



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

« Моделирование ветрового волнения в прибрежной зоне »

исполнитель: Нагахаватта Самиддхи Нипуника

руководитель: канд. геогр. наук, доцент, Чанцев Валерий Юрьевич

К защите допускаю»

И.о. Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

10» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	3
ГЛАВА 1. Географическое и гидрометеорологическое описание района исследования.....	6
1.1 Физико-географическое описание района исследования.	6
1.2 Особенности пространственно-временного распределения атмосферных процессов	8
1.3 Характеристика прибрежной динамики вод	11
1.4 Выбор оптимального района моделирования	13
ГЛАВА 2. Исходные данные и методы исследования	26
2.1 Подготовка исходных данных для исследования ветрового волнения..	26
2.2 Модель SWAN как средство исследования ветрового волнения	32
ГЛАВА 3. Численное моделирование ветрового волнения в прибрежной зоне Шри-Ланки.....	39
3.1 Задание границ района моделирования и подготовка расчетной сетки.	39
3.2 Анализ результатов моделирования ветрового волнения в прибрежной зоне Шри-Ланки	42
Заключение	56
Список литературы	59

Введение

Прибрежные зоны являются одними из самых динамичных и экологически чувствительных регионов на планете, где атмосферные процессы, циркуляция океана и энергия волн сходятся воедино, формируя как природные ландшафты, так и человеческую инфраструктуру. В тропических островных государствах, таких как Шри-Ланка, эти взаимодействия особенно интенсивны из-за того, что остров подвержен воздействию сильных муссонных ветров, высокой влажности и сезонно меняющихся морских условий. Одним из ключевых процессов, формирующих прибрежную среду, является образование и распространение волн, генерируемых ветром, которые играют фундаментальную роль в береговой эрозии, переносе осадочных пород, планировании инфраструктуры и безопасности на море.

Географическое положение Шри-Ланки в экваториальной части Индийского океана обуславливает сложный и сезонно изменчивый волновой климат, на который влияет чередование юго-западных и северо-восточных муссонов. Эта естественная изменчивость усугубляется крупномасштабными климатическими явлениями в виде Эль-Ниньо - Южного колебания (ENSO) и Индоокеанского диполя (IOD), которые вызывают изменения в направлениях ветров, времени наступления муссонов и частоте штормов. Взаимодействие этих процессов создает все более неустойчивое поведение волн, с повышенной волновой активностью в межмуссонные периоды, которые традиционно считаются периодами затишья. Поскольку прибрежная инфраструктура, рыболовство, туризм и экосистемы жизненно зависят от предсказуемости волнового режима, точное моделирование и прогнозирование поведения волн стало актуальной областью научных исследований, а также практической необходимостью.[11]

Данное исследование особенно актуально в контексте обширной береговой линии Шри-Ланки протяженностью более 1300 километров, которая постоянно подвергается воздействию ветровых волн различной интенсивности и направления. Поскольку уязвимость прибрежных районов усиливается в результате изменения климата, повышения уровня моря и увеличения числа экстремальных погодных явлений, разработка цифровых моделей волн высокого разрешения имеет решающее значение для эффективной поддержки принятия решений и анализа рисков. [18]

Современные цифровые модели, такие как SWAN (Simulating WAves Nearshore), представляют собой эффективный метод моделирования динамики волн, вызванных ветром, вблизи берега и на мелководье. В частности, SWAN специально разработана для работы со сложной географией побережья, батиметрическими вариациями и многочисленными механизмами генерации и рассеивания волн. Таким образом, ее способность справляться с такими сложностями позволяет инженерам и исследователям моделировать реальные масштабы и продолжительность волн, что делает ее чрезвычайно подходящей для прогнозирования, планирования и проведения исследований в прибрежной зоне.[17]

Модель, используемая в данной работе, SWAN, использует данные реанализа ERA5, предоставленные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) за 2023 год после анализа характера ветра за 10-летний период 2019-2024 годов. Набор данных ERA5 предоставляет данные высокого разрешения об условиях в атмосфере, включая поля ветра и волны, что позволяет проводить обширный многолетний анализ сезонных закономерностей и экстремальных волн в прибрежных водах у берегов Шри-Ланки. [2]

Цель работы - провести численное моделирование динамики ветровых волн в прибрежной зоне Шри-Ланки с помощью модели SWAN на основе метеорологических данных ERA5.

Для достижения этой цели поставлены следующие исследовательские задачи:

1. Провести географическое и гидрометеорологическое описание прибрежной зоны Шри-Ланки;
2. Собрать, обработать и подготовить метеорологические и океанографические данные, включая данные реанализа ERA5;
3. Выбрать оптимальный прибрежный район, подходящий для численного моделирования волн;
4. Настроить и внедрить модель SWAN для выбранного региона, включив соответствующие граничные условия и пространственное разрешение;
5. Проанализировать результаты моделирования и оценить сезонные и экстремальные режимы волн;
6. Сформулировать выводы на основе результатов численного эксперимента и оценить их влияние на динамику прибрежной зоны.

Благодаря интеграции современных инструментов моделирования и долгосрочных атмосферных данных, данное исследование призвано внести вклад в научное понимание поведения волн в регионе Индийского океана и обеспечить практические выводы для повышения устойчивости и управления прибрежными районами в Шри-Ланке.

ГЛАВА 1. Географическое и гидрометеорологическое описание района исследования

1.1 Физико-географическое описание района исследования.

Шри-Ланка - тропическое островное государство, расположенное в самом сердце Индийского океана, географически находящееся между 5°55' и 9°51' северной широты и 79°42' - 81°53' восточной долготы (Рис. 1). Благодаря своему географическому положению в центре двух основных атмосферных явлений - юго-западного и северо-восточного муссонов - остров находится в точке пересечения двух муссонов. Преобладающие и чередующиеся режимы ветров, создаваемые этими муссонами, определяют климат острова, контролируют сезонные осадки и оказывают сильное влияние на океанографические и прибрежные особенности в течение всего года. [21]

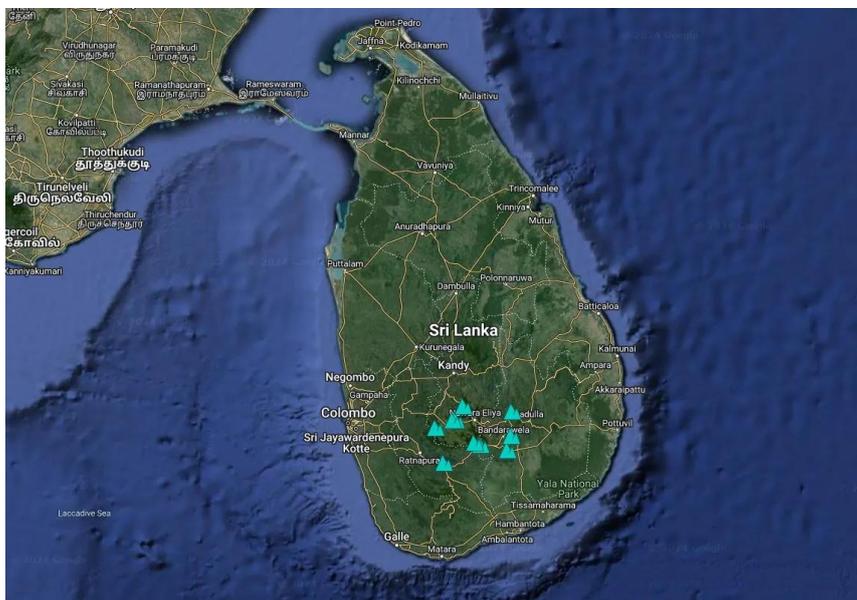


Рис. 1. Географическое положение Шри-Ланки [15]

Рельеф острова необычайно разнообразен и делится на три основные зоны, которые влияют как на его физическую географию, так и на климатические колебания. Центральное нагорье, расположенное в центре, представляет собой возвышенность в южно-центральной части острова,

высота которой превышает 2 500 метров. Нагорье выполняет важную функцию климатического барьера, отклоняя муссонные потоки и вызывая орографические осадки на наветренных склонах, в то время как на подветренных склонах наблюдается режим дождевой тени. Именно благодаря этому активному процессу возникают существенные различия в распределении осадков, и он играет важную роль в управлении динамическими волнами и переносом влаги к прибрежным зонам.[21]

Промежуточные равнины отмечают основные горные районы, плавно переходящие в низменные прибрежные районы, окружающие остров. Прибрежные районы с обширными песчаными пляжами и скалистыми мысами выходят непосредственно к открытому океану. Изолированная природа Шри-Ланки усиливает воздействие океанических влияний, делая остров очень уязвимым для действия волн, приливов и прибрежных атмосферных взаимодействий. Океанические особенности, такие как сила ветра, колебания температуры поверхности моря и пограничные течения, взаимодействуют вдоль береговой линии, создавая очень динамичные прибрежные условия. В частности, близость к большим океанским глубинам вдоль западного, южного и восточного побережий способствует формированию динамических полей волн, конфигурация которых зависит от сезонных колебаний, связанных с доминирующими муссонами. Волны, часто формирующиеся в отдаленных районах под воздействием ветров дальнего действия или местных штормов, способны преодолевать значительные расстояния, прежде чем попасть на континентальный шельф, и поэтому вызывают такие явления, как обмеление, преломление и разрушение в прибрежных зонах. Таким образом, количество энергии в волнах значительно варьируется: в одних местах наблюдаются сильные океанские волны, в то время как другие места относительно защищены.[5]

Помимо местных и региональных ветровых режимов, на прибрежные и атмосферные условия в Шри-Ланке все большее влияние оказывают

крупномасштабные системы телесвязей, включая Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНСО) и Индоокеанский диполь (ИОД). Такие климатические явления вызывают изменения температуры поверхности моря и изменяют сроки и интенсивность муссонной циркуляции, что, в свою очередь, влияет на характер осадков, интенсивность штормов и климат прибрежных волн.[1],[7]

Уникальное географическое положение острова в сочетании с особым градиентом высот и высокой взаимосвязанностью с муссонными и океаническими системами создает необычайно сложную и разнообразную прибрежную среду. Такие особенности делают остров идеальной природной лабораторией для изучения взаимодействия ветра и волн, прибрежной гидродинамики и общего влияния климатических колебаний на экосистемы тропического океана.

1.2 Особенности пространственно-временного распределения атмосферных процессов

Климатические условия Шри-Ланки в первую очередь определяются ее положением в тропическом поясе и близостью к двум крупным океаническим телам - Бенгальскому заливу и Индийскому океану. Остров находится под сильным влиянием муссонных ветров, которые регулируют сезонные ветры, осадки и волны над регионом. Атмосферные явления демонстрируют большую пространственную и временную изменчивость, на которую влияют как крупномасштабные климатические явления, так и сложный рельеф острова.

В году на Шри-Ланке четыре различных сезонных периода: юго-западный муссон длится с мая по сентябрь; северо-восточный муссон - с декабря по февраль; и два межмуссонных периода - один с марта по апрель,

другой - с октября по ноябрь. Каждый из них имеет характерные метеорологические особенности и региональные последствия.

Во время юго-западного муссона с Индийского океана приходят сильные влажные воздушные массы. Когда эти ветры сталкиваются с крутыми склонами Центрального нагорья, они поднимаются вверх, что вызывает процесс охлаждения и конденсации, приводящий к выпадению орографических осадков высокой интенсивности. В результате на западных и юго-западных склонах нагорья выпадает чрезвычайно большое количество осадков, причем месячные показатели часто превышают 1000 мм, а годовые - 2400 мм. Эти месяцы характеризуются постоянной облачностью, высокой влажностью и интенсивным ветром, особенно над северо-западной и юго-восточной прибрежными зонами и вдоль горных перевалов.[9]

Напротив, северо-восточный муссон, зарождающийся в Бенгальском заливе в бореальную зиму, влияет в основном на северное и восточное побережье. Хотя он приносит относительно более сухие и стабильные атмосферные условия, все же выпадает значительное количество осадков, в основном на северо-восточных склонах, которые могут достигать 1 250 мм за сезон. Атмосферные условия в этот период, как правило, более стабильны, но, тем не менее, могут возникать резкие ливни, вызванные лежащими под ними системами низкого давления. Между муссонами существуют межмуссонные периоды, которые являются переходными фазами в климатическом календаре острова. Особый интерес представляет то, что эти фазы, особенно второй межмуссонный период, приходящийся на октябрь и ноябрь, характеризуются активной конвективной деятельностью, которая приводит к внезапным грозам и локальным сильным дождям, обычно наблюдаемым поздним вечером и днем. Первый межмуссонный период, напротив, характеризуется меньшим количеством осадков из-за меньшей циклонической активности и слабой вертикальной неустойчивости в атмосфере. Географически Шри-Ланка демонстрирует значительную

изменчивость в распределении осадков, что в значительной степени определяется ее рельефом и ориентацией по отношению к преобладающим ветрам. На наветренных склонах нагорья выпадают обильные осадки, в то время как подветренные районы, особенно юго-восточные и восточные, попадают в дождевую тень и остаются относительно сухими во время юго-западного муссона.[14],[19]

Это приводит к бимодальному режиму осадков, при котором примерно 38 % общего количества осадков на острове приходится на юго-западный муссон и 25 % - на северо-восточный, а остальные осадки распределяются между двумя межмуссонными периодами. (Рис. 2)

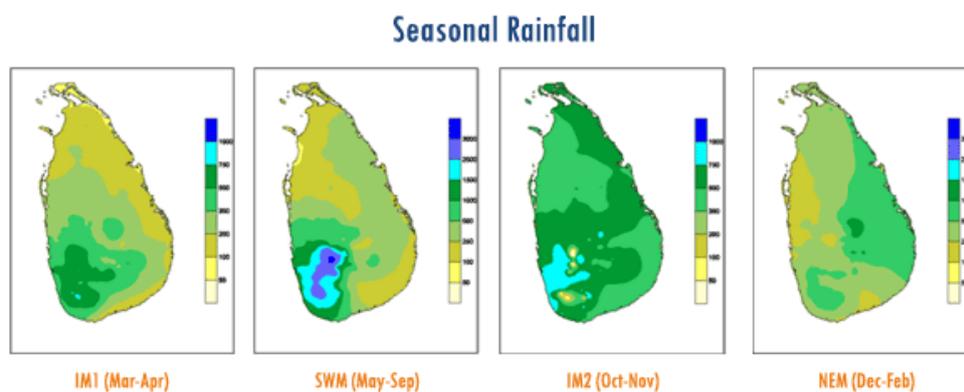


Рис. 2. Сезонное количество осадков в Шри-Ланке в зависимости от типов муссонов. [4]

Помимо местных муссонных механизмов, атмосферная динамика Шри-Ланки в больших масштабах контролируется взаимодействиями океана и атмосферы, такими как Эль-Ниньо - Южное колебание (ENSO) и диполь Индийского океана (IOD). Такие телесвязи со всего мира существенно влияют на температуру поверхности моря (ТПО) в Индийском и Тихом океанах, которая, в свою очередь, оказывает воздействие на сроки, силу муссонов и аномалии осадков. Например, северо-восточный муссон может ослабевать в годы Эль-Ниньо, изменяя не только количество осадков, но и распределение энергии ветра и волн вдоль береговой линии. Термические условия, с которыми сталкивается Шри-Ланка, отражают совместное

воздействие муссонных потоков и топографических различий. Среднегодовые температуры близки к 27°C на прибрежных высотах, но резко снижаются в Центральном нагорье, при этом суточные колебания температуры составляют около 6°C . Самые низкие температуры обычно наблюдаются в декабре и январе, а затем повышаются с апреля по сентябрь, с наступлением юго-западного муссона. В целом, временные изменения атмосферных явлений над Шри-Ланкой носят как межгодовой, так и сезонный характер и, как правило, зависят от огромной океанической изменчивости. Пространственная неоднородность - от влажных западных склонов до полусушливых восточных равнин - также демонстрирует тонкое равновесие между местной топографией и глобальными силами, что приводит к развитой, но интегрированной атмосферной обстановке. Вся эта динамика должна быть понята, чтобы исследовать изменчивость волнового климата, предсказывать опасности для прибрежных районов и проводить точное моделирование ветровых волн с помощью таких методов, как SWAN. [3],[20]

1.3 Характеристика прибрежной динамики вод

Прибрежная среда, граничащая со Шри-Ланкой, представляет собой сложную и динамичную систему, на которую влияют постоянные изменения в режиме ветра, динамичное поведение волн и характер атмосферных условий. Будучи островной страной, расположенной в тропиках, ее побережье постоянно подвергается воздействию разнообразных волн, что влияет на физическую природу прибрежного региона.

