
4.2. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Перуанского апвеллинга 35
4.3. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Калифорнийского течения и
апвеллинга41
4.4. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область залива Аляска 57
4.5. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Индонезийского моря 65
5. Заключение
Использованная литература76

1. Введение

Данная работа посвящена изучению явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья в Тихом океане. Вышеупомянутые явления происходят на экваторе Тихого океана и известны в гидрометеорологическом сообществе уже очень давно. Эль-Ниньо и Ла-Нинья описываются на основании различных гидрометеорологических характеристиках, ряды которых насчитывают в себе десятилетия наблюдений.

Экваториальная область Тихого океана является очень перспективным уровенной районом исследования поверхности, как И других гидрометеорологических характеристик. Данная область известна своими явлениями – Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые влияют на долгопериодные колебания погоды и короткопериодные колебания климата. Известно, что посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять на удаленные регионы о Тихого океана, данные связи представлены в работе [1]. Известны работы, указывающие на данные связи при помощи различных гидрометеорологических переменных в различных частях Тихого океана [2 – 4], однако уровенная составляющая оказывается наименее изучена за счет достаточно малой выборки данных. Работы, рассматривающие станционные данные не могут оценить влияние Эль-Ниньо на уровень Тихого океана за счет своей привязанности к суше. С 1992 года стали появляться продукты спутниковой альтиметрии, которые позволили оценивать пространственное распределение данной характеристики, как отмечалось в работе [5].

Правда, Эль-Ниньо не столько локальный процесс, как предполагалось ранее. Данный процесс в значительной мере затрагивает большие просторы Тихого океана, как на западе, так и на востоке.

На рисунке 1.1 представлено отклонение от средней температуры поверхности океана за период с 1981 по 2010 год при Эль-Ниньо 2015 года. На

данном изображении четко видно на сколько данное явление сильно может сказываться на экваториально части Тихого океана, и на большей части акватории, как на востоке, так и на западе.



Рисунок 1.1. Отклонение от средней температуры поверхности океана за период с 1981 по 2010 года при Эль-Ниньо 2015 года, [6].

Уровенные данные имеют не меньшую изменчивость, по сравнению с температурой поверхности океана, что демонстрируется на изображении 1.2, построенное по данным спутниковой альтиметрии. Данное изображение показывает, что в некоторых районах Тихого океана наблюдается несколько иная ситуация, по сравнению с температурой поверхности океана. Данная особенность стала одной из главных целей исследования – выявить очаги наибольшей изменчивости и оценить и влияние на сопредельные регионы.



Рисунок 1.2. Аномалии уровенной поверхности при Эль-Ниньо 1997 и 2015 годов по данным спутниковой альтиметрии, [7].

Актуальность исследования. С помощью уровенной составляющей явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья ранее не описывались. Ранее уже проводились исследования, показывающие влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на уровенную поверхность, однако они ограничивались изучением только станционных данных, за неимением других доступных пространственных данных. Это связано с тем, что до начала запуска программы спутниковой альтиметрии в 1992 году, с помощью искусственного спутника Земли Topex/Poseidon, не было длинных непрерывных рядов данных. Начиная с конца 1992 года собираются непрерывные ряды при помощи уже других, улучшенных методов В спутниковой альтиметрии. сравнении с рядами других гидрометеорологических характеристик уровенные данные до сих пор имеют слишком короткие ряды. Так, ряды насчитывают в себе всего 30 лет наблюдений с 1993 по 2022 (или 360 месяцев). С помощью различных методов обработки сейчас стали доступны данные, восстановленные по спутниковой альтиметрии в узлах сетки.

Также в работе представлен анализ стерических колебаний уровенной поверхности, ряды которых еще меньше рядов уровенной поверхности. По данным буев ARGO были восстановлены аномалии уровенной поверхности в пространственном разрешении. Ряд начинается с 2005 года по 2022, промежуток составляет всего 17 лет (204 месяца).

Цель работы – изучение особенностей изменчивости уровенной поверхности экваториальной части Тихого океана и сопредельных районов, на которые влияет явление Эль-Ниньо. В работе рассматривается область Перуанского и Калифорнийского апвеллингов, залив Аляска и Индонезийское море. В изученной литературе во всех выделенных районах отмечается влияние Эль-Ниньо, за исключением уровенной составляющей, либо, не связывая эти процессы.

Задачи: 1. Рассмотреть изменчивость аномалий и стерических колебаний уровенной поверхности. 2. Провести анализ пространственного

распределения аномалий уровенной поверхности и произвести их количественную оценку. 3. Разработать собственный уровенный индекс для явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, который будет отражать изменчивость уровня в восточной и западной части Тихого океана в районе экватора. 4. Оценить связь изменчивости исследуемой характеристики в сопредельных районах Тихого океана (область Перуанского и Калифорнийского апвеллингов, залив Аляска и Индонезийское море).

Объектом исследования являются альтиметрические данные уровня океана в районе протекания феноменов Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Предметами исследования являются акватории районов Тихого океана, сопредельные с зоной протекания явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья (область Перуанского и Калифорнийского апвеллингов, залив Аляска и Индонезийское море).

Рассмотрена изменчивость Научная 1. аномалий новизна. И стерических колебаний уровенной поверхности. 2. Построены пространственные карты и оценены различия уровенной поверхности при Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показаны очаги максимальных аномалий на западе и востоке Тихого океана. 3. Разработан первый интегральный уровенный индекс SL_{ENSO}. 4. Проведена оценка связи исследуемой характеристики в выделенных районах Тихого океана.

Теоретическая значимость работы заключается в добавлении новой переменной в изучение уникальных процессов в экваториальной зоне Тихого океана (Эль-Ниньо и Ла-Нинья) и их влияние на сопредельные территории. Практическая значимость работы: составлен первый интегральный уровенный индекс SL_{ENSO}, который показал высокую корреляцию с традиционными индексами, исследуемых процессов.

Апробация работы. Результаты данной работы были представлены на нескольких конференциях: «Студенческая научная конференция РГГМУ,

отделение океанологии» в 2021 (отмечена как перспективная, 1 степень), 2022 и 2023 (3 место) годах, «Всероссийская научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», 2023 год. Также данная работа была отмечена на конкурсе научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии Института им. П.П. Ширшова в 2022 году.

Публикации. Работа опубликована в журнале «Гидрометеорология и Экология, №68» за 2022 год под названием «Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание». Публикации ожидают две статьи в сборниках по итогам научных конференций в 2023 году.

Структура и объем работы. Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) объемом 81 страница состоит из Введения, 3-х глав, Заключения, Списка литературы, содержит 7 таблиц и 37 рисунков (пространственные карты, диаграммы и графики).

2. Обзор исследований морского уровня в зоне Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК) и его влияния на сопредельные акватории Тихого океана

Экваториально-тропическая зона тихого океана является уникальным гидрометеорологическим объектом с процессами, которые проходят данной области, явления Эль-Ниньо исключительно В И Ла-Нинья представляют собой очень интересные и важные процессы, как для данной области и сопредельных регионов, так и для глобального климата, как показали ряд исследований, так посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять на удаленные регионы о Тихого океана, данные связи представлены в работе [1].

Несмотря на долгое изучение процессов в данной области явление Эль-Ниньо до сих пор не поддается прогнозированию, что является наиболее важной задачей для гидрометеорологического сообщества, как это отмечено в работах [8 – 12]. В ходе изучения данных явлений был рассмотрен целый ряд гидрометеорологических характеристик, таких как температура поверхности океана и подстилающей поверхности, атмосферное давление, количество осадков, общая облачность, количество приходящей и уходящей радиации, скорости ветра и течений на различных горизонтах и так далее, список характеристик велик. Однако практически работ, нет В которых рассматривались аномалии уровенной поверхности океана. История наблюдений за уровенной поверхностью поистине велика, однако только совсем недавно стали доступны данные об уровенной поверхности вдали от берега, где ранее получались все данные и стали доступны альтиметрические данные с искусственных спутников Земли, а именно с 1993 года имеются непрерывные ряды. Ранее упоминалась только возможность использования данной характеристики для рассмотрения явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В работах [13 – 15] указывается наличие больших перепадов уровня Тихого океана ≃360 мм в сторону области Ниньо 3.4, то есть уровень на востоке Тихого океана на экваторе выше на 360 мм, чем на западе. Данный перепад является весьма значительным результатом влияния явления Эль-Ниньо, поскольку обычно уровень на западе Тихого океана выше, чем на востоке за счет действия пассатных ветров. Пассаты образуют нагонное явление, чем повышают уровень именно в западной части Тихого океана, однако при протекании явления Эль-Ниньо пассаты затухают из-за уменьшения градиента приземного давления между устойчивыми областями повышенного и пониженного давления близ о.Таити и портом Дарвин (Австралия). Характерные изменения описывает Индекс Южного колебания (Southern Oscillation Index), который был описан уже почти 100 лет назад Томасом Гилбертом Уолкером в 1928 году в своей работе [15]. Схематическое представление происходящих процессов в данной области представлены на рисунке 2.1.





В работе [17] была выдвинута теория об использовании значений аномалий уровенной поверхности океана в экваториальной – тропической части Тихого океана за период с января 1993 по декабрь 2019 года. Были получены два разреза в местах с наибольшими положительными и отрицательными аномалиями уровенной поверхности в двух районах Тихого океана, западная и восточная, которые отражают области Южного Колебания и Эль-Ниньо. Также был рассчитан обобщенный уровенный индекс на основе двух полученных разрезов и была проведена проверка полученных рядов с традиционными индексами явлений Эль-Ниньо – Южное колебание. Данные индексы показали высокую связь с классическими индексами, а также была построена карта распределения коэффициента корреляции обобщенного уровенного индекса SL_{ENSO} с аномалиями уровенной поверхности в узлах сетки, которая представлена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2. Пространственное распределение коэффициентов корреляции аномалий уровенной поверхности с уровенным индексом SL_{ENSO}, [17].

Полученные данные о связи уровенного индекса SL_{ENSO} с аномалиями уровенной поверхности в узлах сетки послужили продолжением работы с данными явлениями и были рассмотрены районы с высокой связью вдоль всего побережья Северной и Южной Америки, а также области в Западной части Тихого океана, а именно районы:

- 1. Перуанского апвеллинга;
- 2. Калифорнийского течения и апвеллинга;
- 3. Залив Аляска;
- 4. Район Индонезийского моря;
- 5. Экваториально тропический район Тихого океана (20°ю.ш. 20°с.ш.).

Далее будет упомянуто о влиянии Эль-Ниньо на каждый из районов отдельно.

2.1. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Перуанского апвеллинга

Влияние такого явления, как Эль-Ниньо на область Перуанского апвеллинга известна уже давно, поскольку Эль-Ниньо затрагивает как сопредельную территорию вышеупомянутого апвеллинга, так и сам прибрежный район Южной Америки.

В работах [18 – 21] обсуждаются принципы и физическое обоснование происходящих процессов в системе Перуанского апвеллинга. Стоит отметить, что в работе [18] помимо данных температуры поверхности океана, глубины термоклина И биохимических используются данные об уровенной поверхности с 1993 по 2008 год, а также показана связь с другими характеристиками. Данная область особенно важна, учитывая объемы выловов биоресурсов, значительной площади апвеллинга, поскольку он занимает около 0,02% площади всего Мирового океана, ежегодный вылов составляет 20% от всего мирового вылова [20]. Температура поверхностных вод в районе Перуанского апвеллинга примерно на 5°С ниже, чем в зоне Эль-Ниньо, при этом отмечается рост температуры поверхности океана при явлении Эль-Ниньо на 5°C, что приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц, т. п.

