



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование тропических циклонов на северо-западе Тихого
океана»

Исполнитель Зайчиков Всеволод Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«04» июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

	Стр.
Сокращения	4
Введение	5
1. Тропические циклоны	6
1.1. Строение тропических циклонов	7
1.2. Стадии развития	9
1.3. Механизм формирования тропических циклонов	18
1.4. Условия формирования тропических циклонов	19
1.5. Районы формирования тропических циклонов	20
1.6. Интенсивность тропических циклонов	21
1.7. Движение тропических циклонов	23
1.8. Тропические циклоны в северо-западной части Тихого океана	24
1.9. Последствия тропических циклонов	27
2. Облачность в тропических циклонах	29
2.1. Облака тропического циклогенеза	30
2.2. Облачная система ТЦ на снимках видимого спектра	36
2.3. Глаз бури	37
2.4. Микрофизические процессы облаков в зоне стены глаза бури	38
2.5. Облачность внешней зоны ТЦ	44
3. Исследование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана	46
3.1. Определение тропических циклонов по спутниковым снимкам	46
3.2. Составление базы данных	48
3.3. Анализ условий формирования и эволюции тропических	49

	ЦИКЛОНОВ	
3.3.1.	Тайфун Вутип	49
3.3.2.	Тайфун Хайшен	52
3.3.3.	Тайфун Ньятох	55
3.3.4.	Тайфун Нанмадол	58
3.3.5	Тайфун Мавар	61
3.4.	Анализ гистограмм основанных на значениях тропических	64
	циклонов	
	Заключение	68
	Список использованных источников	70
	Приложение	74

Сокращения

ВМО	– Всемирная Метеорологическая Организация
ТЦ	– тропический циклон
ТД	– тропическая депрессия
ТШ	– тропический шторм
СТШ	– сильный тропический шторм
У(Т)	– ураган (тайфун)
ВКП	– внешний конвективный пояс
МКС	– мезомасштабная конвективная система
ВГБ	– вертикальная горячая башня
МКВ	– мезомасштабный конвективный вихрь
UTC	– Coordinated Universal Time – Всемирное координированное время
NASA	– National Aeronautics and Space Administration – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства
ТПО	– температура поверхности океана
JTWC	– Joint Typhoon Warning Center – Объединенный центр предупреждения о тайфунах
TCFA	– Tropical Cyclone Formation Alert – Оповещение о формировании тропического циклона
JMA	– Japan Meteorological Agency – Метеорологическое Агентство Японии
ACE	– Accumulated Cyclone Energy – индекс Накопленной энергии циклона
JAXA/EORC	– Japan Exploration Agency / Earth Observation Research Center – Японское исследовательское агентство / Исследовательский центр наблюдения Земли

Введение

В результате природных бедствий, таких как наводнения, пожары, цунами, ураганы, торнадо, землетрясения, извержения вулканов и другие, происходит значительный ущерб для экономики и человеческих жизней. Мониторинг чрезвычайных ситуаций является очень важным. Применение дистанционных методов зондирования дает возможность не только предугадывать появление чрезвычайных ситуаций, но и локализовать опасные явления на начальных стадиях их развития, что позволяет снизить возможный ущерб.

Огромное значение для мониторинга тропических циклонов и прогноза их развития имеют наблюдения со спутников. А формирование и развитие тропических циклонов происходит в основном вдалеке от островов, авиационных и морских трасс, где отсутствует возможность организации метеорологических станций.

В то время как тропические циклоны хорошо дешифрируются на спутниковых изображениях, имеющих видимый диапазон, более тщательный анализ их облачных систем должен улучшать качество оценки их интенсивности и прогноза погоды, а также своевременность получения информации о состоянии здоровья населения.

Целью данной работы является исследование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана: места и причины их формирования, траектории движения и интенсивность.

Данная цель выполняется посредством анализа космических снимков; редактирования снимков, исследование температуры поверхности моря и интенсивности осадков; построения траекторий движения тропических циклонов; создание архива данных характеризующих основные показатели тропических циклонов; построение гистограмм по базе данных, и их анализ.