Одним из основных аспектов волнового климата побережья является его сезонность, в которой доминирует юго-западный муссон. Западное побережье испытывает высокоэнергетические, длинноволновые, высокоамплитудные волны из обширного Индийского океана в период с мая

по сентябрь. Прибрежная зона, ориентированная на доминирующие юго-западные ветры, является очагом сильного волнового воздействия. Волны движутся к берегу с высокой энергией и интенсивностью, формируя береговую линию, перераспределяя осадочные породы и оказывая огромное влияние на прибрежную биоту.[6]

Исторически сложилось так, что динамические процессы в прибрежной зоне Шри-Ланки в основном определялись муссонным режимом, однако последние исследования показывают беспрецедентные изменения в сроках и интенсивности волн. Межмуссонные периоды - особенно переход от октября к ноябрю - традиционно отмечались как относительно спокойные переходные периоды. Напротив, в этот же период наблюдается впечатляющий рост интенсивности волн. В некоторых случаях такие волны достигают масштабов, сходных с теми, что наблюдаются в периоды активных муссонов, в то время как в других случаях они превышают их. Такое изменение отражает комплексное изменение волнового климата в регионе, возможно, связанное с ростом атмосферных и океанических аномалий, таких как изменение характера ветра, температуры поверхности моря или режимов давления. Растущая непредсказуемость поведения волн в эти периоды создаст новые проблемы в управлении прибрежными районами и морской деятельностью. Основной угрозой для прибрежных районов Шри-Ланки является возникновение экстремальных волн. Такие события характеризуются волнами более 2,5 метров и скоростью ветра более 12 метров в секунду - условия, которые делают волны опасными. При возникновении таких условий высвобождается высокая энергия, которая воздействует на береговую линию и часто приводит к серьезным последствиям. Повреждения прибрежной инфраструктуры могут нарушить работу портов и рыболовство, а также оказать негативное воздействие на хрупкие экосистемы из-за усиления турбулентности и эрозии береговой линии. В низменных районах или при отсутствии надлежащих защитных сооружений эти явления могут привести к затоплению побережья,

проникновению соленой воды и необратимым изменениям геоморфологии пляжей и эстуариев.[10]

Взаимосвязь между интенсивностью волн, динамикой ветра и муссонным циклом приводит к неоднородной восприимчивости прибрежных районов островов. В одних зонах наблюдаются длительные штормовые волны, а в других - внезапные и кратковременные скачки уровня воды во время штормовых явлений и колебаний климата. Все эти ситуации говорят о необходимости понимания не только нормальных условий, но и экстремальных ситуаций и отклонений, поскольку последние могут сильно повлиять на деятельность человека, инфраструктуру и прибрежную среду обитания.[13]

Прибрежная среда Шри-Ланки по своей сути управляется постоянным взаимодействием многочисленных сил, которые влияют на чувствительную и разнообразную географию. Поскольку эти силы меняются и варьируются, важно признать цикличность времен года, предвидеть вероятность экстремальных событий и приспособиться к изменчивым волнам, что в конечном итоге обеспечит выживание жителей прибрежных районов и устойчивость морской экосистемы.

1.4 Выбор оптимального района моделирования

Береговая линия Шри-Ланки превышает 1 300 километров и со всех сторон окружена Индийским океаном. Несмотря на сравнительно небольшие размеры острова, морфология побережья и восприимчивость к океаническим и атмосферным факторам значительно различаются между сегментами. Для успешного моделирования волн с помощью модели SWAN необходимо проанализировать и выделить каждый основной прибрежный сектор - северный, южный, западный и восточный (Рис. 3), чтобы определить наиболее подходящую область для полного численного моделирования.

Каждый прибрежный район Шри-Ланки демонстрирует уникальные океанографические и метеорологические особенности, обусловленные различиями в воздействии доминирующих ветров, батиметрией, шириной шельфа и влиянием муссонов. Именно совокупное влияние всего этого диктует процессы, регулирующие генерацию, передачу и потерю волновой энергии на отдельных побережьях.

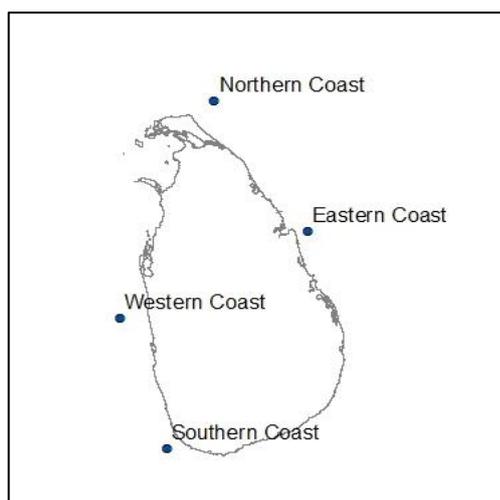


Рис. 3. Выбранные места из каждого прибрежного района для анализа данных.

Северное побережье, обращенное к Бенгальскому заливу, относительно защищенное и состоит в основном из низменных местностей и лагун. С декабря по февраль этот регион в значительной степени подвержен влиянию северо-восточного муссона, который создает умеренные волны, движимые ветром с востока и северо-востока. Континентальный шельф здесь широкий и неглубокий, что приводит к потере энергии набегающих волн до того, как они достигнут береговой линии. Тем не менее, район периодически подвергается воздействию волн и штормовых нагонов, вызванных тропическими циклонами, которые приходят из Бенгальского залива. Прибрежные формы, включая полуостров Джафна и Палк-Бей, гидродинамически сложны, поскольку имеют узкие проливы и приливные впадины.

Южное побережье - вся южная береговая линия Шри-Ланки полностью открыта для обширного Индийского океана, что приводит к высоким уровням энергии, особенно в период юго-западного муссона с мая по сентябрь. Береговая линия характеризуется узким континентальным шельфом, неровным подводным рельефом и сравнительно высокой плотностью энергии волн. Длиннопериодные волны, обычно порождаемые далекими штормами в южной части Индийского океана, обрушиваются на южное побережье в течение всего года. Ключевые географические точки, такие как Матара, Тангалле и Дондра Хед, подвержены сильному воздействию волн, что играет важную роль в процессах переноса осадочных пород, изменениях морфологии пляжа и береговой эрозии. Это побережье требует особого внимания в исследованиях по моделированию волн, поскольку оно подвержено воздействию местных ветров, постоянно создаваемых морем, и удаленных эффектов волнения.[10]

Западное побережье, простирающееся от Коломбо до Калпитии, находится под сильным влиянием юго-западного муссона. Сильные западные ветры в этот период вызывают ветровые волны местного происхождения, которые доминируют в прибрежном волновом режиме. Наличие сравнительно прямой береговой линии со слабым батиметрическим уклоном способствует созданию условий, хорошо подходящих для модификации волн и вдольберегового дрейфа. В этом районе также наблюдается интенсивное городское и промышленное развитие, поэтому правильное моделирование волн имеет решающее значение для эффективного управления прибрежными районами, борьбы с наводнениями и обеспечения безопасности портов.[12]

Восточное побережье Восточное побережье, обращенное к Бенгальскому заливу, находится под сильным влиянием северо-восточного муссона, который направляет энергию ветра и волн с северо-востока на побережье. Кроме того, во второй межмуссонный период (октябрь-ноябрь) в регионе наблюдается значительная волновая активность из-за переходных

ветров и эпизодических систем низкого давления. Восточное побережье охватывает такие районы, как Тринкомали, Баттикалоа и залив Аругам, где сочетание природных особенностей побережья и развития туризма усиливает необходимость изучения динамики волн. Континентальный шельф в этом районе имеет умеренную ширину и подвержен воздействию волн и ветров. Для того чтобы облегчить определение наиболее подходящего прибрежного района для численного моделирования волн, был проведен детальный анализ долгосрочных ветров и волн. Для анализа использовались среднемесячные зональные (U) и меридиональные (V) компоненты ветра с января 2014 года по декабрь 2023 года, представленные в хранилище климатических данных Copernicus. Сбор данных осуществлялся в четырех прибрежных точках, каждая из которых представляла отдельный сектор побережья Шри-Ланки. В MATLAB компоненты U и V были проанализированы для расчета скорости ветра путем вычисления векторной величины как функции $\sqrt{U^2+V^2}$, что позволило учесть временные изменения интенсивности ветра в разных районах. Тот же метод был применен для анализа данных о значимой высоте волны (Hsig), что позволило провести однородное сравнение взаимодействия ветра и волны. Проанализированные данные были отображены на графике, чтобы показать сезонную и межгодовую изменчивость, что дает хорошее представление о характерных ветро-волновых режимах для северного, южного, восточного и западного побережий Шри-Ланки. Результаты, представленные на рисунках 2-5, являются основой для выбора наиболее подходящего региона для численного моделирования волн.[2]

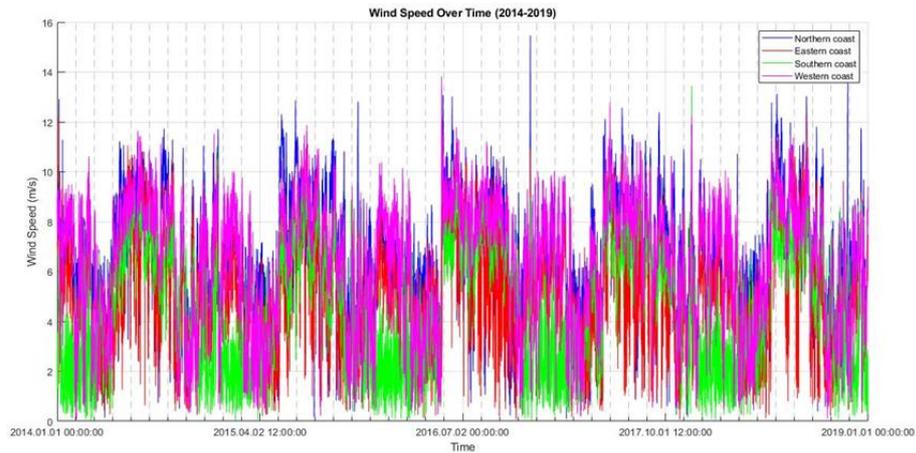


Рис. 4. Скорость ветра во всех 4 прибрежных районах в 2014-2019 годах с течением времени.

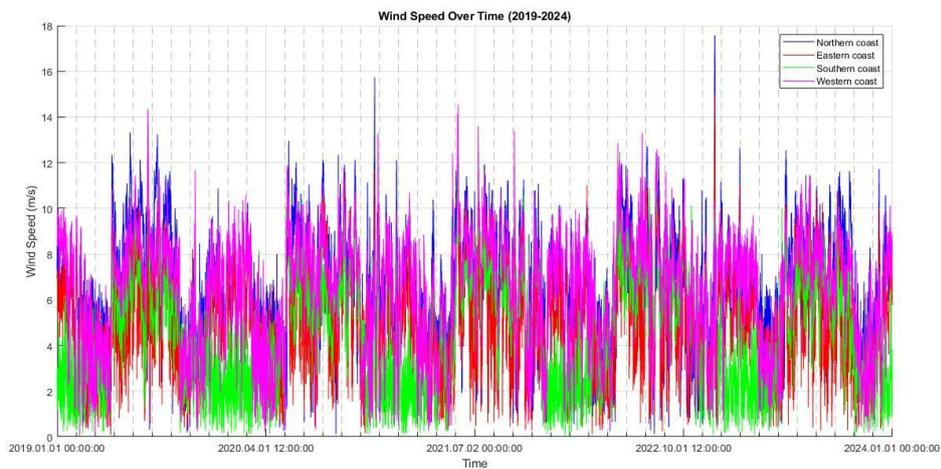


Рис. 5. Скорость ветра в 2019-2024 годах во всех 4 прибрежных районах с течением времени.

На рисунке 4 показана среднемесячная скорость ветра в каждом прибрежном регионе за десятилетний период. Синяя линия, представляющая южное побережье, всегда показывает самую высокую скорость ветра, особенно в период с мая по сентябрь, что соответствует периоду юго-западного муссона. В этот период скорость ветра часто превышает 7-9 м/с, что свидетельствует о сильном и постоянном муссонном ветре над южными прибрежными водами. Такая повсеместная ветровая энергия означает, что на южном побережье более половины года наблюдается сильный ветровой режим.

И наоборот, в период северо-восточного муссона (с декабря по февраль) скорость ветра уменьшается, но остается сравнительно более высокой, чем в других районах, что свидетельствует о подверженности южного побережья остаточным волнениям и межмуссонным колебаниям.

Западное побережье показано красной линией на рис. 4 и также демонстрирует четко выраженную муссонную тенденцию. Скорость ветра заметно возрастает в месяцы юго-западного муссона и достигает значений от 6 до 8 м/с, после чего резко снижается. Это говорит о том, что местная генерация ветровых волн особенно значительна в этот период года на данном побережье под воздействием сильных западных ветров. Западное побережье демонстрирует более выраженные сезонные колебания, чем северное или восточное.

Зеленая линия, представляющая восточное побережье, показывает два небольших пика: один приходится на второй межмуссонный сезон (октябрь-ноябрь), а второй, менее заметный, на северо-восточный муссон (декабрь-январь). Скорость ветра в этом регионе в целом меньше, чем на южном и западном побережьях, и колеблется между 4 и 6 м/с. Эта двухпиковая модель отражает переходный характер ветровых условий вдоль восточного фланга острова под влиянием циклонических возмущений и региональных изменений системы давления. Наконец, фиолетовая линия, представляющая северное побережье, демонстрирует наименьшие колебания. Скорость ветра здесь круглый год низкая, как правило, от 3,5 до 5,5 м/с, с минимальным усилением во время северо-восточного муссона. Это говорит о том, что северный район в меньшей степени подвержен прямому интенсивному воздействию ветра, возможно, из-за более защищенного рельефа и меньшего шторма.