На рисунке 2.3 представлена обобщенная схема циркуляции вод в районе Перуанского апвеллинга. Стрелками обозначены направления движения течений в данной области.



Рисунок 2.3. Обобщенная схема циркуляции для юго-вочтоной части Тихого океана с участками сильного прибрежного апвеллинга, [18].

2.2.Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Калифорнийского течения и апвеллинга

Влияние Эль-Ниньо на область системы Калифорнийского течения не так хорошо изучены, как на область Перуанского апвеллинга, однако есть ряд

работ, которые напрямую или косвенно указывают на довольно высокую связь Эль-Ниньо и данной области.

Работы [22 – 26] отмечают высокую связь между происходящими процессами В экваториальной части Тихого океана И системе Калифорнийского течения. Основная рассматриваемая связь – повышение и понижение температуры поверхности океана в системе течения при явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также изменение переноса водных масс течениям при различных фазах явлений. Упоминается и сама область Калифорнийского апвеллинга вдоль побережья, которая также имеет отклик на изменения, которые происходят на экваторе, как ранее отмечалось, наблюдается высокая корреляция уровенного индекса SL_{ENSO} с уровнем в узлах сетки вдоль побережья Северной Америки. Работ, связанных с изменчивостью уровенных данных при явлениях Эль-Ниньо не было обнаружено. Однако в данных работах отмечается уменьшение интенсивности прибрежного апвеллинга и повышение температуры поверхности океана на всех широтах действия Калифорнийского течения, что также может быть связано с уменьшением интенсивности самого течения. Также в рассматриваемых работах отмечается связь с такими явлениями, как волны тепла и пятно тепла (The Blob), которое связано с явлениями Эль-Ниньо и покрывают значительную часть данной области в года максимальных, самых интенсивных явлений Эль-Ниньо.

Вышеупомянутые связи обсуждаются в работах [27 – 29]. В работе [29] показано, как Эль-Ниньо может влиять на залив Аляска через систему Калифорнийского течения вдоль побережья Северной Америки. На рисунке 2.4 представлена обобщенная схема циркуляции вод системы Калифорнийского течения. В работе [30] представлены некоторые индексы Калифорнийского апвеллинга и системы Калифорнийского течения в целом. На упомянутом портале присутствуют данные отражающие интенсивности Калифорнийского апвеллинга и покрытие области Калифорнийского течения в доль.





2.3. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область залива Аляска

Как упоминалось ранее, имеются работы, в которых показаны механизмы прямого или косвенного влияния Эль-Ниньо через систему Калифорнийского течения [29]. Помимо этого, имеется ряд работ, которые показывают влияние Эль-Ниньо на северную часть залива Аляска, данные особенности циркуляции вод и повышения температуры поверхности океана в данной области представлены в работах [31 – 34].

В работах [31] и [32] присутствует анализ колебаний уровенной поверхности с выявлением связи с Эль-Ниньо и аномалиями температуры поверхности океана в данной области, однако, стоит отметить, что данные, которые использовались в данных работах не альтиметрические, а станционные за периоды с 1981 по 1995 и с 1950 по 1985 года, соответственно. Данные ряды показали, что отражают процессы, происходящие в заливе Аляска при явлении Эль-Ниньо при сравнительном анализе с другими характеристиками, такими как температура поверхности океана. Стоит отметить работу [33], в которой происходит анализ стерических колебаний Тихого уровенной поверхности океана на северо-западе океана. Действительно, стерические колебания должны оказывать значительный вклад в колебания уровенной поверхности, поскольку, как показано в работе [34] стерические колебания уровенной поверхности обусловлены изменением плотности морской воды за счет изменения температуры и плотности океана. Современные данные позволяют оценить данную изменчивость при помощи миссии буев ARGO [35, 36], которые получают данные по температуре и солености в слоях 0-700 и 0-2000 метров. Как было показано выше, при Эль-Ниньо наблюдаются большие аномалии температуры океана, что также влияет на стерическую составляющую колебания уровенной поверхности.

На рисунке 2.5 представлена обобщенная схема циркуляции вод в заливе Аляска. На рисунке стрелками отмечены основные направления движения течений.



Рисунок 2.5. Обобщенная схема циркуляции вод в заливе Аляска и течения Аляска, [36].

2.4. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Индонезийского моря

Район Индонезийского моря – один из самых подверженных колебаниям гидрометеорологических характеристик район Тихого океана, поскольку именно тут зарождается явление Эль-Ниньо и максимально активизируется явление Ла-Нинья. Есть ряд работ [37 – 39], которые описывают данную изменчивость, и индексов, таких, как Pacific Warm Pool, который показывает область наиболее прогретых вод в районе Индонезийского моря и отражает распространение области прогретых свыше 28° С вод в восточную часть Тихого океана во время Эль-Ниньо. В работе [39] отмечается связь данного индекса с индексом выпадения осадков в данном регионе, поскольку это очень важная характеристика, поскольку при явлении Эль-Ниньо, как известно из работ [40 – 44] в данной области наблюдаются сильные засушливые периоды в года сильных Эль-Ниньо и наоборот интенсивное выпадение осадков на другой стороне Тихого океана – Южной Америке. В упомянутой работе отмечается высокая связь данных характеристик. Стоит отметить наличие

работ, связанных с аномалиями уровенных поверхностей, в частности работу [45]. В этой работе рассматриваются колебания уровня в связи с сезонными и климатическими особенностями, а также отмечается наличие влияния экстремальных климатических явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, однако не описывается основной механизм колебания уровенной поверхности в связи с данными экстремальными явлениями для данной и сопредельных областей.

На рисунке 2.6 представлена обобщенная схема циркуляции вод в районе Индонезийского моря и основные поверхностные течения в данном районе.



Рисунок 2.6. Обобщенная схема циркуляции вод в районе Индонезийского моря с отмеченными поверхностными течениями, [31].

2.5. Современное представление о влиянии Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область экватора – тропиков Тихого океана (20°ю.ш. – 20°с.ш.)

Как известно область протекания явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья – экваториально – тропическая часть Тихого океана (20°ю.ш. – 20°с.ш.), однако, как было показано выше, данные явления могут влиять не только на данную область, находят отголоски в очень удаленных районах Земли, таких как, например, Залив Аляска и области Перуанского и Калифорнийского течений.

В работах [46 – 48] показаны основные физические механизмы, протекающие в данных областях. Основной причиной формирования Эль-Ниньо – Южное Колебание считается действие пассатов в экваториальной циркуляционной ячейке Уокера, которые ослабевают при явлении Эль-Ниньо и наоборот усиливаются при Ла-Нинья, что полностью отражается при помощи Индекса Южного колебания.

На рисунке 2.7 представлены совокупные значения средних сезонных аномалий при явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья.



Рисунок 2.7. Совокупные значения средних сезонных аномалий ASO ST для (а) ЕР Эль-Ниньо (1982, 1986, 1991, 1997 и 2006), (b) СР Эль-Ниньо (1987, 1994, 2002, 2004 и 2009) и (c) Ла-Нинья (1983, 1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2005, и 2007) в 1982-2009 годах. [48].

3. Материалы и методы

Для выполнения работы в качестве исходных данных были приняты значения аномалий уровенной поверхности, полученные при помощи спутниковой альтиметрии из базы данных AVISO [49]. Данные представлены как в среднегодовом, так и в средимесячном осреднении в узлах сетки с дискретностью 0,25° по широте и долготе. Исходные альтиметрические данные покрывают океан от 66° с.ш. до 65° ю.ш., имеют дискретность примерно 9,9 сут и точность расчета — 4,2 см. Неопределенности оценок морского уровня обусловлены методическими аспектами преобразования необработанных спутниковых измерений в реальные оценки морского уровня, необходимостью учета атмосферных условий, ветровых волн и приливов, а также гляциоизостатического приспособления, в результате чего происходит некоторое увеличение площади океанских бассейнов из-за отступания суши в конце последнего ледникового периода. В работе использовались данные по уровню акватории Тихого океана от 100° в.д. до 70° з.д. и от 80° ю.ш. до 80° с.ш. с 1993 г. по 2019 г.



Рисунок 3.1. Данные портала AVISO с пространственными данными в узлах сетки и глобальная изменчивость аномалий уровенной поверхности с представленной линией тренда, [49].

Для анализа были получены данные о стерических колебаниях уровенной поверхности из архива NOAA [50]. Архив содержит данные о стерических колебаниях, рассчитанных на основе колебаний плотности (температуры и солености) морской воды, полученных миссией буев ARGO в слоях 0-700 и 0-2000 метров 3-х месячного периода с января 2005 по декабрь 2022 года с пространственным разрешением 1° по широте и долготе. Как в случае с аномалиями уровенной поверхности, так и стерическими колебаниями был выбран одинаковый диапазон по широтам и долготам.



Рисунок 3.2. Представленный временной ход колебаний стерической составляющей уровенной поверхности с 1960 по 2023 год, а также данные, полученные миссией ARGO с 2005 по 2023 год в слоях океана 0-700 и 0-2000 метров, [50].

Для проверки полученных результатов были получены традиционные индексы процессов Эль-Ниньо, которые находятся в открытом доступе на сайте NOAA [51].

Поскольку одной из главных переменных при явлении Эль-Ниньо является температура океана, были получены данные температуры поверхности океана в исследуемых регионах из базы данных NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) [52]. Пространственное разрешение модели 0,333° широты на 1,0° долготы. Данная модель содержит данные с

января 1980 года по настоящий момент, однако для приведения данных к одной дискретности были получены данные с января 1993 по декабрь 2022 года.



GODAS Potential Temperature Dec 2022

Рисунок 3.3. Пространственное распределение потенциальной температуры поверхности океана в декабре 2022 года архива реанализа NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) [52].

В работе использовались данные архива <u>Laboratory for Satellite Altimetry</u> <u>NOAA/NESDIS/STAR</u> [53], в котором содержатся данные об аномалиях уровенной поверхности усредненных по площадям морей и участков океана. Архив содержит данные следующих искусственных спутников Земли:

- 1. Topex/Poseidon (1992 2006 год);
- 2. ERS-2 (1995 2003 год);
- 3. GFO (2000 2007 год);
- 4. Jason-1 (2002 2014 год);
- 5. Envisat (2002 2011 год);
- 6. Jason-2 (2008 2018 год);
- 7. Jason-3 (2016 2023 год).

На рисунке 3.4 представлен пример исходных данных для уровенной поверхности Тихого океана за период с 1992 по 2023 год.



Рисунок 3.4. Альтиметрические данные уровенной поверхности Тихого океана по данным Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR [53] с 1992 по 2023 год.

На рисунке 3.5 представлены акватории морей Тихого океана, по доступным данным в указанном архиве. Для работы были получены следующие ряды данных:

- 1. Берингово море;
- 2. Охотское море;
- 3. Японское море;
- 4. Желтое море;
- 5. Южно-Китайское море;
- 6. Индонезийское море;
- 7. Индонезийское море.



Рисунок 3.5. Графическое представление данных аномалий уровенной поверхности и для морей Тихого океана портала Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR [53].

Портал Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR предоставляет данные о трендовой составляющей уровенной поверхности океана в узлах сетки, рисунок 3.6.



Рисунок 3.6. Пространственное распределение трендовой составляющей уровенной поверхности океана Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR [53].