1. Тропические циклоны

Тропические циклоны представляют собой одни из самых разрушительных природных феноменов. Они сопровождаются порывистыми ветрами, интенсивными вихрями и проливными дождями, нанося значительный урон человечеству. Они оставляют после себя разрушенные дома, нарушенную экономику и инфраструктуру, влекущие за собой страшные последствия, от которых многие страны не могут полностью восстановиться. Эти природные катастрофы приводят к обширным человеческим потерям и огромным экономическим убыткам.

Понимание процессов, лежащих в основе образования тропических циклонов, наблюдение за их развитием и точная интерпретация собранных данных имеют решающее значение для своевременного реагирования и минимизации ущерба от этих мощных стихийных бедствий.

Тропические циклоны, возникающие в районах тропиков над теплыми водами океана и питаемые обильным влагосодержанием, превращаются в могучие бури, вызывающие огромные волны, сильные осадки и ветра со скоростью до 75 метров в секунду.

Тропический пояс, охватывающий Землю в районе 23 градусов к северу и югу от экватора, отличается от умеренных широт своими климатическими особенностями. В тропиках, где солнце в зените почти каждый день, температурные колебания в течение дня и года минимальны. Постоянное тепло и влажность способствуют формированию облаков и гроз, большинство из которых не несут угрозы. Но иногда облака собираются в полосы, формируя так называемые гряды кучево-дождевых облаков, а в других случаях - в ряды мощных конвективных ячеек, известных как линии шквалов. Проход линии шквалов обычно сопровождается резкими порывами ветра и сильными дождями, которые могут продолжаться несколько часов.

В тропиках, где тепло круглый год, нет четкого разделения на четыре сезона, характерного для изменения температур. Однако здесь наблюдаются сезонные колебания осадков, особенно когда внутритропическая зона конвергенции находится в данном регионе.

Ветры в тропиках, известные как пассаты, дуют с востока, северо-востока или юго-востока. Из-за небольших изменений давления на уровне моря, метеорологические карты в этих регионах несут меньше информации, чем в умеренных широтах.

1.1. Строение тропических циклонов

Тропические циклоны структурно делятся на три основные части, как показано на рис.1.1. В центре располагается область, известная как "глаз" циклона, окруженная "стеной глаза", за которой следует "внешняя часть" циклона. Эти зоны характеризуются разными метеорологическими условиями: в "внешней части" преобладают сильные ветры, тогда как в "глазе" циклона ветер отсутствует. "Стена глаза" отличается наиболее интенсивными конвективными потоками, ветрами, достигающими ураганных скоростей, и самыми обильными осадками, в то время как в "глазе" обычно царит относительная ясность.