Рисунок 5 дает качественное представление о временных тенденциях в скорости ветра путем построения среднегодовых значений для различных прибрежных районов. График подтверждает преобладание южного (синий) и

западного (красный) побережий в ветроэнергетике, с относительно высокими значениями на протяжении всех лет. На нем также обращается внимание на конкретные годы, а именно 2016, 2018 и 2022, когда скорость ветра была необычно высокой на всех участках - возможно, это отражает локальные атмосферные аномалии или усиленную муссонную активность. Северное и восточное побережья, хотя и имеют некоторую межгодовую изменчивость, демонстрируют более низкие уровни скорости ветра, что подчеркивает их сравнительно пассивный вклад в генерацию ветровых волн.

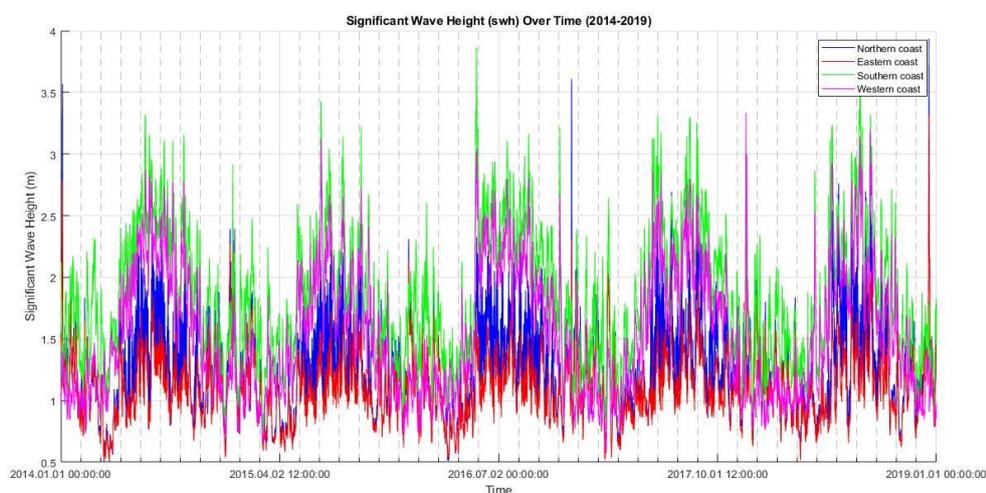


Рис. 6. Значимая высота волн ($HSig$) за период 2014-2019 гг. во всех 4 прибрежных районах

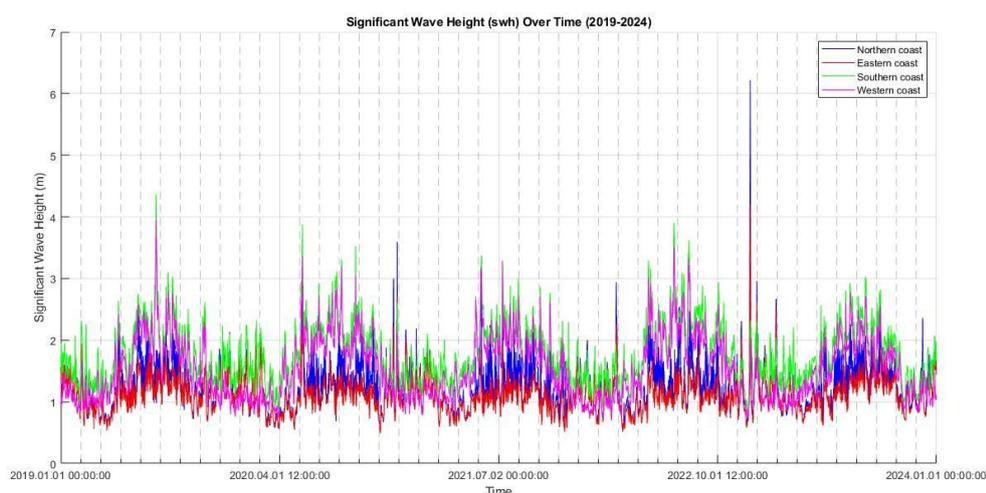


Рис. 7. Значимая высота волн ($HSig$) за период 2019-2024 гг. во всех 4 прибрежных районах

Рисунок 6 иллюстрирует ежемесячные изменения значительной высоты волн (H_{Sig}) в четырех прибрежных регионах. Как и в случае со скоростью ветра, южное побережье (синим цветом) вновь демонстрирует наибольшую энергию волн. Значения H_{Sig} постоянно превышают 2,0 м и часто варьируются от 2,5 м и выше, особенно в период с мая по июль, в период юго-западного муссона.

Это означает, что интенсивность ветра высока, и он эффективно преобразуется в энергию волн. Интенсивные батиметрические особенности и выход в открытый океан на южном побережье усиливают волновой отклик, делая его самым высоким по высоте волн.

Западное побережье (выделено красным) имеет высокий отклик волн, хотя и меньший, чем южное. Значения H_{Sig} во время муссона достигают примерно 2,0-2,3 м и резко уменьшаются в межмуссонный и северо-восточный муссонный сезоны. Такое поведение точно соответствует преобладающему режиму ветра во время муссона и позволяет предположить, что на западном побережье, как и на южном, наблюдаются сезонные высокоэнергетические волновые условия.

Восточное побережье (заштриховано зеленым) испытывает большую изменчивость H_{Sig} в годовом масштабе. Наблюдается явный пик во второй межмуссонный период (октябрь-ноябрь), когда H_{Sig} превышает 1,8 м, на что, как полагают, влияют смена ветровых режимов и периодические штормовые явления из Бенгальского залива. В январе также наблюдается небольшой пик, связанный с северо-восточным муссоном. Однако в течение большей части года высота волн в целом умеренная и составляет от 1,2 до 1,6 метра. На северном побережье (выделено фиолетовым цветом) всегда наблюдаются самые низкие показатели H_{Sig}, редко превышающие 1,5 метра. Хотя в период северо-восточного муссона наблюдается небольшое повышение, общий волновой климат на севере все же более спокойный, что объясняется его ограниченной подверженностью воздействию обширных ветровых систем и

более широким континентальным шельфом, позволяющим более эффективно рассеивать энергию волн.

Рисунок 7, представляющий среднегодовое значение H_{Sig} по регионам, подтверждает предыдущие результаты. Южное и западное побережья явно лидируют по наибольшей значительной высоте волн с устойчивым притоком энергии в течение многих лет. На графике также указаны конкретные годы, т.е. 2017 и 2021, когда на южном побережье были зарегистрированы очень высокие значения, что, возможно, связано с сильными муссонными аномалиями или дистанционно генерируемой волной из южной части Индийского океана. Напротив, северное и восточное побережья характеризуются гораздо более низкими значениями SWH, что подчеркивает их относительно защищенный и менее энергичный волновой климат.

В совокупности эти исследования представляют пространственно-временные закономерности ветровых и волновых условий вокруг Шри-Ланки. Полученные данные наглядно демонстрируют, что наибольшая энергия как с точки зрения динамики ветра, так и с точки зрения волнового отклика наблюдается в южных и западных прибрежных районах. Такие участки с хорошо развитым сезонным режимом и постоянно высокими волнами являются основными объектами для детального численного моделирования с помощью модели SWAN, особенно если целью является описание и измерение высокоэнергетических прибрежных процессов, вызванных муссонным ветром.

На основе временных и пространственных закономерностей в месячной и годовой изменчивости скорости ветра и значительной высоты волн был проведен дополнительный углубленный анализ для оценки возникновения высокоэнергетических явлений в четырех основных прибрежных регионах Шри-Ланки. С помощью MATLAB к десятилетним данным был применен алгоритм автоматического обнаружения пиков для расчета количества случаев пиковых ветровых и волновых явлений и общей

продолжительности часов со скоростью ветра более 12 м/с и значительной высотой волны более 2,5 м. Эти конкретные пороговые значения представляют собой условия сильного ветрового воздействия и динамического состояния моря, что особенно важно для выявления районов, в которых происходят экстремальные ветрово-волновые явления.

Таблица 1. Количество пиков выше 12 м/с (скорость ветра)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Северное побережье	1	4	4	5	9	8	8	4	5	3	51
Восточное побережье	1	0	0	0	1	0	1	4	2	0	9
Южное побережье	0	0	0	1	0	3	0	3	1	0	8
Западное побережье	0	0	2	2	0	4	1	7	5	0	21

Таблица 2. Количество часов, в течение которых скорость ветра превышала 12 м/с

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Северное побережье	1	7	7	6	15	17	13	7	16	3	92
Восточное побережье	1	0	0	0	1	0	1	6	6	0	15
Южное побережье	0	0	0	1	0	6	0	3	1	0	11
Западное побережье	0	0	4	2	0	5	1	12	8	0	32

Таблица 3. Количество пиков выше 2,5 м (H_{Sig})

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Северное побережье	1	0	1	4	10	0	4	3	5	1	29
Восточное побережье	1	0	0	0	1	0	1	0	2	0	5
Южное побережье	55	25	68	52	44	31	26	22	41	24	388
Западное побережье	16	10	21	17	20	10	14	10	20	7	145

Таблица 4. Количество часов волнения с высотой более 2,5м (H_{Sig})

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
Северное побережье	3	0	3	4	18	0	12	8	19	3	70
Восточное побережье	3	0	0	0	4	0	2	0	8	0	17
Южное побережье	202	99	243	207	174	114	105	87	154	71	1456
Западное побережье	54	29	58	23	82	45	51	31	72	25	470

Результаты текущего исследования представлены в таблицах 1-4, в которых дана сводная информация о частоте экстремальных ветровых и волновых явлений на северном, восточном, западном и южном побережьях. Данные однозначно свидетельствуют о четкой закономерности: количество пиков и продолжительность экстремальных явлений (измеряемая в часах превышения порогового значения) значительно выше для южных и западных прибрежных районов. Это наблюдение тесно связано с ранее зафиксированным сезонным поведением, в котором юго-западный муссон является преобладающим фактором в формировании волн и устойчивых ветровых режимов.

В таблице 1, где представлено общее количество пиков скорости ветра, превышающих 12 м/с, видно, что максимальная частота наблюдается на южном побережье, за которым следует западное побережье. Эти события в основном происходят в период с мая по сентябрь, что совпадает с пиком периода юго-западного муссона, таким образом, отражая последовательную и частую картину высокого поступления энергии ветра. С другой стороны, на восточном и северном побережьях такие пики наблюдаются гораздо реже, и лишь изредка возникают при переходных погодных условиях или кратковременных муссонных вторжениях.

Таблица 2, в которой представлено количество часов, когда скорость ветра превышала 12 м/с, также подтверждает выводы, сделанные на основе таблицы 1. Южное побережье имеет долгую историю частых сильных ветров, причем часто в течение нескольких дней подряд скорость ветра превышает критический порог. Такой долгосрочный ветровой форсинг необходим для развития длиннопериодных, высокоамплитудных волн и существенно влияет на структуру волнового климата на местном уровне. Западное побережье подвержено большому количеству часов с сильным ветром, хотя и сравнительно меньшему, чем южное, в то время как северное и восточное сравнительно спокойны.

При рассмотрении экстремальных волн в таблице 3 приведены случаи, когда значительная высота волны превышает 2,5 м. Удивительно, но преобладает южное побережье, причем неоднократные случаи приходятся на юго-западный муссон. Такие волновые события не только часты, но и, как правило, совпадают с пиками скорости ветра, что указывает на то, что участок подвержен как прямому ветровому волнению, так и волнению со стороны южной части Индийского океана. На западном побережье наблюдаются исключительные пики волн, особенно в июне и июле. Однако на восточном и северном побережьях наблюдаются лишь отдельные случаи, и в большинстве случаев высота волн намного меньше экстремальных значений.

В Таблице 4 представлены суммарные часы $HSig > 2,5$ м, что имеет особое значение для выявления регионов с устойчивой волновой энергией. Как и в случае с ветром, максимальное количество часов волновой активности наблюдается вдоль южного побережья, что свидетельствует о длительной продолжительности высокой высоты волн. Это не только подтверждает динамичность режима южного побережья, но и указывает на его возможности для более интенсивного переноса осадков, более энергичных прибрежных течений и более выраженного воздействия на

побережье во время штормов. Западное побережье, хотя и относительно менее суровое, также демонстрирует более длительные периоды высокой значительной волновой активности и тем самым подтверждает свой статус высокоэнергетической прибрежной среды.

Благодаря исчерпывающему анализу характеристик ветра и волн, наблюдавшихся в течение последнего десятилетия, включающему сезонные значения, анализ экстремальных явлений и показатели продолжительности, юго-западная прибрежная зона Шри-Ланки признана наиболее подходящим регионом для детального моделирования ветровых волн с помощью модели SWAN.

ГЛАВА 2. Исходные данные и методы исследования

2.1 Подготовка исходных данных для исследования ветрового волнения

Неотъемлемой частью моделирования динамики ветровых волн является получение и организация систематически точных метеорологических данных высокого разрешения, которые отражают диапазон пространственных и временных параметров ветрового воздействия. В качестве основной исходной метеорологии для данного исследования использовался набор данных реанализа ERA5 Европейского центра прогнозов погоды средней дальности (ECMWF), доступный через Copernicus Climate Data Store (CDS). Набор данных ERA5 представляет собой равномерный глобальный набор климатических данных высокого разрешения с параметрами ветра с разрешением около $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и почасовой периодичностью.[2]

Для целей настоящего исследования информация о среднем ветре за 2023 месяц была получена в виде файлов NetCDF (.nc) из набора данных реанализа ERA5 через Copernicus Climate Data Store. Соответствующие переменные, а именно компоненты ветра U_{10} и V_{10} , были получены с помощью MATLAB для указанного пространственного региона, ограниченного широтами от 4° до 8° северной широты и долготами от 78° до 81° восточной долготы.

Месячная скалярная скорость ветра была рассчитана с использованием меридиональной компоненты (V_{10}) и зональной компоненты (U_{10}) по формуле для расчета векторной величины (W_a):

$$W_a = \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2} \quad (1)$$

Затем эти элементы были обработаны для получения результатов измерений скорости ветра, которые затем были записаны в формате .dat с соблюдением требуемого пространственного расположения для

визуализации, опять же с помощью MATLAB. Графическое представление среднемесячных распределений скорости ветра было получено с помощью программы Surfer.

Анализ годовых данных о скорости ветра вдоль юго-западного побережья Шри-Ланки за 2023 год показывает сильную сезонность ветров, тесно связанную с южноазиатской муссонной системой. Первые три месяца года - январь, февраль и март - характеризуются относительно низкой скоростью ветра, которая колеблется между 1,6 и 2,6 м/с (рис. 8). Преобладающие в это время северо-восточные ветры приходят из внутренних районов и за счет трения замедляются в центральных нагорьях, что приводит к устойчивой и спокойной погоде на юго-западном побережье. Слабый и однородный характер поля ветра характеризуется минимальными градиентами, существующими между морскими и береговыми районами.