В качестве методов обработки исходной информации основой для расчетов служит аддитивная модель межгодовых изменений временного ряда в следующем виде:

$$X(t) = Tr(t) + C(t) + P(t)$$
(1)

где Tr(t) — трендовая составляющая; C(t) — циклическая компонента, характеризующая регулярные (циклические) межгодовые колебания; P(t) — остаточная часть, характеризующая нерегулярные (случайные) межгодовые колебания. Сумма трендовой и циклической компонент означает детерминированную часть разложения, которая поддается интерпретации и строго описывается статистическими методами. Методы расчета и оценивания указанных компонент приводятся в работе [54].

Для обработки полученной информации был использован парный коэффициент корреляции Пирсона (2), а для поиска связи между малыми выборками был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмана (3), который был использован для анализа связи годовых значений стерических колебаний, поскольку длина ряда составила 18 лет.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(2)

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2 - 1)} \tag{3}$$

В работе использовался кластерный анализ для определения наиболее репрезентативных точек в районах Перуанского и Калифорнийского апвеллингов. Использовался итеративный алгоритм К – средних (К – means). Это наиболее распространенный метод кластеризации, который был выбран для более удобной работы с большими массивами данных, данный метод стремится минимизировать среднеквадратическое отклонение на точках каждого кластера путем итераций. Данный метод предполагает, что известно число кластеров, которое задается заранее. С каждой новой итерацией происходит минимизация изменчивости внутри кластера и максимизируется изменчивость между кластерами. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения кластеров, [55].

4. Влияние Эль-Ниньо на уровень Тихого океана

В данной работе рассматривается влияние таких явлений, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья на уровень в экваториально-тропической зоне Тихого океана, а также на сопредельные районы. В качестве объектов анализа были выбраны районы наиболее подверженные влиянию данных процессов в Тихом океане. Таким образом, в данной работе рассматриваются районы:

- 1. Экваториально-тропическая зона тихого океана (20 с.ш. 20 ю.ш.)
- 2. Перуанского апвеллинга;
- 3. Система Калифорнийского течения и Калифорнийский апвеллинг;
- 4. Залив Аляска;
- 5. Область Индонезийского моря.

В областях Перуанского и Калифорнийского апвеллинга влияние процессов при протекании Эль-Ниньо достаточно хорошо изучены, однако стоит отметить, что изменчивость уровенной поверхности и стерической составляющей уровня в данных областях мало изучена.

4.1. Влияние Эль-Ниньо на экваториально-тропическую область Тихого океана (20 с.ш. – 20 ю.ш.)

Для сравнения происходящих процессов при абсолютно противоположных явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья было принято решение взять три года с максимальной интенсивностью протекания явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Для выполнения поставленной задачи были получены значения традиционных индексов данных явлений, которые опираются на различные гидрометеорологические параметры, включая в себя одну, две или целый ряд переменных. К таким индексам относят обычно следующие:

- 1. Southern Oscillation Index (SOI);
- 2. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2);
- 3. Nino 3+4;
- 4. Oceanic Nino Index (ONI).

Данные индексы считаются классическими, поскольку опираются на главные переменные в данном районе, наблюдение за которые содержат длинные ряды данных и отражают физику процессов в исследуемом регионе. На рисунке 4.1 представлен межгодовой ход выделенных индексов, все индексы имеют общий ход, при этом индекс южного колебания (SOI) имеет обратный ход и отражает градиент приземного атмосферного давления в области острова Таити и портом Дарвин, в данных областях наблюдаются устойчивые области повышенного и пониженного давления, соответственно.



Рисунок 4.1. Межгодовой ход традиционных индексов явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья за период с 1993 по 2021 год.

Исходя из полученных данных был сделан вывод, что максимальная интенсивность явлений Эль-Ниньо наблюдалась в 1997, 2009 и 2015 года, при этом максимальные явления Ла-Нинья наблюдались в 2000, 2008 и 2011 годах. На основе этих лет были построены карты распределения аномалий уровенной поверхности в экваториально-тропической зоне Тихого океана (20 с.ш. – 20 ю.ш.). На рисунке 4.2 представлена характерная ситуация при явлениях Эль-Ниньо (3 года, как указано выше).

По полученным данным можно сделать вывод, что в данной области наблюдаются высокие как положительные, так и отрицательные аномалии. Так на западе Тихого океана наблюдаются отрицательные аномалии уровенной поверхности, доходя до значений меньше -80 мм и -40 для аномалий стерических колебаний в слоях 0-700 и 0-2000 метров. При этом на востоке Тихого океана наблюдаются большие положительные аномалии до +160 мм и +80 мм для стерических колебаний.

Несложно отметить, что в данном районе наблюдаются как аномалии полной составляющей уровенной поверхности, так и аномалии стерической составляющей, однако амплитуда колебаний стерической составляющей гораздо меньше, чем у полной, так перепад уровня может достигать ≈240 мм, а стерической составляющей ≈120 мм в двух очагах наибольших аномалий, которые описывают основную изменчивость в данном районе.



Рисунок 4.2. Распределение аномалий уровенной поверхности экваториально-тропической зоны Тихого океана в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015 года).

Также была построена карта распределения аномалий уровенной поверхности для годов Ла-Нинья (рисунок 4.3). При Ла-Нинья наблюдается кардинально иные процессы в данной области. Очаги максимальных аномалий поменяли свое расположение, а точнее поменяли местами. На западе Тихого океана наблюдается очаг положительных аномалий, превышающий 120 мм и 100 мм для стерических колебаний, а на востоке в некоторых местах ниже -20 мм и -60 мм для стерических колебаний в слое 0-700 и 0-2000 метров. Также стоит отметить, что перепад уровня при Ла-Нинья также меньше и составляет ≈140 мм для аномалий уровенной поверхности и ≈160 мм для стерической составляющей уровенной поверхности. Помимо изменения знака очагов с наибольшими аномалиями изменился и перепад уровня, для аномалий уровенной поверхности. Поровня, для аномалий уровенной поверхности и ≈100 мм, однако перепад аномалий стерической составляющей наоборот повысился на ≈40 мм, что связано с

большими аномалиями стерической составляющей на востоке Тихого океана в Районе Перуанского апвеллинга.



Рисунок 4.3. Распределение аномалий уровенной поверхности экваториально-тропической зоны Тихого океана в года максимальной интенсивности Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011 года).

Также были построены карты разницы между двумя явлениями для определения областей с наибольшими аномалиями, карты представлены на рисунке 4.4. Таким образом были получены две области, которые отражают основную изменчивость и позволяют количественно определить перепад уровенной поверхности между западной и восточной частью Тихого океана. Для значений уровенной поверхности перепад достигает ≈350 мм, для стерической составляющей ≈200 мм.



Рисунок 4.4. Разница аномалий уровенной поверхности при явлениях Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2008, 2011), года максимальной интенсивности явлений.

Для проверки согласованности изменчивости уровенной поверхности и других гидрометеорологических характеристик, которые используются в традиционных индексах явлений, был построен первый интегральный уровенный индекс явления Эль-Ниньо, который отражает изменчивость в двух очагах, которые были определены выше. На востоке и западе Тихого океана были проведены два разреза SL_{EN} и SL_{SO} со следующими координатами 221° з.д. и 2,5° с.ш. — 2,5° ю.ш. и 137° в.д. и 5—10° с.ш., соответственно. Расположение данных разрезов показано на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5. Расположение проведенных разрезов на востоке (SL_{EN}) и западе (SL_{SO}) Тихого океана.

Обобщенный уровенный индекс SL_{ENSO} получен при расчете разности или получении значения перепада между проведенными разрезами, а именно:

$$SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$$

Был получен межгодовой ход значений уровенного индекса Тихого океана, который представлен на рисунке 4.6, на рисунке нанесены линии тренда. При расчете трендовой составляющей было получено, что величина тренда разреза SL_{SO} выше и составляет 4,38 мм/год в то время, как величина тренда разреза SL_{EN} ниже – 2,58 мм/год, что несколько ниже величины глобального уровенного тренда, который составляет 3,4 мм/год. Стоит отметить, что отрицательный тренд уровенного индекса SL_{ENSO} именно более высокой скоростью роста уровня на западе, чем на востоке, что понятно исходя из формулы расчета данного индекса. Данный индекс полностью отражает вышеупомянутые перепады уровенной поверхности, доходящие до ≈350 мм при Эль-Ниньо и ≈-200 мм при Ла-Нинья. Амплитуда колебания уровня с 1997 года по 1999 год составила около 550 мм.



Рисунок 4.6. Межгодовой ход полученных уровенных индексов с 1993 по 2021 год, а также нанесенные линии трендов.

Для анализа качества полученного уровенного индекса был проведен корреляционный анализ с традиционными индексами явлений, полученный результат представлен в таблице 4.1. Стоит отметить, что значения коэффициента корреляции были проверены на значимость при помощи критерия Стьюдента, значения которого представлены в таблице в третьем столбике. Данный критерий рассчитывался при степени значимости 0,05 и числу степеней свободы N-2, то есть 27. Наблюдается высокая значимая корреляция со всеми традиционными индексами ЭНЮК. Корреляция SL_{ENSO} с наиболее важным индексами, а именно MEI V.2, SOI, Nino 3+4, ONI по среднегодовым данным составляет 0,87, -0,84, 0,91 и 0,92, соответственно. Данные результаты показывают высокую согласованность полученного уровенного индекса см процессами, происходящими в данной области, связанные с Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Таблица 4.1. Значение коэффициента корреляции и критерия Стьюдента уровенных индексов и традиционных индексов явления Эль-Ниньо за период с 1993 по 2021 год.

$t_{\rm mm} = 2.060$	Коэффициент корреляции			Критерий Стьюдента		
$i\kappa p = 2,000$	SL ENSO	SL _{EN}	SLso	SL ENSO	SLEN	SLso
$\mathrm{SL}_{\mathrm{ENSO}}$	1	_	-	1	-	-
SL_EN	0,88	1	-	68,20	1	-
SL_SO	-0,94	-0,66	1	139,85	20,66	1
MEI.V2	0,87	0,73	-0,83	62,43	28,55	48,36
SOI	-0,84	-0,67	0,83	49,66	21,66	47,97
Nino 3+4	0,91	0,89	-0,78	92,86	78,72	36,17
Nino 3	0,80	0,83	-0,66	40,20	49,44	20,69
Nino 4	0,87	0,84	-0,76	62,13	50,70	31,52
Nino 1+2	0,49	0,53	-0,38	11,58	13,41	8,10
Oceanic Nino Index	0,92	0,87	-0,81	101,44	62,29	42,99
Trans Nino Index	-0,37	-0,32	0,35	7,69	6,36	7,20
SST North Atlantic (5- 20°North, 60-30°West)	-0,33	-0,27	0,32	6,52	5,20	6,31
SST South Atlantic (0- 20°South, 30°West-10°East)	-0,37	-0,36	0,33	7,76	7,40	6,55
SST Global Tropics (10°South- 10°North, 0-360)	0,61	0,66	-0,48	17,16	20,77	11,07
Global Atmospheric Oscillation 1	0,51	0,32	-0,58	12,40	6,32	15,86
Global Atmospheric Oscillation 2	0,78	0,64	-0,78	36,04	19,66	35,80
Pacific North American Pattern	0,02	-0,08	-0,08	0,27	1,38	1,43
Pacific Decadal Oscillation	0,76	0,62	-0,74	31,55	31,55	29,28
Heat Content: 130E-80W	0,61	0,82	-0,36	17,21	45,28	7,41
Heat Content: 160E-80W	0,76	0,93	-0,53	32,84	115,26	13,29
Heat Content: 180W-100W	0,81	0,94	-0,59	42,21	147,97	16,39
Central Pacific Outgoing Long Wave Radiation (170E-140W, 5S-5N)	-0,82	-0,69	0,78	43,96	24,05	36,04
Outgoing Long Wave Radiation Equator (160°E- 160°W)	-0,88	-0,75	0,85	73,26	30,52	55,03
ENSO Precipitation Index	0,91	0,83	-0,84	98,54	47,07	50,23
El Niño precipitation index	0,83	0,74	-0,76	53,46	30,02	32,26
La Niña precipitation index	-0,96	-0,88	0,87	204,92	68,15	64,58
BEST	0,91	0,80	-0,86	99,40	38,86	59,93
200mb Zonal Winds	-0,66	-0,44	0,72	21,31	9,90	27,20
850mb Zonal Winds	0,96	0,84	-0,90	204,89	50,49	83,96
850mb Trade Wind Index (175°West-140°West)	-0,82	-0,78	0,73	46,17	35,18	28,59