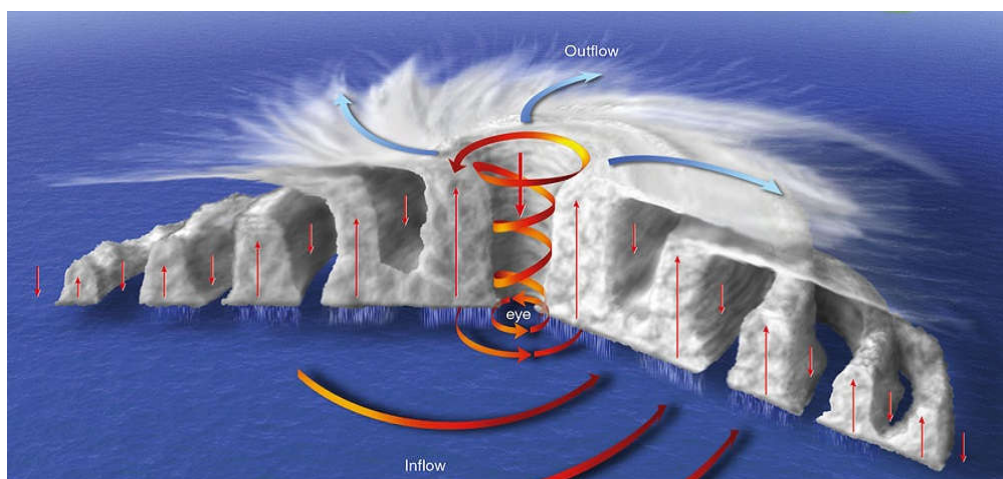


Рис.1.1. — строение тропического циклона

При приближении к урагану, небеса заполняются кучево-дождевыми облаками, и вы замечаете, что атмосферное давление сначала понижается неспешно, а затем ускоряется по мере того, как вы приближаетесь к его сердцевине. Ветры, дующие с севера и северо-запада, становятся всё более мощными. Приближаясь к центральной тихой зоне урагана, известной как глаз, вы ощущаете повышение температуры, уменьшение ветра, прекращение осадков и прояснение неба. Самое низкое давление, зафиксированное барометром, составляет 955 гПа, что на 50 гПа меньше, чем на периферии шторма. Этот период ясности быстро заканчивается, когда вы достигаете восточной части стены глаза, где встречаются самые интенсивные осадки и ветры. По мере удаления от стены глаза, давление вновь начинает расти, ветер стихает, сильные дожди утихают и, в конце концов, прекращаются, а небо снова становится чистым.

Тропические циклоны с высоким энергетическим потенциалом формируют просторный "глаз", где условия спокойные и небо ясное, несмотря на возможность огромных волн. Обычно "глаз" имеет круглую форму и его диаметр варьируется от 20 до 300 километров, хотя чаще всего он составляет 30-60 километров. В случаях особенно крупных и сильных циклонов, верхняя часть "глаза" может расширяться, создавая так называемый "эффект стадиона", когда стены "глаза" напоминают зрительские трибуны стадиона.

"Стена глаза" представляет собой плотное скопление грозовых облаков вокруг "глаза". Это область с самой активной конвекцией и максимальной высотой облаков в циклоне, достигающей 15 километров. Здесь осадки максимальны, а ветры на поверхности океана достигают экстремальных скоростей. Отметим, что максимальная скорость ветра обычно наблюдается на высоте около 300 метров. Проход "стены глаза" над территорией приводит к наибольшим разрушениям.

"Внешняя часть" циклона состоит из полос грозовых облаков, которые движутся к его центру и соединяются со "стенной глаза". Важно отметить, что в этой зоне, как и в "стене глаза", воздух поднимается вверх в дождевых полосах, в то время как в промежутках между ними, где облаков меньше, воздух опускается. Однако циркуляционные ячейки на периферии менее глубоки и не достигают такой высоты, как центральная ячейка.

1.2. Стадии развития

В соответствии с классификацией Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), стадии развития тропических циклонов (ТЦ) определяются на основе скорости ветра у земной поверхности:

- Тропическая депрессия (ТД) – до 17 м/с;
- Тропический шторм (ТШ) – от 17 до 23 м/с;
- Сильный тропический шторм (СТШ) – от 24 до 32 м/с;
- Ураган или тайфун (У (Т)) – более 33 м/с.

Несмотря на чёткий физический критерий, у этой классификации есть недостатки. Основной из них заключается в том, что она не отражает физическую суть процесса. Кроме того, для определения интенсивности развития ТЦ требуются данные о ветре в его центральной части, которые не всегда доступны. Исследования позволили уточнить эти аспекты, делая их более соответствующими современным требованиям. Согласно последним данным, развитие ТЦ целесообразно разделить на пять стадий:

- Стадия 0 - Тропическое возмущение:

На этой стадии облачная масса состоит из кучевых, слоистых и перистых

облаков, расположенных хаотично. Основным признаком возникновения тропического возмущения является увеличение количества и интенсивности кучево-дождевых облаков и их концентрация в определённой области. Тропическое возмущение часто развивается в зоне облачных полос. Анализ синоптических карт показывает, что на начальной стадии циклоническая циркуляция у земли слабо выражена или отсутствует, но с увеличением высоты она становится более заметной.

- Стадия 1 - Тропическая депрессия:

Облака на этой стадии характеризуются разделением плотного облачного массива и основной части облачной полосы, расположенной вдоль линии конвергенции. Облачная масса начинает приобретать определенную форму, а на западе от неё появляются тонкие гряды кучевой облачности.

В начале развития тропической депрессии облачный массив напоминает дугу, выпуклость которой направлена на восток или северо-восток, а западный край более вогнутый и сглаженный.

В процессе развития, облачность тропической депрессии продолжает искривляться по циклоническому пути, все больше приобретая форму спирали или запятой в северном полушарии. В южном полушарии, напротив, облака тропической депрессии отображаются как перевернутая запятая.