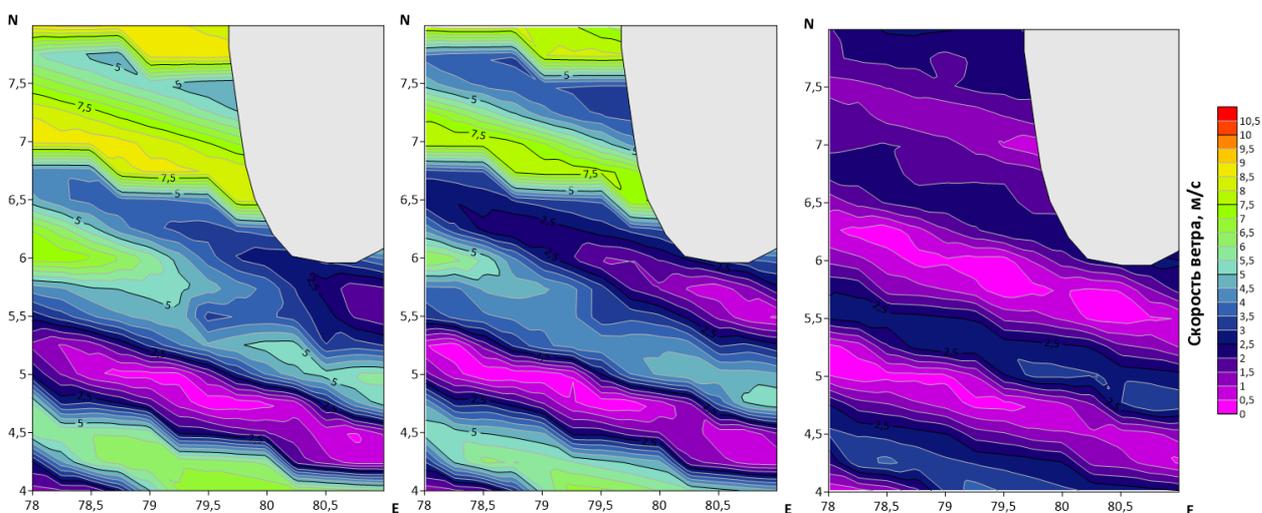


Рис. 8. Распределение скорости ветра на Юго-Западном побережье Шри-Ланки в январе, феврале, марте

В апреле (рис. 9) поле ветра становится более изменчивым, поскольку регион вступает в первый межмуссонный период. Наблюдается небольшое увеличение скорости ветра, особенно на шельфе, с максимальными значениями до 3,2 м/с, а направление ветра начинает меняться, готовясь к предстоящему юго-западному муссону. Глубокие изменения происходят в

мае и июне, которые характеризуются преобладанием юго-западных ветров и резким увеличением скорости ветра.

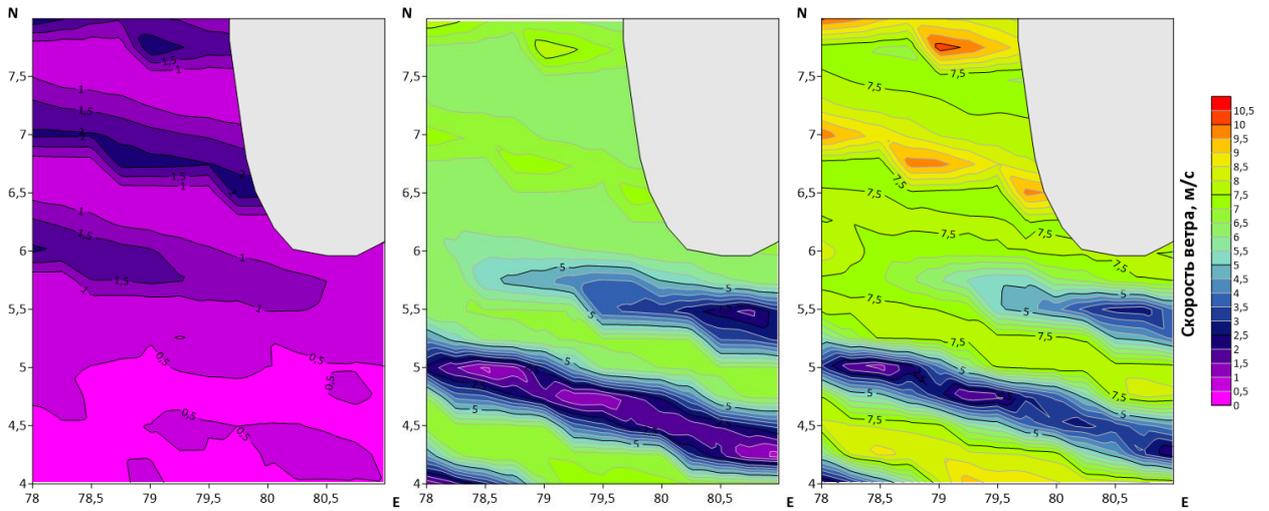


Рис. 9. Распределение скорости ветра на Юго-Западном побережье Шри-Ланки в апреле, июне, июле

Июнь отличается самой высокой интенсивностью ветра за весь годовой цикл: повсеместные значения составляют от 3,2 до 4,8 м/с, а экстремальные - от 7,5 до 9,5 м/с вблизи городских прибрежных районов, таких как Калутара и Коломбо. Эти сильные ветры отражают полное наступление муссона, что приводит к интенсивному взаимодействию океана и атмосферы в прибрежной зоне.

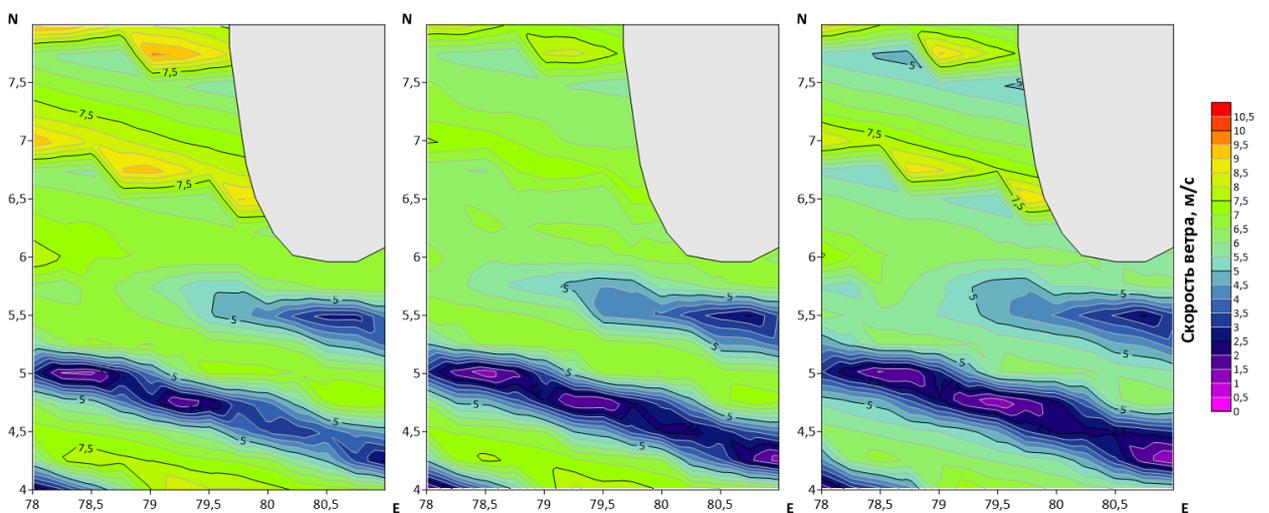


Рис. 10. Распределение скоростей на Юго-Западном побережье Шри-Ланки в июле, августе, сентябре

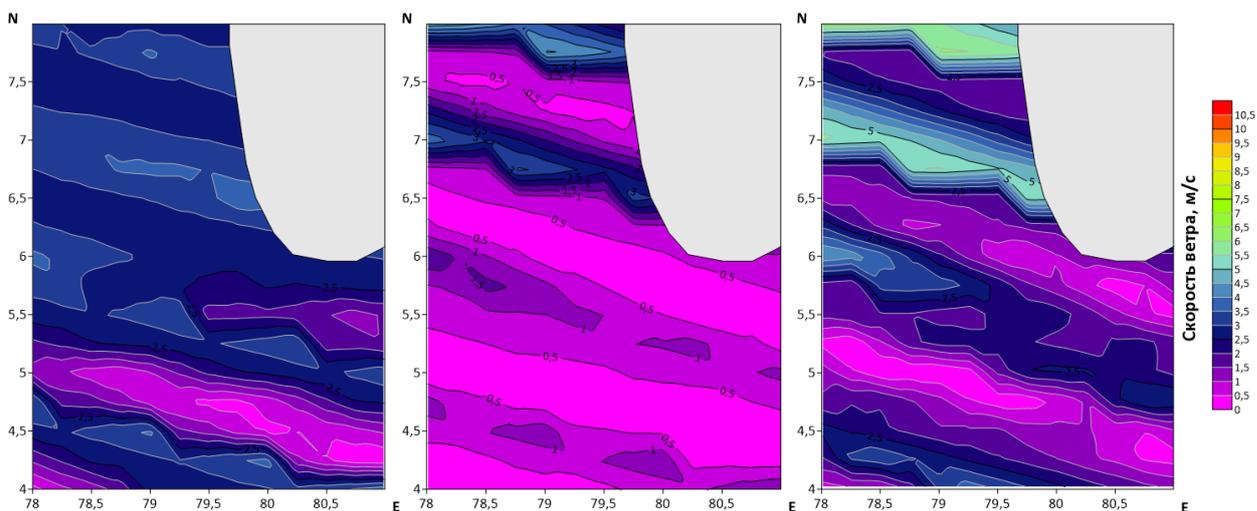


Рис. 11. Распределение скоростей на Юго-Западном побережье Шри-Ланки в октябре, ноябре, декабре

Сезон муссонов достигает своего пика в июле, августе и сентябре (рис. 10), когда дуют стабильно сильные ветры. В это время скорость ветра вдоль побережья обычно составляет от 4,8 до 6,4 м/с, тогда как в прибрежных районах она обычно превышает 7,5 м/с. Преобладающее направление ветра - юго-западное, непосредственно со стороны открытого Индийского океана к побережью. Большая протяженность и сила таких полей ветра указывают на большой поперечный градиент давления в экваториальной зоне и обуславливают высокую скорость передачи импульса на поверхность океана. Это приводит к росту длинных волн, усилению перемешивания поверхностной морской воды и усилению процессов апвеллинга вдоль побережья — процессов, тесно связанных с биологической продуктивностью и энергетическими процессами прибрежных экосистем.

Начиная с октября, как показано на рисунке 11, наблюдается резкое снижение скорости ветра. Этот месяц предвещает наступление второго периода между муссонами, во время которого наблюдается ослабление и изменчивость характера ветра. Скорость ветра колеблется между 3,2 и 4,0 м/с в октябре, затем замедляется примерно до 2,6–3,2 м/с в ноябре, а затем в декабре снижается до 1,6–2,6 м/с. Эти сравнительно спокойные погодные условия знаменуют уход юго-западного муссона и первоначальное

восстановление Северо-Восточного муссона. Кроме того, направление ветра становится более разнообразным, особенно вдоль береговой линии, в то время как направление ветра на шельфе становится более восточным или северо-восточным.

Цикл изменения скорости ветра на 2023 год иллюстрирует высокую восприимчивость юго-западного побережья к колебаниям энергии, связанным с муссонными режимами, демонстрируя сильный контраст между низким уровнем энергии как в начале, так и в конце года, по сравнению с сильным пиком энергии в период муссонов с мая по сентябрь. Представленные карты и данные свидетельствуют о том, что на юго-западном побережье от Бентоты до Матары дуют самые сильные и стойкие ветры во время юго-западного муссона. Выявленные сезонные закономерности необходимы для определения временных границ, необходимых для моделирования волн, и играют важную роль в определении входных параметров, применяемых к модели SWAN.[14]

Помимо оценки месячных скоростей ветра, необходима точная настройка параметров атмосферы для обеспечения возможности моделирования волн в зависимости от времени в модели SWAN. Поскольку SWAN моделирует эволюцию волн в соответствии с модулирующими полями ветра, необходимо обеспечить такие атмосферные данные, чтобы они должным образом отражали пространственную структуру и суточную изменчивость ветра.[16]

Чтобы предоставить необходимые исходные данные, весь набор данных повторного анализа ERA5 за 2023 год, полученный из хранилища климатических данных Copernicus, был обработан для создания отдельных файлов о ветрах, соответствующих ежедневным временным интервалам года. Набор данных содержал зональную (U_{10}) и меридиональную (V_{10}) составляющие ветра на высоте 10 метров над уровнем моря, представленные в формате NetCDF. Вышеупомянутые компоненты были тщательно отобраны

для модельной области, расположенной между широтами 4° - 8° северной широты и 78° - 81° восточной долготы, что соответствует юго-западному побережью Шри-Ланки.

Процессы форматирования и извлечения были выполнены с использованием MATLAB, что позволило точно выделить пространственное подмножество и эффективно работать с многомерным форматом NetCDF. Компоненты wind были реорганизованы на ежедневной основе в соответствии со спецификациями ввода формата, предоставленными SWAN, в файлы dat. Содержимое файла было систематизировано таким образом, чтобы охватить все соответствующие географически расположенные точки сетки, а значения U и V были соответствующим образом структурированы в соответствии с временной последовательностью, предоставленной моделью. Этот структурированный формат позволил SWAN иметь непрерывный доступ к полю ветра в течение всего времени моделирования.

Результатом этого процесса стал полный набор из 365 ежедневных входных файлов, каждый из которых представлял пространственно изменяющиеся условия ветра, относящиеся к определенному дню. Это высокое временное разрешение успешно отслеживает кратковременные атмосферные явления и позволяет модели моделировать быстрые изменения в волновом режиме, что особенно важно во времена сильного влияния муссонов или кратковременных колебаний погодных условий.

Тщательная обработка информации о ветре на таком уровне детализации имеет решающее значение для получения точных и физически реалистичных результатов при моделировании волн. Этот метод обеспечивает точное представление интенсивности и времени подачи входных данных, что создает прочную основу для численного анализа, описанного в следующих главах. С помощью этого метода модель способна точно отображать динамические волновые режимы вдоль юго-западного побережья Шри-Ланки с высоким временным и пространственным разрешением.

2.2 Модель SWAN как средство исследования ветрового волнения

Моделирование ветровых волн в прибрежной зоне требует от моделей способности разрешать широкий спектр физических процессов, которые управляют ростом, распространением и рассеиванием волн. Наиболее популярной и научно продвинутой моделью для этого является SWAN (Simulating WAVes Nearshore), разработанная в Делфтском технологическом университете. SWAN - это спектральная модель волн третьего поколения, предназначенная специально для прибрежных, шельфовых и внутренних морей. В ней представлены процессы генерации местных ветровых волн, нелинейного взаимодействия волн с волнами, образования белой полосы, разрушения, вызванного глубиной, и трения о дно, которые очень важны в прибрежных регионах, таких как юго-западное побережье Шри-Ланки.