<i>tкp = 2,060</i>	Коэффициент корреляции			Критерий Стьюдента		
	SL ENSO	SL _{EN}	SL _{SO}	SL ENSO	SLEN	SL so
850mb Trade Wind Index (135°East-180°West)	-0,96	-0,83	0,90	195,22	49,27	83,40
850mb Trade Wind Index (135°West-120°West)	-0,24	-0,40	0,09	4,53	8,54	1,55

Также для установки связи изменения уровня океана выделенной зоне Тихого океана был рассчитан коэффициент корреляции в узлах сетки и построена карта его распределения (рисунок 4.7), на которой четко выделены вышеуказанные очаги максимальных аномалий с наибольшей корреляцией. Также наблюдается высокая корреляция у побережий Северной и Южной Америки, выше 0,6. Также стоит отметить район индонезийского моря, где также наблюдается высокая отрицательная корреляция уровенный данных с рассчитанным уровенным индексом. Севернее, где наблюдается максимальная корреляция, она достигает значений свыше -0,8, при этом корреляция уровня между Индонезийскими островами выше -0,6.



Рисунок 4.7. Распределение коэффициента корреляции индекса SL_{ENSO} и аномалий уровня в узлах сетки с 1993 по 2021 год.

Можно сделать вывод о том, что практически вся территория от 20° с.ш. до 20° ю.ш. Тихого океана подвержена действию явления Эль-Ниньо и противоположному ему Ла-Нинья. Наблюдаются большие колебания уровенной поверхности при Эль-Ниньо и несколько меньшие при Ла-Нинья, однако перепад высот стерического уровня больше именно во время протекания Ла-Нинья, как отмечалось ранее. Также были определены районы с наибольшей изменчивостью и наибольшей корреляцией к выдвинутому уровенному индексу в данной области.

4.2. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Перуанского апвеллинга

Как отмечалось ранее, данная область наибольшим образом изучена влиянию Эль-Ниньо и Ла-Нинья, однако изменчивость уровенной составляющей мало изучена. В данной части работы рассматривается изменчивость уровня при максимальных Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также разница аномалий при данных явлениях и корреляция с выдвинутым ранее уровенным индексом.

На рисунке 4.8 представлено распределение аномалий уровенной поверхности в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015).

На данных картах прослеживается особенность – повышение уровня и стерической составляющей на севере района, вблизи экватора. Аномалии у экватора достигают значений 120 мм и 70 мм для аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей, соответственно. Данные аномалии наблюдаются до 10° ю.ш. и далее наблюдается понижение до значений 40-60 мм и 0-30 мм для аномалий уровня и стерической составляющей, соответственно. Стоит отметить наличие высоких аномалий уровенной поверхности вдоль побережья Южной Америки, на севере района достигающие 80 мм и свыше 60 мм южнее. Данная особенность практически полностью отсутствует у значений стерической составляющей, значения
достигают значений 40 мм вплоть до 16° ю.ш., не получая дальнейшего продвижения, как наблюдается в случае полных аномалий уровенной поверхности. Можно отметить, что стерическая составляющая уровенной поверхности не сильно подвержена изменчивости в данном районе при Эль-Ниньо.



Рисунок 4.8. Распределение аномалий уровенной поверхности в районе Перуанского апвеллинга в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015 года).

На рисунке 4.9 представлено распределение аномалий уровенной поверхности в районе Перуанского апвеллинга в года максимальной интенсивности Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011 года).

По полученным данный можно сделать вывод, что исследуемый район не так сильно подвержен влиянию Ла-Нинья, которая имеет большое влияние в центральной и западной части Тихого океана, однако побережье Южной Америки и сам район Перуанского апвеллинга почти не имеет отклика на данный процесс. Поля распределения аномалий имеют более равномерный характер с максимальными аномалиями уровенной поверхности в центральной части района, достигающими 25-30 мм, что ниже минимальных аномалий уровенной поверхности в тех же точках при Эль-Ниньо. Наблюдаются локальные падения уровня до отметки 0-5 мм. Как отмечалось ранее, стерическая составляющая не сильно подвержена изменению при Эль-Ниньо, также в случае протекания Ла-Нинья наблюдается относительно однородное поле, однако как для данных в слое 0-700, так и 0-2000 метров, наблюдаются максимальные отрицательные аномалии на юге района, достигающие отметки -20 – 25 мм.



Рисунок 4.9. Распределение аномалий уровенной поверхности в районе Перуанского апвеллинга в года максимальной интенсивности Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011 года).

На рисунке 4.10 представлено распределение разницы аномалий уровенной поверхности при максимальных явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья в районе Перуанского апвеллинга.

Полученные данные полностью отражают уже отмеченные особенности района с максимальным и аномалиями на севере района. В районе экватора наблюдаются аномалии от 50 до 90 мм и от 20 до 60 мм для уровенной

поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности. Южнее 10° ю.ш. наблюдается более однородное поле аномалий без ярко выраженных областей с наибольшими аномалиями.



Рисунок 4.10. Распределение разницы аномалий уровенной поверхности при максимальных явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья в районе Перуанского апвеллинга.

На рисунке 4.11 представлено пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{EN}, который полностью описывает процессы, происходящие на востоке Тихого океана, в районе Nino 3+4, с аномалиями характеристик в узлах сетки.

Полученные данные подтверждают полученные данные на основе анализа карт с годами максимальной интенсивности явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. На севере района наблюдается максимальная корреляция, 0,6-0,8 до 10° ю.ш. и высокая корреляция вдоль всего побережья Южной Америки. Также, как упоминалось ранее стерическая составляющая уровенной поверхности имеет не такую высокую связь с происходящими процессами в данной области, что может означать большое влияние не изменчивости плотностной структуры вод, а другими составляющими, таким как анемобарическими или эвстатическими.

На рисунке 4.11 отмечены 4 точки (К1, К2, К3 и К4), которые отражают местоположение точек, наиболее репрезентативных для Перуанского апвеллинга, полученные путем кластерного анализа методом K-means ряда температуры поверхности океана с 1993 по 2022 год.



Рисунок 4.11. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{EN} с аномалиями характеристик в узлах сетки, также отмечены точки температуры поверхности океана, отобранные при помощи кластерного анализа.

Для полученных рядов кластерного анализа (К1, К2, К3 и К4) был проведен корреляционный анализ для выявления связей с рядами аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровня, полученные данные представлены в таблице 4.2. Точки уровенных данных были взяты из ближайшего узла к точке с координатами результатов кластерного анализа. По результатам корреляционного анализа можно подтвердить вывод, что наибольшая связь температуры поверхности океана с уровенными данными наблюдать на севере района в точке 1. Корреляция всех выделенных характеристик наблюдается выше 0,85, это говорит о наличии высокой связи. Помимо всего вышеупомянутого стоит отметить относительно высокую связь стерической составляющей уровня в слое 0-2000 метров и температуры поверхности океана в точке 4, которая располагается южнее 1 точки на 18° ю.ш.

Таблица 4.2. Результаты корреляционного анализа 4-х точек кластерного анализа и значений уровенной поверхности в ближайшем узле в районе Перуанского апвеллинга.

	К1	К2	КЗ	К4
SL EN	0,52	0,19	0,15	0,07
SLA1	0,85	0,19	0,26	0,40
SLA2	0,26	-0,29	0,17	-0,15
SLA3	0,00	-0,49	0,27	-0,23
SLA4	0,50	-0,07	0,28	0,18
TSSLAY_0_700_1	0,86	0,36	0,31	0,39
TSSLAY_0_700_2	0,36	0,46	0,15	0,43
TSSLAY_0_700_3	0,20	0,19	0,26	0,40
TSSLAY_0_700_4	0,38	0,21	0,24	0,37
TSSLAY_0_2000_1	0,85	0,28	0,30	0,32
TSSLAY_0_2000_2	0,40	0,50	0,22	0,46
TSSLAY_0_2000_3	0,29	0,24	0,27	0,45
TSSLAY_0_2000_4	0,72	0,59	0,36	0,60

Таким образом, можно сделать вывод, что район Перуанского апвеллинга наиболее подвержен влиянию Эль-Ниньо на севере района, до 10° ю.ш. и вдоль всего побережья Южной Америки. В свою очередь, стерическая составляющая не так подвержена изменчивости и имеет довольно равномерное распределение, за исключением северного района. Данная особенность говорит о том, что исследуемая область не так сильно подвержена изменению плотностной структуры. Основная изменчивость описывается другими составляющими уровенной поверхности. Корреляционный анализ уровенных данных с данными о температуре поверхности океана также говорят о том, что связь наблюдается только на севере исследуемого региона.

4.3. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Калифорнийского течения и апвеллинга

Область Калифорнийского течения и апвеллинга интересна для изучения поскольку во многих работах отмечается связь с Эль-Ниньо и процессами, происходящими на экваторе в зоне Тихого океана, однако уровенная составляющая мало где рассматривается.

На рисунке 4.12 четко прослеживается высокая связь индекса SL_{ENSO} с уровенными значениями в районе системе Калифорнийского течения и составляет $\approx 0,6$. Данная область примечательна тем, что холодное поверхностное Калифорнийское течение направлено с севера на юг, однако в года Эль-Ниньо в данной области наблюдается повышение уровня, согласно полученным данным. Стоит отметить явное отличие данной области от области Перуанского апвеллинга, поскольку там связь довольно резко понижается и становится незначимой, в то время как в зоне Калифорнийского течения данная связь не только не имеет резкого падения, так и наблюдается дальняя связь с заливом Аляска, доходя до $\approx 0,4-0,5$.

Таким образом, Эль-Ниньо может иметь высокое влияние на данную область и продвижение водных масс на север вдоль Северной Америки.



Рисунок 4.12. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{ENSO} с аномалиями уровенной поверхности в узлах сетки за период с 1993 по 2021 год.

Как в случае с Перуанским апвеллингом, так и с системой Калифорнийского течения были построены карты за года максимальной интенсивности исследуемых явлений, их разница и карта пространственного распределения коэффициента корреляции с уровенным индексом SL_{EN}.

На рисунке 4.13 представлена карта распределения аномалий уровенной поверхности и стерических составляющих в слое 0-700 и 0-2000 метров в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо. Несложно отметить большие аномалии на юге района и особенно в районе Калифорнийского залива и Калифорнийского полуострова со стороны Тихого океана, где аномалии уровенной поверхности имеют значение выше 75 мм. Наблюдается, что все выделенные переменные имеют довольно равномерное распределение. У стерической составляющей уровня наблюдается два локальных максимума с аномалиями выше 55 и 75 мм для слоев 0-700 и 0-2000 метров, соответственно.