Эта конфигурация облаков является признаком стадии тропической депрессии, хотя иногда тропическая депрессия может принимать более неупорядоченную форму и не выглядеть так явно. Комматическая форма облачного массива указывает на определенную фазу развития тропического циклона. В точке слияния облачных полос наблюдается активное развитие конвективных облаков, и именно здесь часто располагается центр тропической депрессии.

Скорость ветра на стадии тропической депрессии составляет 15-17 м/с. По мере усиления тропической депрессии и его перехода в стадию тропического шторма, заметно возрастает скорость ветра и размер облачной системы. Важно, что точка — часть облачной запятой — увеличивается и становится главной облачной массой развивающегося тропического циклона. Переход между стадиями происходит очень быстро. Однако стоит отметить, что не все тропические депрессии превращаются в тропические штормы; большинство из них обычно ослабевают.

● Стадия 2 - Тропический шторм:

Тропический шторм формируется из мощной конвективной облачности, которая принимает форму вращающейся спирали. Это считается начальной фазой тропического циклона. На этом этапе в облаках тропического шторма появляется характерная перистая облачность, обычно возникающая при скорости ветра около 15 м/с у центра циклона. Её наличие указывает на интенсивное развитие циклона. Перистые облака образуют полосы, которые прерываются на краях основного облачного вихря. Они скрывают центр циклона и облачность, связанную с дождем и кучевыми облаками.

Структурная особенность перистой облачности над тропическим штормом свидетельствует о наличии расходящегося потока воздуха, который зависит от антициклона на высоте. Антициклоническая циркуляция над тропическим штормом вызывает отток воздуха, что ведет к снижению давления у поверхности земли. Таким образом, распределение перистой облачности служит индикатором направления оттока воздуха на определенной высоте. На данной стадии тропического циклона характерно появление плотных спиралевидных облачных полос на периферии, которые сходятся к центру по циклоническим линиям тока. Чем дальше эти полосы от центра, тем они уже.

Эти полосы образованы кучевой облачностью с ячеистой мезоструктурой. По мере приближения к центру тропического циклона, количество облачных полос, скрытых под слоем перистых облаков, увеличивается. Обычно ширина такой полосы варьируется от 200 до 300 километров, хотя иногда может быть и больше. Типично для тропического циклона наличие двух основных облачных полос: одной в юго-западной части и другой в северо-восточной.

- Стадия 3 - Тропический циклон ураганной категории

По мере углубления тропического циклона, его облачная система расширяется, а спиральные облачные полосы становятся более плотными и обвивают центр циркуляции. В результате, облачный массив приобретает почти идеально круглую форму диска, что является характерным для ураганов и тайфунов, располагаясь прямо над их центром. От этого массива отходят отдельные спиральные облачные полосы. На окраинах облачной системы урагана иногда можно заметить одну или две плотные спирали. Границы основного облачного массива обычно четкие и резкие, выделяющиеся на фоне темной поверхности океана. Над ураганами часто присутствует слой плотных перистых облаков. Эти облака формируют полосы, исходящие из центра урагана. В самом центре облачной системы обычно виден темный круг или точка — глаз бури. Описанная облачная система типична для всех развитых тропических циклонов. На представленном изображении глаз бури скрыт под слоем плотных перистых облаков. Структура облачной системы указывает на то, что тропический циклон достиг стадии зрелости, или урагана. На изображении виден плотный круглый массив сплошной облачности, от которого в противоположном направлении часовой стрелки отходят спиральные облачные полосы. Эти полосы состоят из мощных кучево-дождевых облаков, сформированных в ячейки.

Максимальная стадия развития тропического циклона характеризуется

следующими особенностями: плотная сплошная облачная масса в форме круглой зоны или диска с плавными краями; спиральные полосы кучево-дождевых облаков, исходящие от основного массива, среди которых могут быть две главные полосы, расположенные диаметрально противоположно друг другу; плотный слой перистых облаков с характерными полосами; в центре облачного массива часто можно увидеть темное пятно или точку — глаз бури; в передней части тропического циклона находится гряда кучево-дождевых облаков, линия шквала; на стадии урагана тропический циклон достигает максимальной скорости ветра, которая может превышать 33 м/с. Стадия урагана наиболее типична для тропического циклона и самой продолжительной, длится от 5 до 7 дней.