В основе SWAN лежит уравнение баланса для волнового воздействия, которое определяет пространственное и временное развитие спектра волн. Уравнение выражается в терминах плотности волнового воздействия, а не энергии, чтобы обеспечить сохранение при изменении собственной частоты волн из-за глубины или течения. Уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2)$$

Здесь N - спектр плотности волнового воздействия, который определяется как $N = \frac{E}{\sigma}$, где E - плотность энергии волн, а σ - частота. $\frac{\partial N}{\partial t}$ - локальная скорость изменения волнового воздействия по отношению ко времени. Адвекция волновой энергии через географическое пространство задается членами $\frac{\partial(c_x N)}{\partial x}$, где c_x и c_y - групповые скорости в направлениях x (долгота) и y (широта). Следующие два члена, $\frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma}$ и $\frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta}$, учитывают изменения частоты и направления волн из-за градиентов глубины и течения, называемые доплеровским сдвигом и рефракцией. В правой части уравнения

$\frac{S_{tot}}{\sigma}$ - общий член источника, представляющий все процессы, добавляющие или извлекающие энергию из спектра волн.[16]

Член источника S_{tot} состоит из трех основных компонентов: вход энергии ветра (S_{in}), нелинейные взаимодействия волн (S_{nl}) и процессы диссипации энергии (S_{ds}). Вклад ветра представляет собой передачу энергии от поля ветра к поверхности океана и в основном является функцией скорости и направления ветра, полученной из компонентов U_{10} и V_{10} . Нелинейные взаимодействия обеспечивают перераспределение энергии в спектре волн через резонансные четырехсторонние взаимодействия для глубокой воды и триадные взаимодействия для мелкой воды. Диссипация включает в себя потерю энергии за счет белесости в глубоких областях, трения дна о дно и разрушения волн на мелководье. Такая формулировка позволяет SWAN достаточно хорошо моделировать поведение волн для широкого спектра физических условий.

Для проведения моделирования SWAN необходим набор исходных данных. Это ветровой форсинг (компоненты ветра U и V), батиметрическая (глубинная) информация, расчетная сетка, а также граничные условия или течения (по желанию). На основе этих входных данных SWAN рассчитывает ряд выходных параметров, которые определяют состояние волнового поля. Для анализа в данной работе были выбраны шесть наиболее важных выходных параметров, каждый из которых предоставляет ценную информацию о структуре и динамике прибрежных волн.

Наиболее широко используемым из них является Значимая высота волны ($HSig$ или H_s), наиболее распространенное определение энергии океанских волн. Это средняя высота верхней трети волн в спектре. В SWAN она рассчитывается по нулевому моменту спектра волновой энергии по формуле:

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3)$$

где m_0 - интеграл спектральной плотности энергии по всем частотам и направлениям. Он используется при прогнозировании волн, проектировании береговых сооружений и анализе опасностей.[16]

Второй параметр, среднее направление волн (DIR или θ), показывает среднее направление, откуда исходит энергия волн, по часовой стрелке от географического севера. Он рассчитывается из направленных моментов спектра по следующему соотношению:

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (4)$$

где a и b - интегралы косинуса и синуса направления волны и спектральной энергии. Этот параметр играет важную роль в определении взаимодействия волн с береговой линией, их влияния на перенос осадков и деятельность гавани.

Средняя длина волны (WLEN) не рассчитывается SWAN напрямую, но может быть приближенно рассчитана на основе периода волны и глубины с помощью линейного дисперсионного соотношения:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \quad (5)$$

где g - ускорение силы тяжести, T - период волны, а d - глубина воды. Длина волны важна для исследования процессов трансформации волн, таких как отмели, рефракция и дифракция, которые чрезвычайно чувствительны к изменениям глубины.

Крутизна волны (STEE) - это безразмерный параметр, который дает представление о нелинейности волны и потенциале разрушения. Это отношение значительной высоты волны к средней длине волны:

$$H_{STEE} = \frac{H_s}{L} \quad (6)$$

Большие значения крутизны волн встречаются на мелководье или вблизи крутых батиметрических склонов, где высока вероятность

разрушения волн. Этот параметр очень полезен для выделения зон рассеивания высоких энергий и эрозии берегов.

Пятый параметр, зыбь (H_{swell}), - это часть волнового поля, состоящая из длиннопериодных волн от удаленных ветровых систем. Такие волны могут перемещаться через океанские бассейны и воздействовать на побережье даже при отсутствии местного ветра. В SWAN шквал и ветровое море различаются по спектральному признаку, а высота шквала рассчитывается по той же формуле, что и значительная высота волны, но только для низкочастотного диапазона:

$$H_{swell} = 4\sqrt{m_{0swell}} \quad (7)$$

Этот параметр используется для того, чтобы различать волны местного происхождения и волны, генерируемые дистанционно, под влиянием погодных систем.

Наконец, средний период волн (T_{M01}) - это среднее время, разделяющее два последовательных гребня волн. Он находится как отношение нулевого и первого спектральных моментов:

$$T_{m_0} = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (8)$$

где m_1 - первый момент спектра волны, т.е. интеграл взвешенной по частоте энергии. Средний период волны является важным параметром для оценки энергетического содержания и стабильности волнового поля и часто применяется при проектировании гаваней и исследованиях трансформации волн.

Все шесть параметров, описанных выше, прямо или косвенно получены из входных данных, предоставленных SWAN - компонентом ветра (U и V), батиметрических полей глубин и расчетной сетки. Вместе они позволяют полностью оценить динамику прибрежных волн, как интенсивность, так и структурный характер волнового поля. В рамках данного исследования они

составляют аналитическую основу для описания формирования ветровых волн у юго-западного побережья Шри-Ланки под влиянием сезонного муссона и других атмосферных условий.[16],[17]

Каждый из этих параметров волн играет важную роль в определении и понимании сложной динамики поведения прибрежных волн.

В совокупности они представляют собой многогранное объяснение того, как энергия ветра передается на поверхность моря, как эта энергия развивается во взаимодействие волн с волнами и как волны реагируют на изменение глубины океана и формы береговой линии. Все эти явления объединены в модели SWAN в единую имитационную систему, которая воспроизводит реальные условия с очень высокой физической реалистичностью. Одним из наиболее мощных аспектов SWAN является то, что она способна моделировать весь жизненный цикл ветровых волн - от их генерации под воздействием ветра до разрушения в прибрежных водах. Модель точно воспроизводит основные физические процессы, включая нелинейные четырехсторонние взаимодействия, которые передают энергию между составляющими волны; белую кайму, которая рассеивает энергию от крутых составляющих волны; донное трение, которое уменьшает высоту волны по мере передачи энергии морскому дну; и разрушение, вызванное глубиной, которое преобладает, когда волны перемещаются на мелководье.

Эти расчеты - не просто математическая теория, они критически важны для точного прогнозирования поведения волн в изменяющихся условиях, таких как прибрежные воды Шри-Ланки. Для проведения этих расчетов SWAN опирается на метеорологические данные, такие как скорость и направление ветра. Эти данные должны быть предварительно обработаны, чтобы иметь то же пространственное разрешение, что и сетка модели, и ту же временную частоту, что и временные шаги моделирования. Поля ветра в данном исследовании были получены из данных реанализа ERA5, чтобы

получить последовательные атмосферные данные высокого разрешения за многолетний период времени.

SWAN также универсален в обработке различных входных форматов и граничных условий, и его можно легко применять с учетом региональной изменчивости доступности данных и геометрии побережья. В контексте прибрежной среды Шри-Ланки применение модели SWAN особенно полезно. Остров расположен в регионе с сильными сезонными ветрами, обусловленными юго-западными и северо-восточными муссонами, и сложной геометрией побережья, которое варьируется от открытых песчаных пляжей до скалистых обрывистых береговых линий. Все это делает поведение волн очень изменчивым как в пространстве, так и во времени.

Способность SWAN моделировать эту изменчивость помогает исследователям и лицам, принимающим решения, более четко понимать пространственно-временную эволюцию волнового климата, особенно для экстремальных волновых событий, таких как пик муссона или межмуссонные переходные месяцы.

Поскольку береговая линия Шри-Ланки становится все более уязвимой к изменению климата, повышению уровня моря и усилению штормовой активности, такие инструменты, как SWAN, становятся все более необходимыми. Моделирование волн с высоким разрешением помогает в моделировании опасности для прибрежных районов, системах раннего предупреждения, планировании инфраструктуры и устойчивом управлении прибрежными ресурсами. Оно также помогает в прогнозировании долгосрочных тенденций в волновом климате, которые могут влиять на скорость эрозии, перенос осадков и стабильность прибрежных экосистем.[8]

Благодаря интеграции точных атмосферных данных, детальной батиметрии и современных средств физического моделирования, SWAN является надежным научным инструментом для прогнозирования и анализа прибрежных ветровых волн. В настоящем исследовании он играет ключевую

роль - не только как вычислительный комплекс, но и как система, позволяющая измерять, визуализировать и интерпретировать режим прибрежных волн Шри-Ланки в условиях растущего экологического и климатического стресса.

ГЛАВА 3. Численное моделирование ветрового волнения в прибрежной зоне Шри-Ланки

3.1 Задание границ района моделирования и подготовка расчетной сетки.

Дискретизация расчетной области в сочетании со структурным дизайном предполагаемой сетки для наилучшего представления батиметрических особенностей и границ, характерных для исследуемого региона, влияет на точность и физическое моделирование ветровых волн в прибрежных районах. Настоящее исследование подразумевает тщательное определение области моделирования на основе батиметрических особенностей, прибрежных геоморфологических характеристик и местного поведения ветровых волн с особым акцентом на юго-западном побережье Шри-Ланки, которое было определено как наиболее динамичный и подходящий район исследования.

Пространственный диапазон исследования включает широты от 4° до 8° северной широты и долготы от 78° до 81° восточной долготы, охватывая важные прибрежные районы на южной и западной окраинах страны. Границы установлены как из научных соображений, так и из прагматизма. Во-первых, этот регион испытывает прямое воздействие волн открытого океана, а также юго-западных муссонных ветров, преобладающих над этой территорией. Во-вторых, он обладает разнообразными батиметрическими характеристиками, которые варьируются между мелководными прибрежными зонами и более глубокими океаническими впадинами, и важны для моделирования таких явлений трансформации волн, как отмели, рефракция и разрушение под действием глубины (Рис. 12).

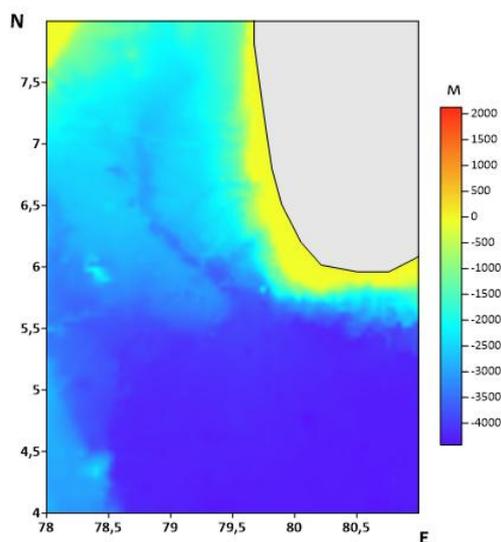


Рис. 12. Батиметрия юго-западного побережья Шри-Ланки.

Батиметрические данные, используемые для представления подводного рельефа в исследовательской среде, были собраны с помощью глобальной базы данных GEBCO, которая хорошо известна как источник надежных и высококачественных данных о глубине, пригодных для моделирования океанографии в региональном масштабе. Батиметрические данные были собраны, а затем интерполированы по сетке, причем ось X состояла из 30 сеток, а ось Y - из 45 сеток (Рис. 13)., в результате чего получилась прямоугольная решетка, равномерно распределенная в соответствии с контурами и размерами указанного прибрежного района.

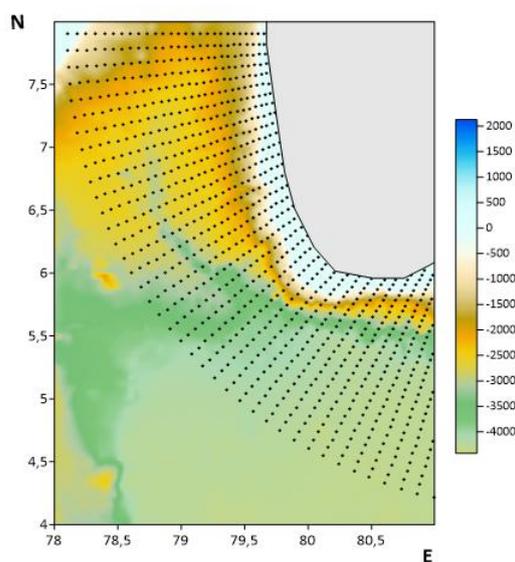


Рис.13. Сетка, сделанная для модели SWAN - Юго-Западное побережье Шри-Ланки

Затем батиметрические данные были обработаны и отформатированы с помощью специально разработанной программы Fortran, которая преобразовала необработанные данные GEBCO в форму, пригодную для моделирования. Этот процесс сыграл важную роль в создании входного файла, необходимого для модели SWAN, а также обеспечил точную визуализацию батиметрических данных на последующих этапах. Программа на языке Фортран гарантировала, что каждой ячейке в области моделирования будет присвоена правильная глубина, обеспечивая тем самым разрешение, необходимое для точного отображения градиентов склонов и особенностей морского дна, имеющих отношение к передаче волн.

Регулярная сетка и распределение батиметрических характеристик были созданы с помощью программы Surfer, которая предлагает расширенные возможности для картирования и анализа пространственных океанографических данных. На рисунке 1 показано цветовое кодирование батиметрического изображения выбранной области. На этом рисунке более темные оттенки синего и фиолетового используются для представления более глубоких частей океана (глубина более -3000 м), постепенно переходящих в более мелкие прибрежные районы, изображенные светло-голубым и желтым цветами. Серая область представляет собой границы суши, четко очерчивая береговую линию. Форма шельфа и морского выступа хорошо выражена, особенно вдоль южной границы, что подчеркивает огромный потенциал региона для богатого энергией волнового климата.

На рис. 12 показан четкий рисунок темных пятен, наложенных на батиметрический рельеф, что соответствует разрешению, используемому в расчетной сетке модели. Сетка успешно передает изменчивость глубины между абиссальной равниной и континентальным шельфом с поразительной точностью, позволяя точно моделировать поведение волн на отмелях и разрывах вдоль береговой линии. Очевидно, что на юго-западе батиметрический склон очень крутой, с очень большими перепадами глубин

на довольно коротких горизонтальных расстояниях. Поэтому для точного отображения процессов диссипации энергии в волновом поле необходимо использовать достаточно мелкую сетку.

Выбор границ модели и разрешения сетки не был произвольным; скорее, он определялся батиметрическими характеристиками региона. Приоритет в настройке сетки был отдан мелководным участкам берега, поскольку эти области подвержены сильной трансформации волн, что обеспечивает соответствующее пространственное разрешение для отражения важных физических явлений. Использование сетки 30×45 точек - это разумный компромисс между пространственным разрешением и эффективностью вычислений, позволяющий проводить всестороннее моделирование при сохранении времени моделирования в разумных пределах.

Тщательно продуманная сетка и настройки домена создают необходимый фон для корректного моделирования реалистичного поведения волн вдоль побережья юго-западной части Шри-Ланки. Они включают в себя сложные колебания глубины, связанные с явлениями трансформации волн, а также расположение областей, демонстрирующих максимальную интенсивность волн. Таким образом, повышается научная точность и полезность моделирования волн вдоль побережья, реализованного в модели SWAN.