Данные карты не дают однозначного ответа о влиянии Эль-Ниньо на данный район, необходимо сравнить результаты с годами Ла-Нинья и их различия.



Рисунок 4.13. Распределение аномалий уровенной поверхности в районе Калифорнийского апвеллинга в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015 года).

На рисунке 4.14 представлены аномалии уровенной поверхности в районе Калифорнийского апвеллинга в года максимальной интенсивности Ла-Нинья.

Отмечается наличие больших положительных аномалий уровенной поверхности на западе выделенного района, доходящие до 35-45 мм как для значений уровенной поверхности, так и для значений стерической составляющей уровенной поверхности. На севере района наблюдается область с максимальными отрицательными аномалиями уровня для рядов стерической составляющей в обоих слоях, что не наблюдается для ряда аномалий уровенной поверхности. Вышеуказанные аномалии имеют значения до -20 мм. В сравнении с годами Эль-Ниньо стоит отметить меньшие по значению

аномалии вдоль побережья Северной Америки для всех исследуемых характеристик.



Рисунок 4.14. Распределение аномалий уровенной поверхности в районе Калифорнийского апвеллинга в года максимальной интенсивности Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011 года).

На рисунке 4.15 представлена разница аномалий уровенной поверхности для годов с максимальной интенсивностью явлений. Максимальная разница в рядах аномалий между годами Эль-Ниньо и Ла-Нинья наблюдается в районе Калифорнийского залива и Калифорнийского полуострова со стороны открытой части Тихого океана и составляют 60 и 40 мм, соответственно, для уровенной поверхности. При этом стерическая составляющая имеет меньшие значение в пределе 20-40 мм. Также, стоит отметить наличие достаточно большую разницу в аномалиях уровенной поверхности вдоль побережья Северной Америки, свыше 40 мм. В остальном аномалии уровенной поверхности имеют равномерное распределение, есть узлы, в которых наблюдаются минимальные расхождения (0 мм).



Рисунок 4.15. Распределение разницы аномалий уровенной поверхности при максимальных явлениях Эль-Ниньо и Ла-Нинья в районе Калифорнийского апвеллинга.

На рисунке 4.16 представлено пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{EN} с рядами переменных в узлах сетки.

Отмечается высокая корреляция вдоль всего побережья Северной Америки (>0,6) и Калифорнийского залива (>0,8), а также стоит отметить наличие высокой связи на северо-западе района (>0,6), где берет начало Калифорнийское И Аляскинское течение ИЗ Северо-Тихоокеанского. Составляющая стерических колебаний уровенной поверхности также имеет высокую корреляцию практически на всем протяжении района, за исключением юго-западной части, где корреляция имеет слишком малые, незначимые значения.

Можно сделать вывод о наличии связи уровенной поверхности в районе Калифорнийского апвеллинга и явления Эль-Ниньо. Предположительно

данное явление может повлиять на систему Калифорнийского течения и иметь отклик в заливе Аляска, что будет рассмотрено в следующей части работы.



Рисунок 4.16. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{EN} с аномалиями характеристик в узлах сетки, также отмечены точки температуры поверхности океана, отобранные при помощи кластерного анализа.

Для дальнейшей работы были проанализированы данные о температуре поверхности океана в данном районе. При помощи кластерного анализа методом K-means были получены 5 наиболее репрезентативные точки, которые отмечены на рисунке 4.16.

Данные точки отражают изменчивость как в открытой части Тихого океана, так и в непосредственной близости с Калифорнийским апвеллингом. Стоит отметить точку 3, которая находится в зоне Калифорнийского залива. В таблице 4.3 приведены полученные результаты, а также цветом отмечены значения коэффициента корреляции выше 0,60. Несложно отметить наличие высокой корреляции как уровенного индекса SL_{EN}, так и исследуемых характеристик в узлах сетки, за исключением точки 3 для ряда переменных, а

также наличие слабой связи ряда стерических колебаний в слое 0-2000 метров в 1, 3 и 4 точках. Точка №5 находится на наиболее близком расстоянии к зоне самого Калифорнийского апвеллинга, и данная точка имеет высокую корреляцию со всеми вышеперечисленными характеристика.

Из всего вышеописанного можно сделать вывод о наличии связи с Эль-Ниньо как для уровенной составляющей, так и для температуры поверхности океана. Однако, не до конца понятен механизм распространения аномалий уровенной поверхности вдоль побережья Северной Америки до залива Аляска и высокая связь с уровенным индексом SL_{ENSO}, как это показано на рисунке 4.12.

Таблица 4.3. Результаты корреляционного анализа 5-х точек кластерного анализа и значений уровенной поверхности в ближайшем узле.

	K1	К2	К3	К4	К5
SL EN	0,73	0,70	0,67	0,53	0,61
SLA1	0,57	0,58	0,53	0,56	0,57
SLA2	0,78	0,78	0,67	0,69	0,73
SLA3	0,78	0,76	0,79	0,60	0,65
SLA4	0,73	0,72	0,69	0,66	0,67
SLA5	0,61	0,60	0,56	0,65	0,63
TSSLA_0_700_1	0,48	0,50	0,34	0,60	0,55
TSSLA_0_700_2	0,81	0,81	0,77	0,88	0,86
TSSLA_0_700_3	0,61	0,61	0,77	0,61	0,63
TSSLA_0_700_4	0,60	0,65	0,39	0,71	0,66
TSSLA_0_700_5	0,69	0,67	0,68	0,80	0,78
TSSLA_0_2000_1	0,48	0,49	0,37	0,59	0,53
TSSLA_0_2000_2	0,81	0,81	0,81	0,85	0,82
TSSLA_0_2000_3	0,55	0,57	0,68	0,57	0,59
TSSLA_0_2000_4	0,46	0,51	0,25	0,55	0,51
TSSLA_0_2000_5	0,70	0,68	0,72	0,78	0,78

Для дальнейшего анализа были проведены разрезы как поперек, так и вдоль системы Калифорнийского течения, как это представлено на рисунке 4.17. В качестве подложки под расположения разрезов была взята карта среднемноголетней температуры поверхности океана в системе Калифорнийского течения. Разрезы проводились в наиболее репрезентативных местах.

Разрезы 1 – 3 проводились с севера, где течение набирает мощь на юг через 5 градусов широта. Разрезы 4 и 5 проведены для покрытия области как открытого океана, так и района Калифорнийского полуострова. Разрезы 6 и 7 проведены вдоль прохождения течения, наиболее репрезентативный участок на разрезе 6 от 35 до 50° с.ш., где течение проходит вдоль всего побережья Северной Америки.



Рисунок 4.17. Пространственное распределение темепературы поверхности океана в районе Калифорнийского течения с 1993 по 2022 год и нанесенные разрезы в данной системе.

На рисунках 4.18 – 4.22 представлены разрезы 1 – 5 поперек прохождения Калифорнийского течения.

На данных рисунках четко прослеживается поднятие уровня в года Эль-Ниньо, а также заметное падение уровня в года после явления. Естественно, уровень выше на разрезах на юге района, что прослеживается на межгодовом ходе. На рисунках представлен ход температуры поверхности океана на данных разрезах, которая также имеет отклик в года явлений. Имея не такие большие значения изменчивости, как в районе Перуанского апвеллинга, где температура может измениться на 5°C. Однако даже такое изменение четко прослеживается в районе Калифорнийского течения на всех широтах.



Рисунок 4.18. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров на разрезе 1.



Рисунок 4.19. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров на разрезе 2.



Рисунок 4.20. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров на разрезе 3.



Рисунок 4.21. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров на разрезе 4.



Рисунок 4.22. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров на разрезе 5.

На рисунке 4.23 представлен совмещенный ход уровенного индекса SLEN с полученными рядами 5 разрезов поперек системы Калифорнийского течения. Отмечается наличие общего хода характеристик и различия в амплитуде колебаний уровня. Стоит отметить некоторое запаздывание уровенной поверхности на проведённых разрезах.





Разрезы 6 и 7 для данной области наиболее интересны поскольку отображают изменчивость уровня во времени на широтном разрезе, что дает понять, как уровенная составляющая может влиять на систему течения.

На рисунках 4.24 и 4.25 представлены широтно-временные разрезы 6 и 7, на них отображены температура поверхности океана, аномалии уровенной поверхности и аномалии стерической составляющей уровенной поверхности. Нет сомнения, что на данных диаграммах прослеживается влияние Эль-Ниньо в года максимальной интенсивности.

Так, на разрезе 6 максимальные аномалии наблюдаются на широтах от 30 до 40° с.ш. и в 2015 году достигают отметки свыше 100 мм. Стоит отметить

повышение температуры поверхности океана в данном широтном диапазоне примерно на 1°С.

Как отмечалось ранее на разрезах 1-5, на разрезе 6 наблюдается повышение уровня на всех широтах в года Эль-Ниньо. Также стоит отметить, что связь с процессами Ла-Нинья не так сильно выражена в данной области. Так, например в 2011 году наблюдаются не такие большие изменения, как в других сопредельных регионах Тихого океана.

На разрезе 7 в свою очередь отчетливо прослеживается влияние процессов, проходящих на экваторе Тихого океана. Четко прослеживаются повышение уровенной составляющей и температуры поверхности океана в 1997 и 2015 годах на протяжении всего широтного разреза.

Отмечается, что в года с 1999 по 2013 наблюдается достаточно равномерное распределение исследуемых характеристик, за исключением небольших колебаний, когда наблюдались слабые года Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Так, с 2003 по 2006 года наблюдались слабые явления Эль-Ниньо и наблюдается небольшое поднятие уровня и температуры на юге разреза, не превышающие 30° с.ш., что также прослеживается на разрезе 7. Однако в данной области повышения наблюдались на протяжении всего разреза с максимумом аномалий на юге, доходя до 36° с.ш.



Рисунок 4.24. Широтно-временная диаграмма разреза 6 по данным температуры поверхности океана, аномалиями уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности.



Рисунок 4.25. Широтно-временная диаграмма разреза 7 по данным температуры поверхности океана, аномалиями уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности.

В таблице 4.4 представлены значения коэффициента корреляции полученных разрезов с уровенные индексом SL_{EN}.

Стоит отметить, что все поперечные разрезы имеют достаточно высокую корреляцию выше 0,50, за исключением 5 разреза аномалий уровенной поверхности. Зеленым цветом отмечены значения выше 0,60. Отмечается высокая связь с разрезами 1, 3 и 4 (45°, 35° и 30° с.ш.), что также прослеживалось на разрезах 6 и 7.

Таблица 4.4. Значения коэффициента корреляции полученных разрезов 1-5 и значений уровеного индекса SL_{EN}.

SL EN	P1	P2	P3	P4	P5
SST	0,51	0,59	0,58	0,70	0,67
SLA	0,59	0,56	0,51	0,64	0,45
TSSLA_0_700	0,66	0,60	0,71	0,71	0,54
TSSLA_0_2000	0,68	0,50	0,75	0,74	0,57

Также, для анализа связи процессов в системе Калифорнийского течения с Эль-Ниньо были получены данные индексов из работ [23], которые отображают изменчивость переноса Калифорнийского течения в районе 39° с.ш., а также покрытие области Калифорнийского течения, так называемыми, волнами тепла.

Индексы волн тепла отражают площадь покрытия области, интенсивность и процентное отношение площади района к площади покрытия волной тепла. В качестве анализа был построен межгодовой ход переменных и были рассчитаны коэффициенты корреляции, как с уровенным индексом, так и с полученными разрезами.