- Стадия 4 - Разрушающийся тропический циклон

На спутниковых изображениях четко видна облачная система тропического циклона на последней стадии его развития. Разрушение тропического циклона обычно вызвано рядом факторов, связанных с изменением термодинамических и синоптических условий, включая охлаждение поверхности океана, взаимодействие с полярным фронтом, который может быть втянут в систему циклона, а также выход урагана на сушу.

Изменения в начальных термодинамических условиях приводят к потере тропическим циклоном его характерных черт, которые легко узнаваемы на снимках. К признакам разрушения циклона относятся уменьшение интенсивности перистых облаков и их частичное рассеивание, нарушение идеальной круглой формы центрального облачного массива, размытие его четких границ, потеря внутренней структурированности, распад сплошного облачного массива на отдельные фрагменты и уменьшение размера облачного массива.

В контексте облачного массива важно отметить эволюцию облачных

систем в тропических циклонах. На спутниковых снимках облачность тропических циклонов представлена в виде обширного ярко-белого пятна с короткими спиралевидными ответвлениями или в форме запятой. Чем мощнее тропический циклон, тем больше его облачная система, которая может достигать 500-700 км в диаметре, и тем более заметна его спиралевидная структура. В тропических циклонах преобладают кучево-дождевые и перистые облака, наиболее плотно сгруппированные вокруг центра, формируя зону плотной сплошной облачности.

Снимки облачности, полученные с метеорологических спутников, предоставляют полную картину распределения облаков над большими территориями, что позволяет лучше понять структуру синоптических объектов.

Спутниковые снимки позволяют анализировать разнообразие облачного покрова, включая те его аспекты, которые обычно недоступны для точечных наземных наблюдений. Исследователи стремятся распознавать и систематизировать облачные формации на этих изображениях, используя классификацию, применяемую в наземных исследованиях, а также классифицировать обширные облачные системы, охватывающие большие территории.

Спутниковые данные выделяют два основных типа облачности, ассоциированные с тропическими циклонами: это могут быть большие зоны конвективных облаков нижнего уровня, иногда сопровождаемые "хвостом", и высокие перистые облака, часто заметные за ураганом. Также наблюдается "кольцо" конвективных облаков, или внешний "конвективный пояс", проходящий параллельно краю урагана и отделённый от него безоблачной зоной.

Модель тропического циклона, предложенная Э. К. Бареттом и изображённая на рисунке 1.2, показывает кольцевые зоны как области с

относительно высокой температурой и низкой влажностью. В этих зонах вокруг внешней границы циклонического вихря происходят нисходящие потоки воздуха. Однако, по мнению Баретта, тропический циклон не является замкнутой системой циркуляции.

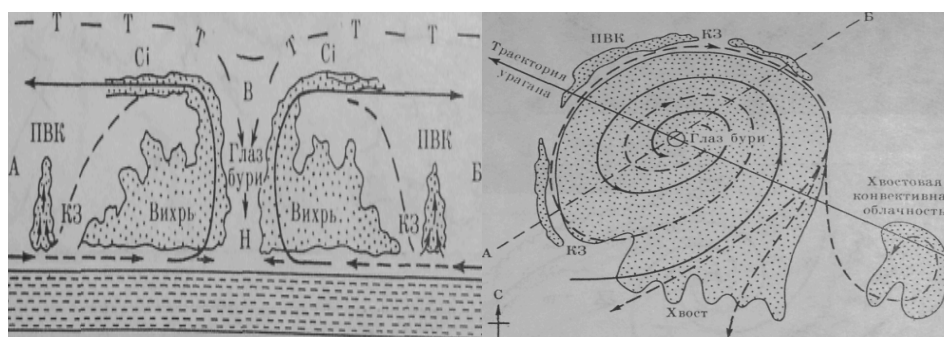
Для поддержания длительности жизни циклона в несколько дней необходим постоянный приток тепла, который может быть обеспечен только конденсацией влажного воздуха, поднимающегося и охлаждающегося с подстилающей поверхности. В то время как в верхних слоях циклона воздух может двигаться вниз вблизи его внешних границ, основная масса воздуха, скорее всего, будет распределяться горизонтально на уровне, соответствующем антициклон

иклон

у.