3.2 Анализ результатов моделирования ветрового волнения в прибрежной зоне Шри-Ланки

После завершения численного моделирования с использованием модели SWAN для 2023 года был проведен комплексный анализ результатов моделирования для оценки пространственных и временных вариаций

поведения ветровых волн вдоль юго-западного побережья Шри-Ланки. Модель выдала шесть ключевых параметров: значительная высота волны (HSig), среднее направление волны (Dir), высота волны зыби (HSwell), крутизна волны (STEE), средний период волны (TM01) и средняя длина волны (WLEN), рассчитанные с интервалом в 3 часа для каждого дня в году. Эти результаты, основанные на вводе U и V компонентов ветра, батиметрии и данных сетки, сформировали подробный набор данных, подходящий для анализа прибрежной зоны с высоким разрешением.

Для эффективной консолидации данных был выбран один репрезентативный временной снимок для каждого параметра. Эти репрезентативные снимки были определены как визуальным, так и статистическим анализом результатов комплексной системы, и считалось, что они наилучшим образом представляют пространственную картину и сезонное поведение каждого параметра. Были выбраны следующие моментальные снимки: 01.01.2023 00:00 для HSig, 02.03.2023 00:00 для Dir, 01.03.2023 06:00 для HSwell, 01.10.2023 12:00 для STEE, 10.08.2023 06:00 для TM01 и 01.12.2023 09:00 для WLEN.

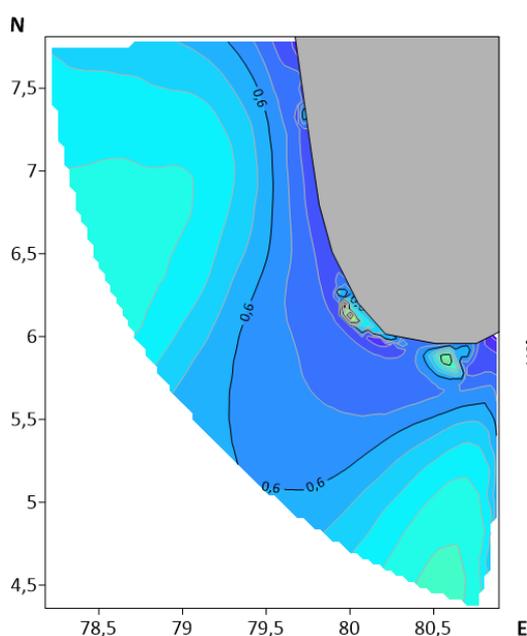


Рис. 14. Значимая высота волны (HSig) - 01.01.2023 00:00

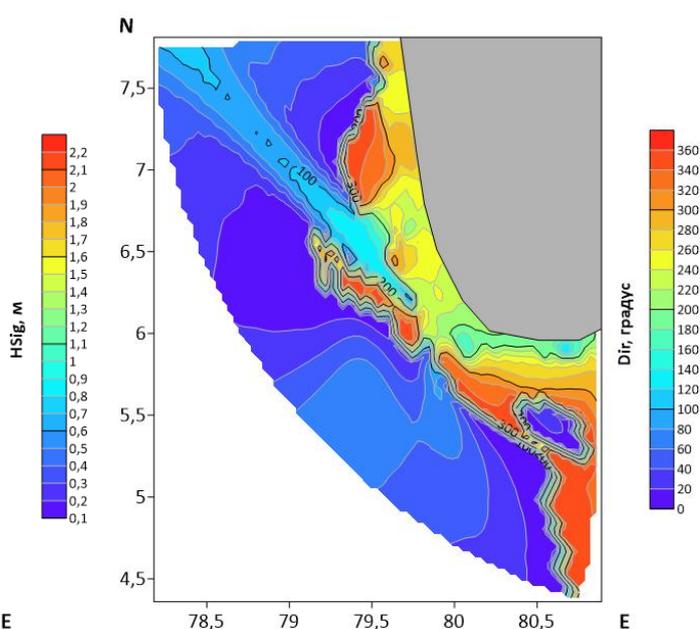


Рис. 15. Среднее направление волны (Dir) - 02.03.2023 00:00

Анализ значимой высоты волн 01.01.2023 в 00:00 (Рис. 14). выявил умеренную или высокую волновую активность вдоль южного побережья, где значения колебались от 2,0 до 2,4 метров, постепенно уменьшаясь к западу. Вдоль западного побережья, особенно между Коломбо и Калутарой, H_{Sig} оставался в диапазоне от 1,5 до 2,0 метров, что указывает на продолжающееся воздействие волновой энергии, хотя и несколько сниженное по сравнению с южной границей. Эта картина подтверждает наблюдаемое преобладание южного воздействия волн открытого океана и сезонного ветрового воздействия.

Среднее направление волн, наблюдавшееся 02.03.2023 в 00:00, показало (Рис. 15), что волны вдоль как южного, так и западного побережья преимущественно приближаются к юго-западному квадранту с углами направления от 220° до 250°. Такое распределение отражает типичное влияние юго-западного муссона, который регулирует большую часть направления распространения волновой энергии в середине года и в переходные периоды.

Необычная аномалия наблюдалась на карте высот волн зыби по состоянию на 01.03.2023 в 06:00. (Рис. 16). В отличие от ожидаемых закономерностей, связанных с воздействием открытого океана, наибольшие значения шквала наблюдались в западных прибрежных водах, а в некоторых оффшорных точках значения превышали 5,0 м. Это наблюдение отражает сильное проникновение длиннопериодных систем шквала на западный шельф, скорее всего, вызванное удаленной метеорологической активностью в южной части Индийского океана. Южное побережье, хотя и остается открытым, имеет сравнительно низкие значения высота волны зыби (H_{Swell}) между 1,8 и 2,2 м, что отражает низкий вклад шквала, возможно, из-за ориентации или батиметрической защиты.

Карта крутизны волн от 01.10.2023 в 12:00 (Рис. 17). подтвердила это наблюдение динамического поведения вдоль южного берега со значениями

крутизны от 0,06 до 0,08. Эти повышенные значения свидетельствуют о разрушении волн и усиленной диссипации энергии в зоне прибоя. На западном побережье, напротив, наблюдалось умеренное снижение крутизны, обычно от 0,04 до 0,05, что отражает то же волновое поле с меньшей волнобойной активностью под влиянием более широкой геометрии шельфа и более пологих батиметрических переходов.

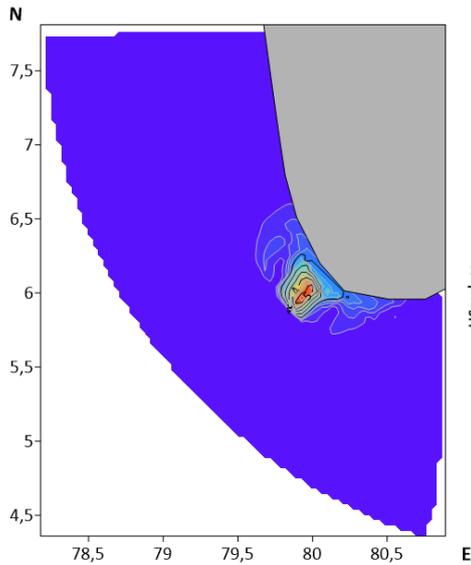


Рис. 16. Высота волны зыби (HSwel)
- 01.03.2023 06:00.

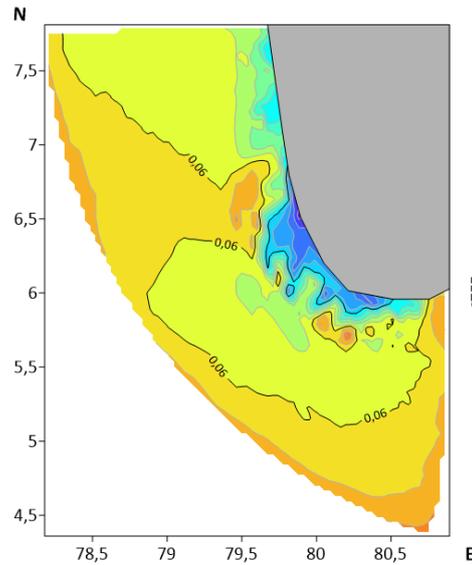


Рис. 17. Крутизна (STEE)
- 01.10.2023 12:00

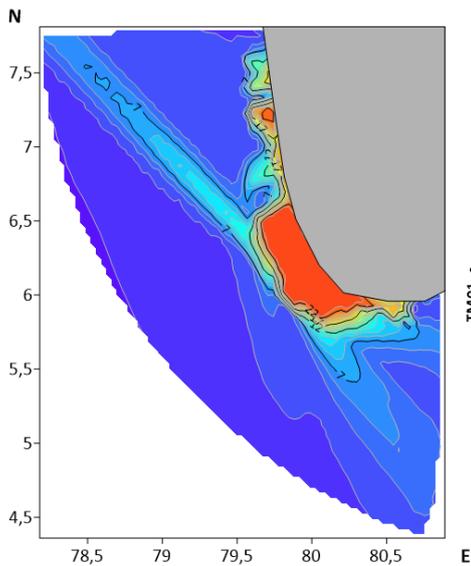


Рис. 18. Средний период волны
(TM01) - 10.08.2023 06.00

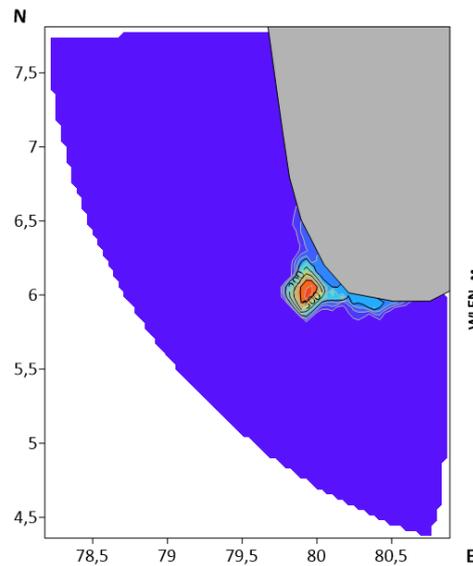


Рис. 19. Средняя длина волны
(WLEN) 01.12.2023 09.00

Средний период волн (TM01), зарегистрированный 10.08.2023 в 06:00(Рис. 18)., показал исключительно высокие значения в западных прибрежных водах, где периоды достигали 23-24 секунд в некоторых прибрежных точках. Напротив, у южного побережья периоды волн были несколько короче - от 18 до 19 секунд. Эти более длительные периоды у западного побережья свидетельствуют о наличии глубоководных волн с высоким содержанием энергии и низкой скоростью диссипации, что согласуется с предыдущими наблюдениями высота волны зыби (HSwell).

Анализ средней длины волны (WLEN) на 01.12.2023 09:00 (Рис. 19), подтверждает аналогичную картину. Более длинные волны от 200 до 300 метров наблюдались в основном над северо-западной шельфовой зоной, что представляет собой передачу длиннопериодных волн над более глубокими морскими водами в направлении западного шельфа. В противоположность этому, в южных водах вдоль побережья наблюдались волны длиной от 100 до 150 метров, которые, хотя и были значительными, но сравнительно меньшими из-за местных батиметрических особенностей и ограничений в периоде волн.

После тщательного анализа всех имеющихся карт и ежедневных выходных данных в качестве ключевых энергетических точек были выделены два места: одно вдоль западного, а другое - вдоль южного побережья. Выбор этих мест обусловлен стабильно высокими значениями почти всех шести исследуемых параметров в течение всего года. Западный участок демонстрировал максимальные или близкие к максимальным показания HSwell, TM01 и WLEN, особенно в середине муссона и в переходные периоды; южный участок, напротив, превосходил по HSig, STEE и равномерности направления волн. Эти два места вдоль побережья являются основными кандидатами для долгосрочных программ мониторинга и в качестве эталонов для производительности будущих моделей и волновой механики вдоль побережья. Разнообразные волновые условия в этих местах делают их особенно подходящими в качестве исходных данных для

сценарных исследований воздействия, особенно изменчивости климата, экстремальных волновых условий и целей планирования инфраструктуры.

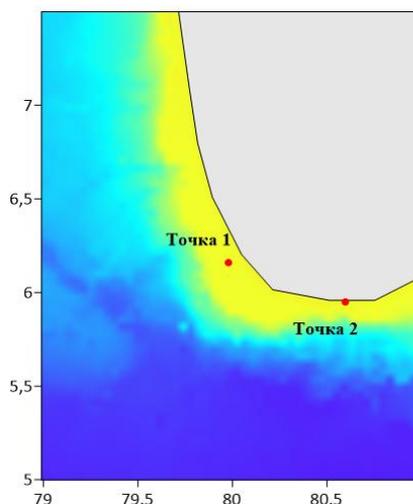


Рис.20. Выбраны 2 точки для анализа

Чтобы облегчить понимание пространственно-временного поведения, связанного с волновыми параметрами смоделированных волн, пространственно-временной анализ был проведен очень тщательно в двух специально выбранных точках, а именно в Точке 1 на западном побережье Шри-Ланки и в Точке 2 на южном побережье Шри-Ланки (Рис. 20).. Эти точки были выбраны потому, что предварительный пространственный анализ показал, что в этих точках постоянно наблюдаются более высокие значения параметров волн, и поэтому они оказались очень подходящими для изучения закономерностей круглогодичного поведения волн при меняющихся сезонных и атмосферных условиях.

В точке 1, расположенной вдоль западного побережья, среднее направление волн (Dir) (Рис. 21). было очень стабильным на протяжении большей части года, колеблясь между 210° и 230° . Это наблюдение подтверждает преобладание волновой активности между юго-западным и западно-юго-западным направлениями. Доминирующая картина соответствует основному влиянию юго-западного муссона, а также переходных ветров от муссона к муссону. В марте был один случай значительного отклонения, когда направление волн изменилось на 300° , то

есть волны приходили в регион с северо-запада - скорее всего, это было вызвано временными погодными возмущениями или циклонической активностью, влияющей на более крупный регион Индийского океана. Преходящее изменение направления волн типично для постоянного волнового режима и отмечает март как месяц со значительной изменчивостью направления.

В точке 1 средняя значимая высота волн (Рис. 22). демонстрировала заметные уровни и согласованность на протяжении большей части года. С апреля по декабрь H_{Sig} была довольно стабильной и составляла около 2,55 м, отражая устойчивые и активные условия волнового климата. Пиковые значения в начале года в январе и феврале, когда высота волн выросла до 3,3 м, соответствовали максимальным измерениям, наблюдавшимся в течение года. Этот рост был связан с повышенной активностью волн, возможно, вызванной штормовыми системами или сложным распространением волн из южной части Индийского океана. Переходы между такими пиками в начале года и последующими периодами стабильных волновых условий отражают изменение динамики между более изменчивыми, возможно, подверженными штормовому влиянию морями и устойчивыми режимами, подпитываемыми в основном энергией шторма.