На рисунке 4.26 представлен совмещенный межгодовой ход площади покрытия, интенсивности и процентного соотношения покрытия волной тепла области Калифорнийского течения, индекс Калифорнийского апвеллинга на широте 39° с.ш., а также значения уровенного индекса SL_{EN} за период с 1993 по 2022 год.

Стоит отметить наличие общего ход переменных, что видно на рисунке, а также из результатов корреляционного анализа. Индекс апвеллинга имеет обратный ход, при явлении Эль-Ниньо и повышении уровня наблюдается уменьшение индекса апвеллинга, то есть его перенос через данную широту. Все вышеупомянутые разрезы 1-5 имеют значимую высокую корреляцию с индексами, представленными в данной части работы, что также подтверждает выводы, полученные ранее.

В таблице 4.5 представлены значения коэффициента корреляции, которые прошли проверку на значимость при помощи критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числу степеней свободы 27.

Наблюдается незначимая, малая корреляция индекса апвеллинга с уровенным индексом SL_{EN} и 2 разрезом значений стерической составляющей уровенной поверхности в слое 0-2000 метров.



Рисунок 4.26. Совмещенный межгодовой ход индексов области Калифорнийского течения и уровенного индекса SL_{EN} с 1993 по 2022 год.

Таблица 4.5. Значения коэффициентов корреляции индексов области Калифорнийского течения с уровенным индексом SL_{EN} и 1-5 разрезами.

	Sum_area	Intensity	Heatwave_cover	Upwelling Index 39
SL EN	0,63	0,63	0,71	-0,27
SST1	0,50	0,61	0,77	-0,58
SST2	0,52	0,62	0,82	-0,62

	Sum_area	Intensity	Heatwave_cover	Upwelling Index 39
SST3	0,48	0,62	0,81	-0,65
SST4	0,63	0,70	0,85	-0,56
SST5	0,56	0,67	0,84	-0,57
SLA1	0,81	0,71	0,75	-0,38
SLA2	0,74	0,63	0,72	-0,43
SLA3	0,65	0,66	0,67	-0,53
SLA4	0,76	0,80	0,81	-0,63
SLA5	0,68	0,68	0,78	-0,63
TSSLA_0_700_1	0,80	0,84	0,87	-0,54
TSSLA_0_700_2	0,91	0,87	0,74	-0,37
TSSLA_0_700_3	0,60	0,74	0,76	-0,57
TSSLA_0_700_4	0,43	0,72	0,79	-0,71
TSSLA_0_700_5	0,50	0,68	0,70	-0,49
TSSLA_0_2000_1	0,80	0,84	0,88	-0,53
TSSLA_0_2000_2	0,88	0,77	0,65	-0,30
TSSLA_0_2000_3	0,63	0,75	0,76	-0,54
TSSLA_0_2000_4	0,53	0,77	0,83	-0,64
TSSLA_0_2000_5	0,54	0,70	0,72	-0,46

В качестве выводов к данной части работы стоит сказать, что связь района Калифорнийского течения безусловно имеет отклик явления Эль-Ниньо на экваторе Тихого океана.

Были показаны связи уровенного индекса с индексами переноса, покрытия волной тепла и связи с температурой поверхности океана в разных частях данной системы. Остаются некоторые вопросы к механизмам влияния данного явления на исследуемую систему Калифорнийского течения, что может стать объектом для дальнейшего исследования.

4.4. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область залива Аляска

Ранее уже отмечалось, что связь Эль-Ниньо с заливом Аляска может проходить исключительно вдоль побережья Северной Америки, где наблюдается высокая связь с уровенными индексами. В предыдущей части работы была показана связь Эль-Ниньо с уровнем в районе Калифорнийского течения и сопредельной областью перехода Северо-Тихоокеанского течения в Аляскинское течение. При ознакомлении с литературой о связи Эль-Ниньо с заливом Аляска, были найдены работы, говорящие об изменчивости температуры поверхности залива, а также работа со станционными уровенными данными, которые показали повышение уровня в заливе Аляска еще в 1982 году. Данная часть работы посвящена поиску связей и механизмов влияния Эль-Ниньо на данную область.

Область залива Аляска ограничивается от 160° до 130° з.д. и от 50° до 65° с.ш. Естественно, прямую связь в таких высоких широтах с процессами на экваторе Тихого океана невозможно наблюдать, однако можно наблюдать дальние связи.

Так ранее было выявлено наличие корреляции между переменными и связь с Калифорнийским течением, которое располагается южнее исследуемой области. Прослеживалась связь с процессами на экваторе Тихого океана до широт, где Северо-Тихоокеанское течение переходит в Калифорнийское и Аляскинское течения. Ранее отмечалось, что имеется ряд работ, подтверждающие связь процессов в заливе Аляска с Эль-Ниньо годов максимальной интенсивности, однако В основном рассматривается температура поверхности или температура в слоях океана. Также были опубликованы работы [24, 25] с рассмотрением станционных уровенных данных в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо. Противоположное явление Эль-Ниньо – Ла-Нинья имеет еще меньший отклик в заливе Аляска и не имеет такого влияния на данную область.

В данной части работы были построены карты распределения характеристик, коэффициента корреляции и проведены разрезы в наиболее репрезентативных областях залива. Как отмечалось ранее, Ла-Нинья мало влияет на данную область, поэтому были построены карты распределения аномалий уровенной поверхности по среднемноголетним данным, которые представлены на рисунке 4.27.

Наибольшие уровенные аномалии среднемноголетних уровенных данных наблюдаются в заливах в глуби континента, например, на северозападе в заливе Кука и на северо-востоке в районе архипелага Александра. Также значительные аномалии уровенной поверхности в открытой части океана от 45 до 50 мм. Аномалии стерической составляющей уровенной поверхности имеют значения от -25 до 0 мм на северо-западе района и повышаются от 0 до 40 мм на юге района.

Таким образом, в данной области наблюдается четкое распределение аномалий уровенной составляющей.



Рисунок 4.27. Пространственное распределение аномалий среднемноголетних уровенных данных с 1993 по 2021 год в заливе Аляска.

На рисунке 4.28 представлено пространственное распределение аномалий уровенной поверхности в года максимальной интенсивности явления Эль-Ниньо. Аномалии уровенной поверхности имеют значительное

увеличение до 100 мм в открытой части океана, а также значительное повышение уровня на юго-востоке до 80 мм. Стерическая составляющая уровенной поверхности претерпевает значительно изменение в сравнении с среднемноголетним распределением, имея наибольшие аномалии на востоке района до 40 мм и значительное понижение уровня на западе района до -40 мм. Данные аномалии в значительной мере отличаются от среднемноголетнего распределения.

Стоит отметить факт повышения уровня на юго-востоке района, где проходит Аляскинское течение вдоль побережья Северной Америки, которое связано с Калифорнийским течением.



Рисунок 4.28. Распределение аномалий уровенной поверхности в районе залива Аляска в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015 года).

На рисунке 4.29 представлено пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{ENSO} с значениями аномалий уровенной поверхности в узлах стеки.

В данной области наиболее показателен уровенный индекс SL_{ENSO} , а не SL_{EN} , поскольку этот индекс отражает общую изменчивость на экваторе Тихого океана. Аномалии уровенной поверхности в районе залива Аляска имеют малые незначимые значения, не превышающие 0,5. Таким образом полученная связь является минимальной и незначимой. Стерическая составляющая уровенной поверхности, наоборот, имеет высокую корреляцию, превышающую отметку в 0,8 на юго-востоке района, где Аляскинское течение заходит в область залива Аляска и в открытой части Тихого океана в центральной части. Минимальные значения наблюдаются на юго-западе района и составляют от 0,4 до 0,0.



Рисунок 4.29. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{ENSO} с аномалиями характеристик в узлах сетки.

Поскольку, наибольший интерес представляет область захода Аляскинского течения в область залива Аляска, были проведены разрезы, которые могут охарактеризовать данную область и показать какие изменения могут повлиять на данную область. Было проведено 3 разреза, 2 из которых проходят вдоль акватории залива Аляска по 52,5° с.ш. от 160° до 130° з.д.. При этом разрез 2 проведен исключительно в области влияния Аляскинского течения от 140° до 130° з.д.. Затем 3 разрез проведен от 50° до 58° с.ш. на 145° з.д.



Проведенные разрезы представлены на рисунке 4.30.

Рисунок 4.30. Пространственное распределение температуры поверхности океана в районе залива Аляска с 1993 по 2022 год и нанесенные разрезы в данной системе.

На рисунках 4.31 – 4.33 представлены полученные разрезы температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности, стерической составляющей поверхности океана и уровенного индекса SL_{ENSO}.

На данных рисунках отчетливо видно повышения как температуры, так и уровенных данных в года максимальной интенсивности Эль-Ниньо, а именно в 1997 и 2015 годах. В эти годы наблюдается повышение температуры поверхности океана на $0,5-1,0^{\circ}$ С, повышение уровенной составляющей примерно на 20 мм и стерической на ~10 мм. Можно отметить схожий ход с удвоенным индексом SL_{ENSO}, однако в некоторые года наблюдается запаздывание характеристик. Так, например, в 1997 году было мощное явление Эль-Ниньо, однако значительно повышение уровня наблюдалось в 1998 году. Данная особенность не наблюдалась в 2015 году, где точки экстремума совпали. Стоит сказать, что для более точной оценки запаздывания лучше рассматривать среднемесячные данные аномалий уровенной поверхности.

По полученным разрезам можно сделать вывод о схожем ходе характеристик. Не стоит забывать, что залив Аляска значительно удален от области протекания Эль-Ниньо и данная связь может только косвенно указывать на влияние данного процесса. При этом прослеживается общая тенденция и показана связь с сопредельным регионом – областью Калифорнийского течения. Бессомненно, что сильное влияние оказывает стерическая составляющая уровенной поверхности под влиянием повышения температуры морских вод в данном регионе, что отмечается как на полученных разрезах, так и в уже ранее упомянутых опубликованных научных трудах.



Рисунок 4.31. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров и уровенный индекс SL_{ENSO} на разрезе 1.



Рисунок 4.32. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров и уровенный индекс SL_{ENSO} на разрезе 2.



Рисунок 4.33. Межгодовой ход температуры поверхности океана, аномалий уровенной поверхности и стерической составляющей уровенной поверхности в слоях 0-700 и 0-2000 метров и уровенный индекс SL_{ENSO} на разрезе 3.

В таблице 4.6 представлены значения коэффициента корреляции полученных трех разрезов с уровенным индексом SL_{ENSO}.

Из полученных данных можно сделать вывод, что как раньше уже упоминалось прямой связи могло и не быть из-за географически дальнего расположение двух областей, однако наблюдаются общие точки экстремума в года мощных событий Эль-Ниньо. Также отмечается высокая связь (более 0,60) между уровенным индексом и температурой поверхности океана, а также стерической составляющей уровенной поверхности на разрезах 2 и 3.

Таблица 4.6. Значения коэффициента корреляции полученных разрезов 1-3 и значений уровеного индекса SL_{ENSO}

SL ENSO	P1	P2	Р3
SST	0,68	0,71	0,69
SLA	0,28	0,45	0,43
TSSLA_0_700	0,55	0,74	0,70
TSSLA_0_2000	0,51	0,76	0,67

В заключении данной части работы следует отметить, что прямой связи между экваториальной областью Тихого океана и областью залива Аляска выявить не получилось. Однако, как показали полученные результаты, есть основания полагать, что косвенное влияние можно отметить на основании повышения температуры поверхности океана на 0,5-1,0°С, а также повышение уровня на 20 мм в года мощных Эль-Ниньо 1997 и 2015 годов. Наблюдается запаздывание повышения уровенной составляющей в 1997 году, а на широтном разрезе 3 и вовсе отсутствует, данный разрез можно считать наименее репрезентативным. Самым показательным разрезом можно считать разрез №2, поскольку он проходит в районе захода Аляскинского течения в залив Аляска.