Р
ис. 1.2.

—
Схема



тическое изображение по Э.К. Баретту

Внешний конвективный пояс (ВКП) (см. Рис.1.2) является местом встречи сухого воздуха, спускающегося сверху, с влажным воздухом с поверхности, который затягивается в центр циклона. По мнению Баррета, именно такое взаимодействие вызывает локальную нестабильность, что может привести к временной задержке притока поверхностного воздуха в циклон. Конвективный облачный пояс обычно не охватывает всю периферию циклона, чаще всего он располагается вдоль переднего края. Максимальный приток влажного воздуха происходит в заднем секторе, обращенном к экватору, где влияние силы Кориолиса минимально, и ветер в циклоне образует наибольший

угол с изобарами.

Ветры в ВКП сильные и сравнимы по скорости с струйными течениями. Высокие скорости ветра обусловлены температурными различиями между воздушной массой в приземном слое и опускающимся тропосферным воздухом. Эти мощные потоки воздуха окружают циклон с полюсной стороны, антициклонически обходя систему и удаляясь от нее к задней низкой конвективной зоне. Верхние и нижние потоки в тропиках могут быть связаны так, что дивергенция в верхней тропосфере способствует конвергенции в нижних слоях, что приводит к сильным восходящим движениям и быстрому формированию мощной конвективной облачности.

Спутниковые данные значительно упростили задачу обнаружения и отслеживания тропических циклонов. Существует множество признаков, позволяющих идентифицировать тропический циклон на снимках, главным из которых является структура облачного массива. Начинающиеся тропические циклоны имеют изолированный облачный массив с начальными признаками вихревой структуры. Более развитые тропические циклоны имеют изолированный облачный массив в форме диска со спиралевидными отростками по краям; в центре часто виден "глаз бури". Траектория ТЦ определяется по положению его центров, выявленных на основе спутниковых данных. Местоположение центра и траектория тропического циклона являются ключевыми характеристиками. Недавние исследования показали, что ось тропического циклона почти вертикальна, и центр его облачной системы совпадает с приземным центром. Это позволяет точно определить центр циклона по фокусу облачного вихря.

Центр вихревой структуры облачности в тропическом циклоне может находиться в одном из трех положений:

а) Если в облачном вихре виден глаз бури, положение центра определяется

координатами глаза.

б) Если глаз бури не виден, положение центра определяется по точке схождения облачных спиралей.

в) Если глаз бури не виден и облачные спирали размыты или отсутствуют, центр определяется как геометрический центр облачности, хотя это может привести к ошибке из-за асимметрии облачной системы вихря.

Таким образом, облачная система ТЦ может быть охарактеризована следующими элементами: глаз бури, полосы перистых облаков, полосы кучево-дождевых облаков, разрывы в центральном облачном массиве.

Распределение скорости ветра в тропическом циклоне неоднородно. В центральной части облачного массива скорости ветра могут быть очень высокими и разрушительными, в то время как на периферии они ниже. При анализе ветрового поля в тропическом циклоне не выделяют условную зону с ветрами 25 м/с и выше. Важно учитывать связь между площадью, занятой сильными ветрами, и диаметром тропического циклона (согласно Е.П. Борисенкову) (см. таблицу 1.1).

Диаметр циклона, км	450	450-700	700-1250
Площадь, %	40	20	10

Таб.1.1 — Зависимости площади, занятой сильными ветрами, от диаметра циклона.

Эта информация указывает на различия в скоростях ветра внутри циклона, и с тем как центральная область облачного поля становится шире, доля территории с высокими скоростями ветра сокращается. Это соответствует представлениям о структуре тропического циклона, предложенной в модели.

1.3. Механизм формирования тропических циклонов

Основным источником энергии для тропических циклонов является тепло, выделяемое при конденсации водяного пара, которое в свою очередь генерируется за счет испарения воды с океанской поверхности под воздействием солнечного излучения. Так, тропический циклон функционирует как масштабная тепловая система, зависящая также от вращения Земли и её гравитационного притяжения. В метеорологической науке такой циклон классифицируется как мезомасштабная конвективная система, которая развивается при наличии значительного количества тепла и влаги.