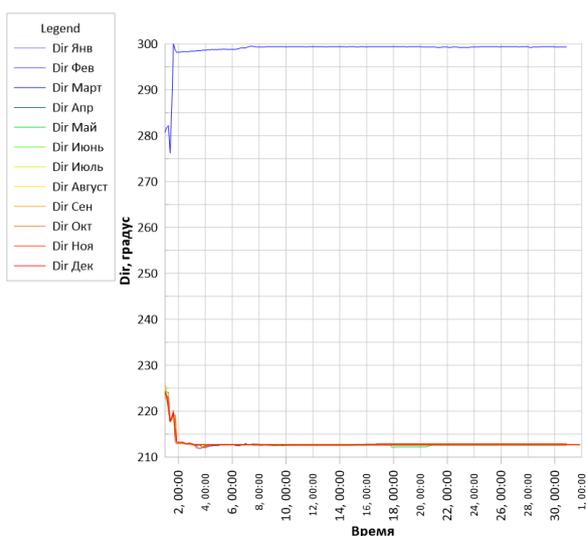


Рис.21. Среднее направление волны (Dir) в течение года

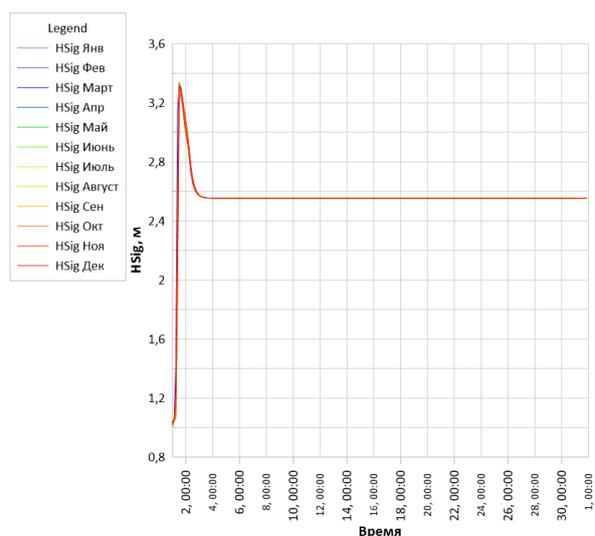


Рис.22. Значимая высота волн (H_{Sig}) в течение всего года

В этом месте особенно ярко проявились особенности высоты волны зыби (H_{Swell}). H_{Swell} была (Рис. 23). очень стабильной в течение года, со средним значением 2,54 м и небольшими колебаниями в месяц, как и наблюдалось. Такая типичность отражает беспрепятственное влияние глубоководных океанических волн на западную береговую линию, где местный волновой климат регулируется в основном полем волн. Энергия и устойчивость этого долгопериодного волнения подчеркивают восприимчивость региона к далеко расположенным системам генерации волн и предлагают рассмотреть западную береговую линию как подходящую для крупномасштабных исследований энергии волнения или жизнеспособных приложений для преобразования энергии волн.

В отличие от H_{Sig} и H_{Swell}, крутизна волн (STEE) (Рис. 24). имела большую ежемесячную изменчивость, особенно в первые месяцы года. В январе и феврале крутизна была максимальной и составляла 0,038, что отражает более крутые и энергичные формы волн, что совпадает с очень высокими значениями H_{Sig}, наблюдавшимися в этот период. Начиная с апреля, крутизна постепенно уменьшалась и установилась на уровне 0,0304, что свидетельствует о более вытянутых, более пологих морских условиях, в которых доминируют штормовые волны. Эта картина показывает, как преобладание штормов приводит к уменьшению крутизны волн, даже когда высота волн остается значительной.

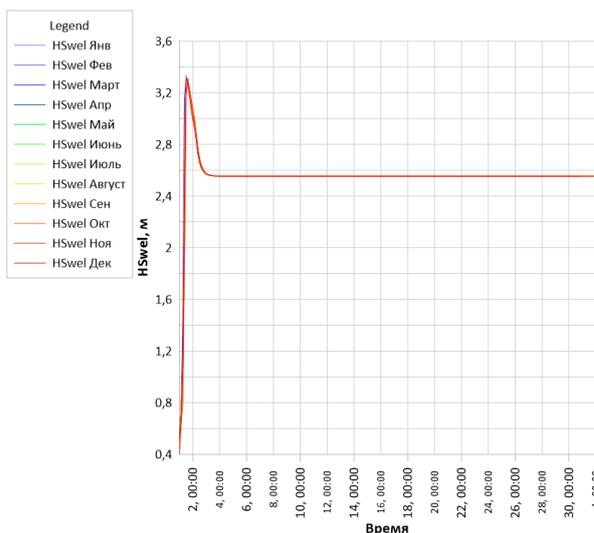


Рис.23. Высота волны зыби (Swell) в течение года

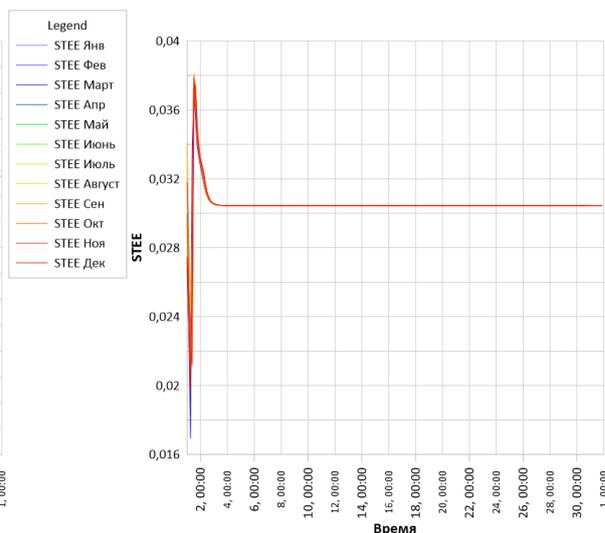


Рис. 24. Крутизна волны (STEE) в течение всего года

Средний период волн в точке 1 (ТМ01) (Рис. 25), имел стабильно высокие значения, составляя около 24 секунд на протяжении большей части года. Длительный период волн отражает присутствие высокочрезурелых волн, на которые практически не влияет местное взаимодействие ветра и моря. Значительные спады ТМ01, наблюдавшиеся в марте и июле, приходились на промежутки между 22 и 23 секундами, что, возможно, было связано с преходящими ветровыми эффектами или изменениями направления волн. В целом, стабильность ТМ01 отражает восприимчивость западного побережья к установившейся волновой энергии, определяемой длительными периодами.

Аналогичная и совпадающая картина наблюдалась и в средней длине волны (WLEN) (Рис. 26). На протяжении большей части года длина волн колебалась в пределах от 40 до 120 метров, следуя закономерности измерения высоты и периода волн. Однако март стал исключительным событием, когда длина волны резко увеличилась до 300 метров, что почти в три раза превышает обычные показатели. Необычно большая длина волны соответствовала аномалии направленности, измеренной в марте, что указывало на уникальный, но замечательный случай дальнего волнового

потенциала. Без этого события западная точка имела нормальную длину волны около 100 метров в течение всего года.

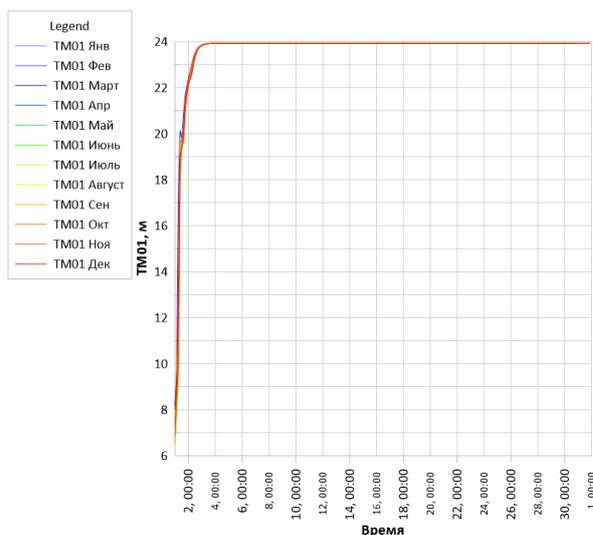


Рис. 25. Средний период колебаний (TM01) в течение года

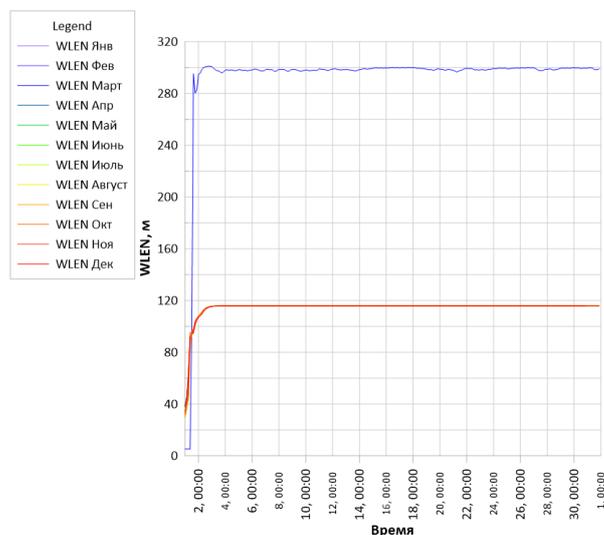


Рис.26. Средняя длина волны (WLEN) в течение всего года

Для сравнения, исследования вдоль южного побережья в точке 2 выявили более выраженную сезонную изменчивость всех измеренных параметров. Среднее направление волн (Dir) (Рис. 27), в этом месте имело резкую изменчивость в течение года. В период с января по март волновая активность проявлялась в основном в юго-юго-восточном направлении со средними углами между 165° и 180° , что соответствует волнам, возникающим в южной части Индийского океана. Начиная с апреля, направление волн стало постепенно меняться, переходя в диапазон от 190° до 200° . В сезон юго-западного муссона (с мая по сентябрь) направление волн резко менялось в сторону юго-запада, достигая 240° в июле, что совпадает с пиком муссонного сезона. В течение года направление волн снова стало смещаться к югу и в конце концов установилось между 170° и 185° в ноябре и декабре. В итоге среднегодовое направление волн составило около 195° , причем в июле наблюдалось наибольшее изменение направления, а в январе - наименьшее.

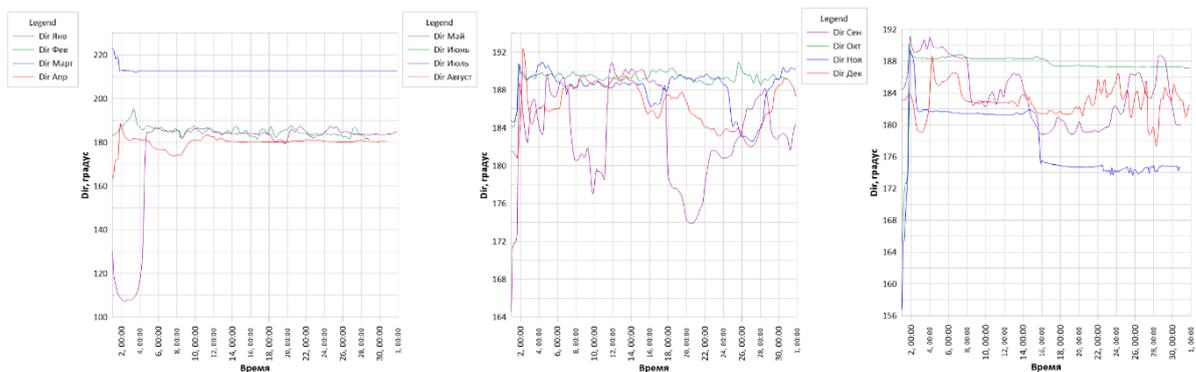


Рис.27. Среднее направление волны (Dir) в течение года

Значимая высота волн (Рис. 28), в точке 2 имела четкий сезонный волновой климат. Первая четверть года, с января по март, характеризовалась в целом спокойными условиями, со средними значениями HСig между 0,6 и 0,7 м, а минимумы иногда достигали 0,6 м. С наступлением апреля высота волн заметно увеличилась, достигнув в мае и июне значений от 0,75 до 0,85 м, а кульминация пришлась на июль, когда среднемесячные значения приблизились к 0,7 м, а дневные максимумы превышали 3,5 м. Пик явления был обусловлен сильными юго-западными ветрами, характерными для муссонной интенсивности вдоль южного побережья. Начиная с октября, значения HСig регулярно снижались, а декабрь вновь стал годовым минимумом. Средняя высота волн за год составила около 0,6 м, что отражает равновесие между сравнительно спокойными межмуссонными сезонами и более мощными муссонными условиями.

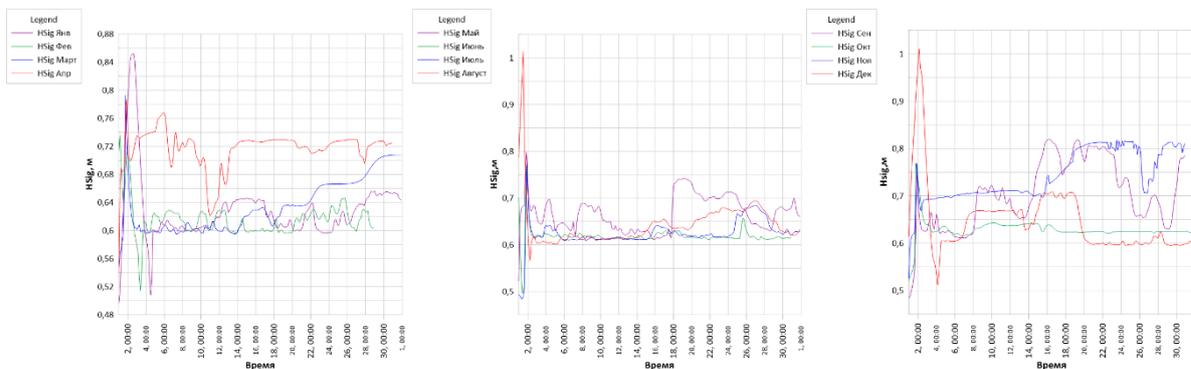


Рис.28. Значимая высота волн (HSig) в течение всего года

Высота волны зыби (H_{Swell}) (Рис. 29), в точке 2 демонстрировала аналогичную сезонную тенденцию. С января по март высота волны была относительно низкой, от 0,5 до 0,6 м, но в апреле она увеличилась и достигла максимума в период с мая по август. В июле значения H_{Swell} выросли до 0,8 м, а среднемесячные значения превысили 0,5 м, что свидетельствует о преобладании сильной волнённости в период муссонов. Ощутимое снижение активности волн наблюдалось к октябрю, когда она снизилась до 0,45 м, а к декабрю упала примерно до 0,1 м. Среднегодовое значение H_{Swell} в точке 2 составило около 0,6 метра.

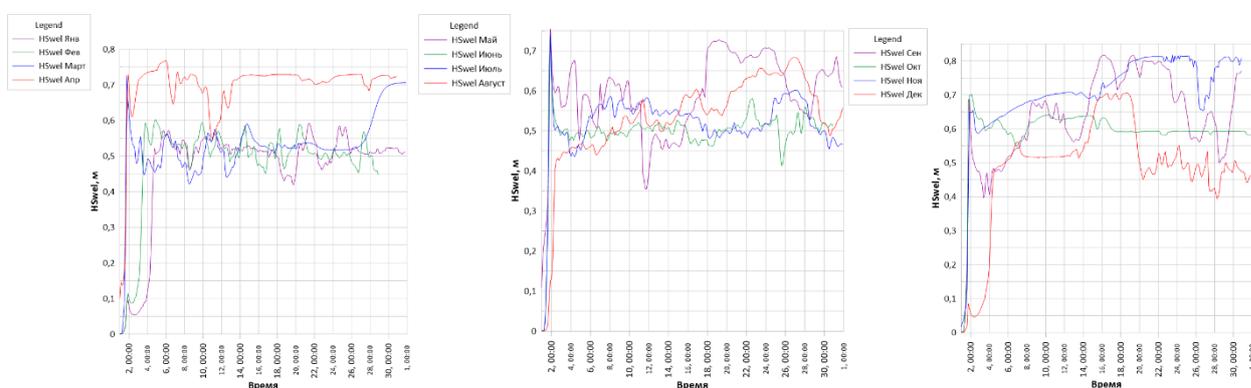


Рис.29. Высота волны зыби (Swell) в течение всего года

Крутизна волн (Рис. 30), на этом участке демонстрировала значительные месячные колебания, особенно увеличиваясь в муссонные месяцы. С января по март значения крутизны колебались между 0,025 и 0,035, представляя собой более спокойное состояние моря. В мае и июне крутизна резко возрастала, составляя в среднем около 0,055 и достигая пика более 0,06 в июле, что свидетельствует о динамичном волновом воздействии, вызванном ветром, и вероятном наличии волноломов в прибрежной зоне. После сезона муссонов крутизна уменьшилась до менее 0,04 к ноябрю, а среднегодовая крутизна составила около 0,042, причем самые крутые волны наблюдались в июле, а наименее крутые - в феврале и декабре.