4.5. Влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья на область Индонезийского моря

Область Индонезийского моря наиболее подвержена как явлению Эль-Ниньо, так и Ла-Нинья. В окрестностях данного региона располагается устойчивая область пониженного давления – порт Дарвин, данные которого используются для расчета индекса Южного колебания. Именно здесь наблюдается значительное понижение уровня при Эль-Ниньо и повышение при Ла-Нинья. Исходя из механизмов протекающих процессов при Эль-Ниньо наблюдается понижение температуры океана, при Ла-Нинья происходят противоположные процессы.

Для анализа была выделена область 10° ю.ш. – 10° с.ш. и 100° – 140° в.д. Были построены карты распределения характеристик в данной области и пространственное распределение коэффициента корреляции с уровенным индексом SL_{SO}, который расположен на северо-востоке данной области с координатами 5° – 10° с.ш. и 137° в.д. Данный разрез полностью отражает происходящие в данной области колебания выделенных характеристик, как было указано ранее.

На рисунке 4.34 представлено пространственное распределение аномалий уровенной поверхности при Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011 года) и Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015 года).

Ha рисунке области наиболее упомянутом отчетливо видны подверженные аномалиям уровенной поверхности. Так на северо-востоке района аномалии уровенной поверхности имеют значения выше 200 мм для аномалий уровенной поверхности и ≈160 – 180 мм для аномалий стерической составляющей уровенной поверхности. Для распределения аномалий уровенной поверхности характерно наличие положительных аномалий на большей части акватории, за исключением северо-западной части района, где аномалии уровенной поверхности наблюдаются около 0 мм, то есть при Ла-Нинья и Эль-Ниньо в данной области практически не изменяется уровень океана, что не сказать про все остальные территории.

Стоит отметить, что стерическая составляющая уровенной поверхности имеет значительные аномалии уровенной поверхности в восточной части

района и от 0 до 40 мм на западе района, основные аномалии наблюдаются в районе открытой части Тихого океана. Стерическая составляющая имеет значительный вклад в изменение уровенной поверхности в данной области, что понятно из механизмов протекания данных процессов и что подтверждается на представленной карте распределения.



Рисунок 4.34. Пространственное распределение разницы аномалий уровенной поверхности в районе Индонезийского моря в года максимальной интенсивности Ла-Нинья (2000, 2008 и 2011) и Эль-Ниньо (1997, 2009 и 2015).

Также была построена карта распределения коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{SO} с характеристиках в узлах сетки (рисунок 4.35).

Поскольку, как упоминалось ранее, разрез SL_{SO} находится в районе Индонезийского моря, наблюдается высокая корреляция в восточной части района, выше 0,8 – 0,9. Примерно на 115° восточной долготы проходит изолиния 0,6, что является высокой корреляцией. Ряд аномалий уровенной поверхности имеет высокую корреляцию практически на всей территории области, за исключением северо-западной части, где корреляция наблюдается в районе 0,4 – 0,6. Ряды стерической составляющей уровенной поверхности имеют меньшую связь и на протяжении практически всей области от 100° в.д. до 115° в.д. наблюдается малая связь от 0,2 до 0,6.



Рисунок 4.35. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{SO} с аномалиями характеристик в узлах сетки.

Далее из архива Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR [47] были получены данные об аномалиях уровенной поверхности осредненные по площади морей сопредельных регионов.

Для анализа были выделены бассейны Индонезийского, Южно-Китайского и Желтого морей. Архив содержит оценку трендовой составляющей аномалий уровенной поверхности данных морей с учетом погрешности 0,4 мм/год. Наблюдается положительный тренд во всех вышеупомянутых морях:

- 1. Индонезийское море: 4,2 ± 0,4 мм/год;
- 2. Южно-Китайское море: 3,7 ± 0,4 мм/год;
- 3. Желтое море: 2,5 ± 0,4 мм/год.

Ранее упоминалось, что величина трендовой составляющей на разрезе SL_{SO} составляет 4,38 мм/год, что сопоставимо с данными данного портала. Величина тренда в Индонезийском и Южно-Китайском морях выше, чем в средняя глобальная величина тренда, которая равна 3,1 ± 0,4 мм/год.

Таким образом, был построен межгодовой ход аномалий уровенной поверхности рядов Индонезийского, Южно-Китайского и Желтого морей с рядом уровенного индекса SLSO за период с 1993 по 2021 год, представленный рисунке 4.36.

По полученным данным отмечается сильная связь аномалий уровенной поверхности в морях с разрезом SL_{SO} . Самая отчетливая связь наблюдается с Индонезийским морем. Южно-Китайское и Желтые моря имеют меньшие амплитуды изменчивости уровенной поверхности. В 1997 году наблюдаются отрицательные аномалии уровня до -80 мм, -10 мм и 0 мм для Индонезийского, Южно-Китайского и Желтого морей, а в 2015 году до -20 мм, 20 мм и 30 мм, соответственно, при этом аномалии на разрезе SLSO имеют значения -160 мм как в 1997, так и в 2015 годах.

Для оценки связи был рассчитан коэффициент корреляции уровенного индекса с рядами аномалий уровня морей, полученные данные представлены в таблице 4.7.



Рисунок 4.36. Межгодовой ход аномалий уровенной поверхности Индонезийского, Южно-Китайского и Желтого морей с уровенным индексом SLSO за период с 1993 по 2021 год.

Таблица 4.7. Коэффициент корреляции рядов уровенного индекса SLSO с рядами аномалий уровенной поврехности морей.

	Индонезийское море	Южно-Китайское море	Желтое море	SL SO
Индонезийское море	1,00			
Южно-Китайское море	0,86	1,00		
Желтое море	0,54	0,81	1,00	
SL SO	0,95	0,76	0,46	1,00

По полученным данным корреляционного анализа, представленного в таблице 4.7 можно сделать вывод, что аномалии уровенного индекса SL_{SO} имеют высокую связь с аномалиями уровня в Индонезийском море (0,95) и с

сопредельным ему морем – Южно-Китайским (0,76). Связь с Жёлтым морем мала и незначима, однако, как в случае с заливом Аляска, может прослеживаться влияние в 2015 году, но не прослеживалось в 1997, в года мощнейших явлений Эль-Ниньо. Малая изменчивость в Желтом море обуславливается как дальним расположением акватории от области наибольшей изменчивости, так и наличием естественных преград, таких как островов.

Можно сделать вывод, что данная область менее подвержена процессам на экваторе Тихого океана. Однако как Индонезийское, так и Южно-Китайское моря, область до 25° с.ш. подвержена явлениям Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Данное наблюдение подтверждается на рисунке 4.37, где представлено пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{so} с аномалиями уровенной поверхности в узлах сетки.

Для построения карты была взята область от 20° до 50° с.ш. и от 120° до 180° в.д., затрагивается область Желтого, Японского и южная часть Охотского морей, также интерес представляет область теплого течения Куросио.

На рисунке 4.37 видно, что максимальная связь аномалий уровня с уровенным индексом SL_{SO} наблюдается на юго-западе района в области острова Тайвань (0,6), затем данная связь угасает и наблюдается от 0,4 до -0,2 в некоторых местах открытой части Тихого океана. Отмечается наличие связи со стерической составляющей уровенной поверхности на юго-востоке района до 0,6, а также отрицательную связь на юго-западе района -0,6. Эль-Ниньо и Ла-Нинья не имеют влияние на течение Куросио в данной области, имея незначимую корреляцию на протяжении всего исследуемого района.

Как уже упоминалось ранее, наибольшая связь наблюдается с Южно-Китайским и, естественно, с Индонезийским морями. Районы Тихого океана, которые расположены севернее не подвержены влиянию процесса. Малая связь с течением Куросио позволяет сделать вывод, что течение не подвержено
влиянию внешнего фактора, такого, как Эль-Ниньо, в отличие от Перуанского и Калифорнийского течений на востоке Тихого океана.



Рисунок 4.37. Пространственное распределение коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{SO} с аномалиями характеристик в узлах сетки.

5. Заключение

В заключении будет отдельно рассмотрен каждый район Тихого океана, так как полученные результаты имеют локальный характер.

Итак, в ходе работы были сделаны следующие выводы:

1. Экваториально-тропическая область Тихого океана позволила выделить две области Тихого океана с наибольшими аномалиями уровенной поверхности, и стерической составляющей уровня.

Данные области легли в основу расчета уровенных индексов путем проведения разрезов на востоке и на западе Тихого океана, которые отражают изменчивость при Эль-Ниньо (SL_{EN}), и процессы Ла-Нинья и Южное колебание (SL_{SO}), соответственно. Разность данных разрезов представила уровенный индекс SL_{ENSO}.

Полученный индекс показал свое качество путем корреляционного анализа с традиционными индексами ЭНЮК, а также позволил оценить перепад уровня на востоке и западе Тихого океана в года Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Так в 1997 году наблюдался перепад уровня, составляющий ≈350 мм и в 2015 году ≈375 мм, при этом аномалии уровенной поверхности при Ла-Нинья составляли ≈-200 мм в 1999 году и ≈-150 мм в 2011 году. Амплитуда колебаний составила ≈580 мм в года сильнейших Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

2. Область Перуанского апвеллинга характеризуется высокой связью аномалий уровенной поверхности в узлах сетки с уровенным индексом SL_{EN} на севере района до 10° ю.ш. (r>0,6). Высокая корреляция наблюдалась узкой полосой вдоль побережья Южной Америки (r>0,6). Остальная область Перуанского апвеллинга имела слабую связь с уровенным индексом.

Точки, выделенные при помощи кластерного анализа, показали высокую связь уровенной поверхности с температурой поверхности океана на севере района и понижение связи по мере продвижения на юг района, где связь мала и незначима. Стерическая составляющая уровенной поверхности показала высокую связь на севере района и малую незначимую связь ниже 10° ю.ш..

Данный район мало подвержен изменчивости уровенной составляющей под влиянием изменения плотностной структуры.

3. Область Калифорнийского течения и апвеллинга показала высокую связь уровенных данных в узлах сетки с уровенным индексом SL_{EN}. На протяжении большей части района, особенно вдоль береговой черты наблюдалась высокая корреляции (r>0,6), высокая связь наблюдалась на севере района в районе 44 – 50° с.ш.

Стоит отметить высокую связь с аномалиями стерической составляющей, в отличии от зоны Перуанского апвеллинга. На протяжении большей части района наблюдается связь выше 0,6, за исключением югозапада района, где наблюдалась малая незначимая связь.

Проведенные разрезы в системе Калифорнийского течения показали высокую связь с уровенным индексом SL_{EN}, также четко прослеживалось влияние процесса Эль-Ниньо в года своей максимальной интенсивности, уровень на этих разрезах повышался в 1997 и 2015 годах. Для анализа была рассмотрена температура поверхности океана, которая также показала отклик на данные процессы.

4. Область залива Аляска показала, что прямой связи не наблюдается, но можно с уверенностью утверждать о наличии косвенной связи с Эль-Ниньо. Данная связь проходит через систему Калифорнийского и Аляскинского течения, которое заходит в данную область на востоке, вдоль побережья Северной Америки.

Проведенные разрезы показали повышение уровня в года сильнейших явлений Эль-Ниньо. Отмечается достаточно высокая связь со стерическими колебаниями уровенной поверхности и температурой поверхности океана в данной области, что подтверждается в изученной литературе.

Таким образом, в данном районе наблюдается высокая связь с изменчивостью плотностной структуры.

5. Область Индонезийского моря является одной из наиболее подверженных влиянию явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В данной области

наблюдается очаг наибольших аномалий уровенной поверхности на западе Тихого океана, где был проведен разрез SL_{SO}.

Доказана связь уровня в Индонезийском и Южно-Китайском море с уровенными индексами, а также выделено наличие слабой незначимой связи с уровнем в Желтом море. Доказано, что связь с уровенным индексом утрачивается выше 25° северной широты, не затрагивая область Желтого и Японского морей. Стоит отметить, что данные процессы не влияют на систему течения Куросио, которое проходит в данной области вдоль Японского архипелага.

Подводя итог данной работы необходимо сказать, что все поставленные цели выполнены. Поиск связей в различных района Тихого океана с явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья показал достаточно сильное влияние на акватории вдоль берегов как Южной, так и Северной Америки. Стоит отметить, что западная часть Тихого океана не так сильно подвержена влиянию исследуемых процессов, как восточная, но значимые связи были обнаружены. Выполненная работа имеет перспективу для дальнейших исследований, поскольку представленный научный труд один из первых показывает связь изменчивости уровенной поверхности в Тихом океане с явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Использованная литература

- Серых И. В. О роли Эль-Ниньо Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329—370.
- Ruiqiang Din, Yu-Heng Tseng, Emanuele Di Lorenzo. Multi-year El Niño events tied to the North Pacific Oscillation. // NATURE COMMUNICATIONS. 2022. doi.org/10.1038/s41467-022-31516-9.
- 3. Minghao Yang, Chongyin Li. Impacts of two types of El-Niño on the winter North Pacific storm track. Environmental Research Letters. 2020.
- Na-Yeon Shin, Jong-Seong Kug. More frequent central Pacific El Niño and stronger eastern pacific El Niño in a warmer climate. Climate and Atmospheric Science (2022).
- J. Picaut, J-PH. Boulanger. ENSO AND ALTIMETRY. International Scientific Conference on TROPICAL OCEAN GLOBAL ATMOSPHERE (TOGA) Programme. 1995.
- El Niño, explained: A guide to the biggest weather story of 2015. URL: https://www.vox.com/2015/8/17/9164499/el-nino-2015.
- 7. Comparing 2015 El Niño To The Record-Setters. URL: <u>https://www.wiscontext.org/comparing-2015-el-nino-record-setters</u>.
- Бондаренко А. Л., Серых И. В. О формировании явления Эль-Ниньо Ла-Нинья Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 57—63.
- Осипов А. М., Гущина Д. Ю. Эль-Ниньо 2015—2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 54—81. doi:10.21513/2410-8758-2018-3-54-81.
- 10. Yeh S. W., Cai W., Min S. K., McPhaden M. J., Dommenget D., Dewitte B., Collins M., Ashok K., An S. I., Yim B. Y., Kug J. S. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. Reviews of Geophysics. 2018. Vol. 56, No. 1. P. 185—206.

- 11.Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. Int. J. Climatol. 2001. Vol. 21. P. 1845—1862.
- 12.Choudhury A.M. A theory for the El Nino. International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy. 1994.
- 13.Delcroix T., Pierre R. On sea level changes in the Tropical Pacific during El Nino-Southern Oscillation events. Proceedings of the Third SPREP Meeting on Climate Change and Sea Level Rise in the South Pacific Region. 1997.
- 14.Cardon K., Goryl P., Scharroo R., Benveniste J. 1997/98 El Niño observed by ERS. European Symposium on Atmospheric Measurements from Space, 1999.
- 15. Walker, G.T., 1928: World Weather. Monthly Weather Review, 56, 167-170.
- 16.Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) URL: <u>https://psl.noaa.gov/enso/mei/</u>.
- 17.Малинин В. Н., Смирнов М. А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.
- 18.Espinoza-Morriberon, D., V. Echevin,F. Colas, J. Tam, J. Ledesma, L. Vasquez, and M. Graco (2017), Impacts of El Nino events on the Peruvian upwellingsystem productivity, J. Geophys. Res.Oceans,122, doi:10.1002/2016JC012439.
- 19.Quispe-Ccalluari C, Tam J, Demarcq H, et al. An index of coastal thermal effects of El Niño Southern Oscillation on the Peruvian Upwelling Ecosystem. Int J Climatol. 2018;1–11. https://doi.org/10.1002/joc.5493.
- 20.Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System // Ecological Studies. 2001. Vol.144. P. 229–244.
- 21.Fiedler, P. C., and N. J. Mantua (2017), How are warm and cool years in the California Current related to ENSO?, J. Geophys. Res. Oceans, 122, 5936– 5951, doi:10.1002/2017JC013094.

- 22.Jacox, M. G., Edwards, C. A., Hazen, E. L., & Bograd, S. J. (2018). Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the U.S. West Coast. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123, 7332–7350. <u>https://doi.org/10.1029/2018JC014187</u>.
- 23.Takesue, R. K., et al. (2004), Influence of coastal upwelling and El Nino– Southern Oscillation on nearshore water along Baja California and Chile: Shore-based monitoring during 1997–2000, J. Geophys. Res., 109, C03009, doi:10.1029/2003JC001856.
- 24.Jacox, M. G., J. Fiechter, A. M. Moore, and C. A. Edwards (2015), ENSO and the California Current coastal upwelling response, J. Geophys. Res. Oceans, 120, 1691–1702, doi:10.1002/2014JC010650.
- 25.Mauzole, Y. L., Torres, H. S., &Fu, L.-L. (2020). Patterns and dynamics of SST fronts in the California Current System. Journalof Geophysical Research: Oceans,125,e2019JC015499. <u>https://doi.org/10.1029/2019JC015499</u>.
- 26.Andrew W. Leising, Isaac D. Schroeder, Steven Bograd. State of the California Current 2014–15: Impacts of the warm-water "Blob", CalCOFI Rep., Vol. 56, 2015.
- 27.Elizabeth Durán-Campos, Erik Coria-Monter, María Adela Monreal-Gómez. Impact of "the Blob" 2014 and 2019 in the sea surface temperature and chlorophyll-a levels of the Gulf of California: a satellite-based study. Latin American Journal of Aquatic Research, 50(3): 479The Blob in the Gulf of California -491, 2022 479. DOI: 10.3856/vol50-issue3-fulltext-2910.
- 28.Holser, R. R., Keates, T. R., Costa, D. P., & Edwards, C. A. (2022). Extent and magnitude of subsurface anomalies during the Northeast Pacific Blob as measured by animal-borne sensors. Journal of Geophysical Research: Oceans, 127, e2021JC018356. <u>https://doi.org/10.1029/2021JC018356</u>.
- 29.California Current Integrated Ecosystem Assessment. URL: <u>https://oceanview.pfeg.noaa.gov/dashboard/</u>.
- 30. Arne Melsom, Harley E. Hurlburt, E. Joseph Metzger. El Nino Induced Ocean Eddies in the Gulf of Alaska. Center for Ocean-Atmospheric Prediction

Studies The Florida State University TallahasseeF, L 32306-3041. August, 1995.

- 31.Kevin M Bailey, Richard D. Brodeur. ENSO events in the northern Gulf of Alaska, and effects on selected marine fisheries. BAILEY ET AL.: ENSO EFFECTS ON FISHERIES IN GULF OF ALASKA. CalCOFI Rep., Vol. 36, 1995.
- 32.Maria Flatau and Lynne Talley. Interannual Variability in the Gulf of Alaska during the 1991–94 El Nino. Journal of climate, Vol.13. P.1664-1673. 2000.
- 33.Р.М. Алояров, А.М. Федоров, Т.В. Белоненко. Исследование стерических колебаний в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным. ОКЕАНОЛОГИЯ. Стр. 56-71. 2019.
- 34.В.Н. Малинин. Уровень океана: Настоящее и будущее. Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2012.
- 35.NOAA, Ocean Heat Content, Salt Content, and Sea Level Anomalies. URL: https://www.ncei.noaa.gov/products/ocean-heat-salt-sea-level.
- 36.NOAA, Total Steric Sea Level Anomaly: Basin time series. URL: <u>https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-</u>content/basin fsl_data.html.
- 37.Patrick De Deckker. The Indo-Pacific Warm Pool: critical to world oceanography and world climate. (2016) 3:20 DOI 10.1186/s40562-016-0054-3.
- 38.Klaus WYRTKI. Some Thoughts about the West Pacific Warm Pool. University of Hawaii, Honolulu Hawaii, 96822 - U.SA. 1989.
- 39.Yin, Z.; Dong, Q.; Xiang, K.; Bian, M. Spatio-Temporal Characteristics of the Indo-Pacific Warm Pool and the Corresponding Rain Pool. Sustainability 2022, 14, 10841. <u>https://doi.org/10.3390/su141710841</u>.
- 40.Darshana Duhan, Ashish Pandey, Puneet Srivastava. Rainfall variability and its association with El Nino Southern Oscillation in Tons River Basin, India. Meteorol Atmos Phys, 2017. DOI 10.1007/s00703-017-0525-x.

- 41.Jörg Bendix, Katja Trachte. EL NIÑO MEETS LA NIÑA ANOMALOUS RAINFALL PATTERNS IN THE "TRADITIONAL" EL NIÑO REGION OF SOUTHERN ECUADOR. Vol. 65 · No. 2 · 151–167, Erdkunde, 2011.
- 42.Sumudu Adhikari, Susanthi Liyanaarachchi. Rainfall prediction based on the relationship between rainfall and El Niño Southern Oscillation (ENSO). Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 2010. DOI:10.4038/jnsfsr.v38i4.2652.
- 43.J.S. Russell, I Mcleod and M.B. Dale. Combined Southern Oscillation Index and Sea Surface Temperatures as Predictors of Seasonal Rainfall.
- 44.Gary Meyers. Variation of Indonesian throughflow and the El Nino Southern Oscillation. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 101, NO. C5, PAGES 12,255-12,263, MAY 15, 1996.
- 45.Karlina Triana and A'an Johan Wahyudi. Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence. ASEAN Journal on Science &Technology for Development. Vol 37, No 3, 2020, 115–121. DOI 10.29037/ajstd.627.
- 46.Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // Mon. Wea. Rev. 1969. Vol. 97. P. 163—172.
- 47.Скляров В. Е. Бышев В. И. Наблюдение из космоса за явлением Эль-Ниньо в Мировом океане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 105—110.
- 48.HUI WANG, LINDSEY LONG, ARUN KUMAR. How Well Do Global Climate Models Simulate the Variability of Atlantic Tropical Cyclones Associated with ENSO? Journal of climate, Vol.27, P.5673-5692. 2014. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00625.1.
- 49.AVISO: Sea Level Anomalies. URL: <u>https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-</u> <u>products/global/gridded-sea-level-anomalies-mean-and-climatology.html</u>.

- 50.NOAA: Global Total Steric Sea Level Anomaly (TSSLA). URL: <u>https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-</u> <u>content/fsl_global.html#ShowNote</u>.
- 51.NOAA: El Niño Southern Oscillation (ENSO). URL: <u>https://psl.noaa.gov/enso/</u>.
- 52.NOAA: NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). URL: <u>https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.godas.html</u>.
- 53.Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR. URL: <u>https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseri</u> <u>es.php</u>.
- 54.Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008 г. 408 с.
- 55.Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат. 1992 г. 96 с.