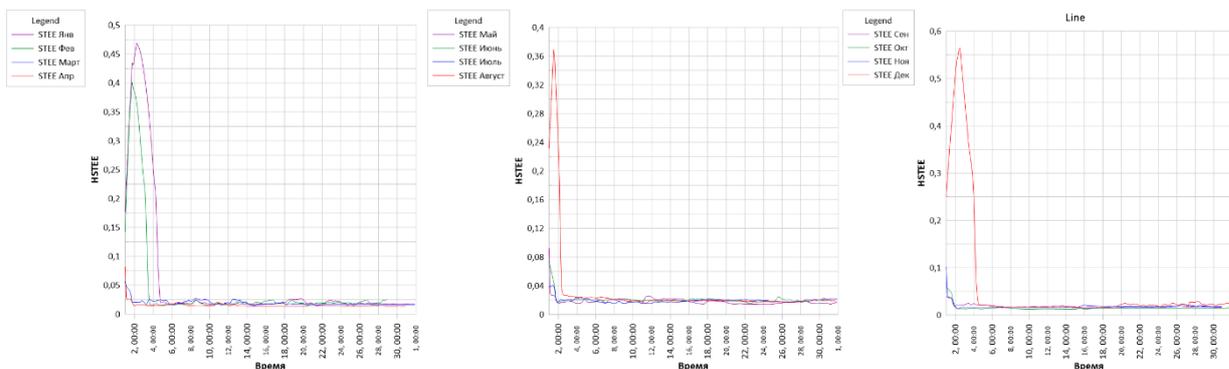


Рис.30. Крутизна волны (STEE) в течение всего года

В точке 2 средний период волн (TM01) (Рис. 31), в начале года имел сравнительно короткие интервалы между 8 и 10 секундами, что отражает локальную волновую активность. К апрелю продолжительность периода волн увеличилась до 20 секунды, и эта тенденция сохранялась в течение всего муссонного сезона, достигая максимальных значений в июле и августе с периодами волн от 20 до 24 секунд. С сентября период волн начал уменьшаться и к концу года установился в пределах 10-8,0 секунд. Среднегодовое значение TM01 в этом пункте наблюдений составило почти 12 секунды. И, наконец, средняя длина волны (WLEN) в точности повторяла тенденции периода волн. С января по март WLEN (Рис. 32). оставалась короткой, от 30 до 42 метров, увеличивалась с апреля по июнь и достигла максимума в июле - ~70 метров. Длина оставалась умеренно высокой в августе и сентябре, затем снизилась до 35-45 метров к декабрю. Среднегодовая длина волны составила около 55 метров, что свидетельствует о явной изменчивости, обусловленной муссонами. В целом, эти оценки показывают, что точка 1 (западное побережье) находится под влиянием устойчивых длиннопериодных волновых моделей с незначительной сезонной изменчивостью, в то время как точка 2 (южное побережье) испытывает резкие изменения волновых моделей под влиянием муссонов. Это различие подчеркивает пространственную неоднородность волнового климата даже в сравнительно небольших географических масштабах и, следовательно,

необходимость проведения исследований местного масштаба в контексте применения моделирования волн вдоль побережья.

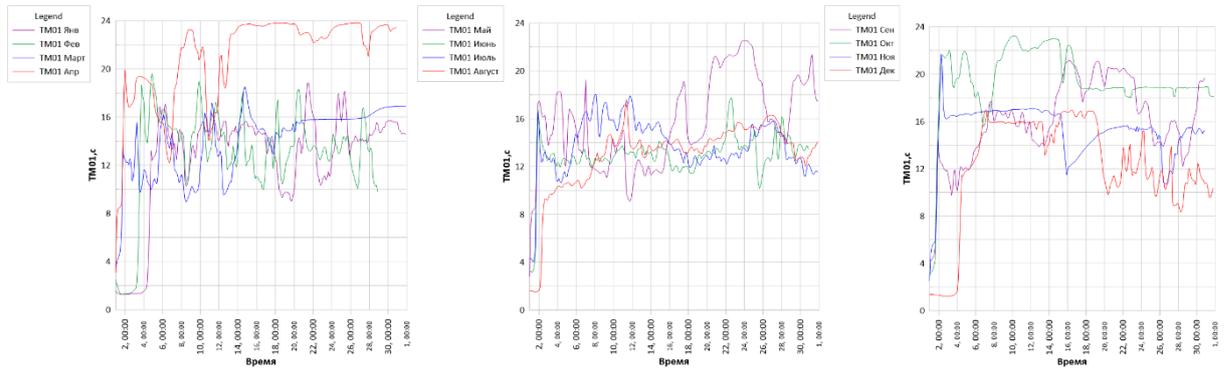


Рис. 31. Средний период колебаний (TM01) в течение года

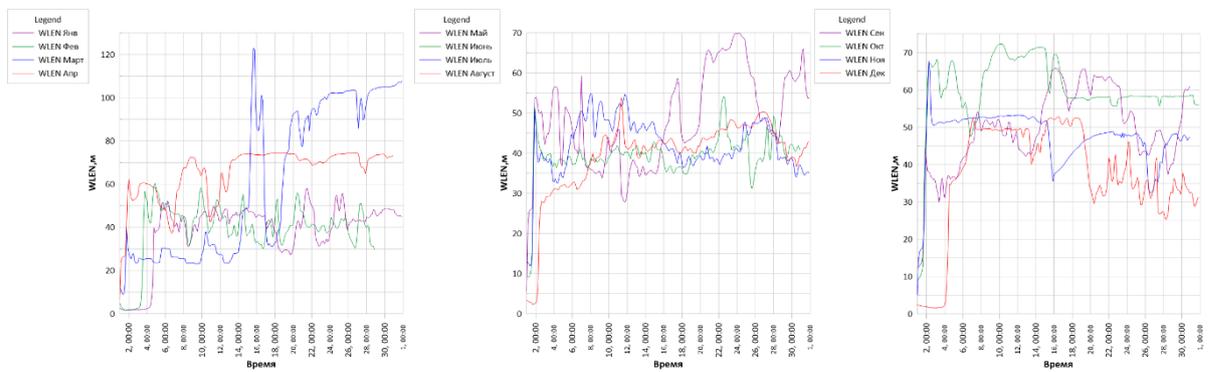


Рис. 32. Средняя длина волны (WLEN) в течение года

Заключение

Результаты, полученные в ходе численного моделирования по модели SWAN в 2023 году, позволили получить ценную информацию о пространственной и временной изменчивости параметров ветровых волн вдоль южного и западного побережья Шри-Ланки. Объединив поля ветра высокого разрешения ERA5 с батиметрическими данными, модель позволила рассчитать и тщательно проанализировать шесть ключевых характеристик волн в течение трехчасовых интервалов, а именно: значимую высоту волны, среднее направление волны, высоту волны шквала, крутизну волны, средний период волны и длину волны.

На западном побережье, особенно в районе пункта 1, в течение всего года наблюдались очень схожие волновые условия, которые в основном контролировались длиннопериодными волнами открытого океана. Такие параметры, как средний период волн (TM01) и длина волны (WLEN), равномерно отражали высокие уровни, достигая пиков в 24 секунды и 300 метров, соответственно. Значимая высота волны (HSig) и Высота волны зыби (HSwell) также мало изменчивы, что говорит о постоянном волновом режиме, в котором доминируют волнения. Отсутствие сезонной изменчивости в сочетании с большими расстояниями распространения волн от удаленных источников делает западное побережье очень уязвимым к воздействию далеких штормовых волн, которые могут влиять на территорию даже в отсутствие местной метеорологической активности.

Напротив, южное побережье, как определено в пункте 2, демонстрирует повышенную сезонную изменчивость, на которую сильно влияет юго-западный муссон. В период с мая по сентябрь наблюдалось значительное увеличение высоты, крутизны и направленности волн, причем в июле высота волн превышала 3,5 метра, а крутизна - 0,06. Это вызвано прямым воздействием муссонного ветра в сочетании с локальными волновыми условиями, а также дополнительным влиянием проходящей

волны. Следствием этого является создание динамичного и более энергичного состояния прибрежной зоны вдоль южного побережья в муссонные месяцы, что приводит к увеличению угрозы береговой эрозии, переноса осадков и структурной нагрузки от волнового воздействия.

Сочетание пространственного анализа и точечного анализа временных рядов позволило определить ключевые области концентрации энергии волн, а также межгодовую изменчивость, необходимую для управления прибрежными опасностями. Характеристика западного побережья как неизменно круглогодично движимого волнами, и признание южного побережья как одного из сезонных максимумов энергии, имеет значительные последствия для применения в береговом строительстве, управлении чрезвычайными ситуациями, безопасности портов и системах раннего предупреждения.

Понимание этих закономерностей особенно важно в контексте изменчивости климата и прогнозируемого повышения уровня моря, что приведет к увеличению частоты и интенсивности экстремальных волн. Выявление временных и пространственных закономерностей, в которых энергия волн является наиболее концентрированной, позволит планировщикам и политикам лучше определить приоритеты в строительстве адаптивной инфраструктуры, укрепить береговую оборону и создать кодексы зонирования, направленные на снижение подверженности угрозам, связанным с волнами. Результаты этой инициативы по моделированию также могут быть использованы для совершенствования систем раннего оповещения и методов прогнозирования волн, способствующих снижению потерь во время штормовых нагонов и периодов высокого уровня моря.

Одним словом, выводы, сделанные в этой главе, ценны для улучшения научного понимания поведения волн на юго-западном побережье Шри-Ланки, а также для разработки эффективных стратегий управления прибрежной зоной и смягчения последствий. Сравнение стабильного режима волнения в западном секторе и крайне изменчивых муссонных влияний в

южном секторе подчеркивает необходимость разработки региональной политики управления побережьем, направленной на устойчивую защиту и улучшение уязвимой береговой линии Шри-Ланки.

Список литературы

1. Annamalai H., Hamilton K., Sperber K.R., The South Asian summer monsoon and its relationship with ENSO in the IPCC AR4 simulations, *Journal of Climate*, Volume 17, Issue 15, 2004, 3037–3059. https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/17/15/1520-0442_2004_017_3037_iotioo_2.0.co_2.xml - retrieved: 12.07.2024.
2. Copernicus Climate Data Store (CDS), ERA5 monthly means on single levels, <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download> - retrieved: 20.07.2024.
3. De Vos L., Rixen M., Pottiaux E., Application of high-resolution wind fields for oceanographic studies in the northern Indian Ocean, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Volume 42, Issues 1–4, 2006, 122–142. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2006.01.003> - retrieved: 25.04.2025.
4. Department of Meteorology, Sri Lanka, Climate data - historical, <https://www.meteo.gov.lk> - retrieved: 15.06.2024.
5. Fernando A., Influence of wind and rainfall variability on oceanographic conditions around Sri Lanka, KDU Undergraduate Research Symposium Proceedings, 2021. <http://ir.kdu.ac.lk/bitstream/handle/345/3255/pdfresizer.com-pdf-split%20%2813%29.pdf?isAllowed=y&sequence=1> - retrieved: 18.07.2024.
6. General Sir John Kotelawala Defence University, Coastal dynamics and wave modeling, KDU Repository - retrieved: 10.07.2024.
7. Han W., McCreary J.P., Kohler K.E., Influence of precipitation minus evaporation and Bay of Bengal rivers on dynamics, thermodynamics, and mixed-layer physics in the upper Indian Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Volume 36, Issue 8, 2006, 1241–1266. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/36/8/jpo2926.1.xml> - retrieved: 04.07.2024.

8. Howard M.K., A global operational wave model, NOAA/NCEP/MMAB Technical Note 270, 2008. https://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn270/Howard_08.pdf - retrieved: 14.07.2024.
9. India Meteorological Department, Chapter 7: Monsoon circulation, IMD Mausam - retrieved: 12.07.2024.
10. Japan International Cooperation Agency (JICA), Coastal dynamics and climate change in Sri Lanka, Open JICA Report - retrieved: 18.07.2024.
11. Joseph S., Subeesh M.V., Dinesh Kumar P.K., Observed interannual variability of upwelling along the southwest coast of India, Water, Volume 11, Issue 10, 2019, 2044. <https://doi.org/10.3390/w11102044> - retrieved: 08.07.2024.
12. JSTOR, Climate variability in Sri Lanka. <https://www.jstor.org/stable/24905655> - retrieved: 14.07.2024.
13. ResearchGate, Surface circulation and upwelling patterns around Sri Lanka, https://www.researchgate.net/publication/260977585_Surface_circulation_and_upwelling_patterns_around_Sri_Lanka - retrieved: 16.07.2024.
14. Schott F.A., McCreary J.P., The monsoon circulation of the Indian Ocean, Progress in Oceanography, Volume 51, Issue 1, 2001, 1–123. https://www.whoi.edu/cms/files/schott_mccreary_41948.pdf - retrieved: 11.07.2024.
15. Sri Lanka Travel and Tourism, Sri Lanka Map, <https://srilankatravelandtourism.com/srilanka/sri-lanka-map/> – retrieved: 22.05.2025.
16. SWAN Team, SWAN user manual: Cycle III version 41.51, Delft University of Technology, 2019. <https://swanmodel.sourceforge.io/download/zip/swanuse.pdf> - retrieved: 25.01.2025.
17. SWAN Team, SWAN scientific and technical documentation: Cycle III version 41.51, Delft University of Technology, 2019. <https://swanmodel.sourceforge.io/download/zip/swantech.pdf> - retrieved: 07.02.2025.

18. University of Colombo, Earth and marine sciences research, University of Colombo Archive - retrieved: 13.07.2024.
19. Vinayachandran P.N., Mathew S., Surface circulation and upwelling patterns around Sri Lanka, ResearchGate, 2003. https://www.researchgate.net/publication/260977585_Surface_circulation_and_upwelling_patterns_around_Sri_Lanka - retrieved: 16.07.2024.
20. Vinayachandran P.N., Yamagata T., Monsoon response of the sea around Sri Lanka: Generation of thermal domes and anticyclonic vortices, *Journal of Physical Oceanography*, Volume 28, Issue 10, 1998, 1946–1960. <https://www.jstor.org/stable/24905655> - retrieved: 14.07.2024.
21. Woods Hole Oceanographic Institution, Surface circulation dynamics, WHOI - retrieved: 11.07.2024.