В процессе формирования тропического циклона, теплый и влажный воздух поднимается вверх, особенно в районе стены глаза циклона, а также вдоль дождевых полос. Поднимающийся воздух расширяется и охлаждается, увеличивая свою относительную влажность, что приводит к конденсации влаги и выпадению осадков. Воздух продолжает охлаждаться и терять влагу, достигая уровня тропопаузы, где он перестает охлаждаться и практически полностью теряет влагу. Затем воздух опускается обратно к поверхности океана, где он снова набирает влагу и начинает подниматься. Если условия остаются благоприятными, энергия, полученная в результате этих процессов, превышает ее расход, что приводит к усилению восходящих потоков, увеличению скорости ветра и ускорению конденсации, создавая положительную обратную связь. Чтобы поддерживать благоприятные условия, тропический циклон должен находиться над теплой океанской поверхностью, обеспечивающей необходимую влагу; при пересечении суши его сила уменьшается из-за отсутствия доступа к источнику энергии. Вращение Земли вносит в этот конвекционный процесс закручивающий эффект за счет силы Кориолиса.

Формирование тропических циклонов отличается от других атмосферных процессов тем, что оно требует интенсивной конвекции, при которой восходящие потоки занимают пространство от поверхности океана до тропопаузы, в то время как горизонтальные ветры ограничены в основном приповерхностным слоем толщиной до одного километра. В тропических районах большая часть тропосферы участвует в конвективных процессах. Однако в более высоких широтах тропосфера тоньше и солнечного тепла меньше, что ограничивает зону благоприятных условий для формирования тропических циклонов тропическим поясом. В отличие от тропических, внетропические циклоны получают энергию в основном из-за горизонтальных температурных градиентов, существующих до их образования.

Прохождение тропического циклона над океаном приводит к значительному охлаждению приповерхностного слоя воды из-за потери тепла на испарение, активного перемешивания теплых и холодных слоев воды и выпадения холодных осадков. Плотный облачный покров также способствует охлаждению, закрывая поверхность океана от солнечного света. В результате этих процессов температура воды в течение нескольких дней прохождения циклона существенно снижается, создавая отрицательную обратную связь, которая может привести к ослаблению тропического циклона, особенно если он движется медленно.

1.4. Условия образования тропических циклонов

Процесс возникновения тропических циклонов до сих пор остается предметом активных исследований, несмотря на значительное внимание, уделяемое этому явлению учеными. В ходе многочисленных исследований

были определены ключевые факторы, способствующие их формированию, их шесть, хотя в некоторых случаях может быть меньше:

1. Температура поверхности океана должна быть не менее 26.5 °C на глубине до 50 метров, что создает условия для атмосферной неустойчивости.

2. Быстрое уменьшение температуры с высотой, что приводит к образованию значительного количества энергии конденсации, являющейся основным источником энергии циклона.

3. Высокая влажность воздуха в нижних и средних слоях тропосферы, что усиливает атмосферную неустойчивость.

4. Низкий вертикальный градиент ветра, чтобы избежать разрушения циркуляционной структуры циклона.

5. Достаточная сила Кориолиса для создания завихренности, что объясняет отсутствие тропических циклонов ближе чем на 550 км к экватору.

6. Наличие зоны низкого давления или нестабильных погодных условий.

Также ведутся исследования о влиянии распределения влажности в атмосфере на формирование и поддержание тропических циклонов, а также о возможном влиянии различной электромагнитной интенсивности на эти процессы. Однако данные направления исследований еще не привели к окончательным выводам.

1.5. Районы формирования тропических циклонов

Районы, где происходит формирование тропических циклонов, называются циклонными бассейнами. К таким бассейнам относятся северная часть Атлантического океана, северо-восточный, северо-западный и южный

секторы Тихого океана, а также северные, северо-восточные и юго-западные области Индийского океана. Эти бассейны характеризуются разной степенью активности. Например, северо-западная часть Тихого океана известна как самая активная зона по количеству и интенсивности тропических циклонов, в то время как северная часть Индийского океана является наименее активной.

Ежегодно на планете формируется около 80 тропических циклонов. Из них примерно 40-50 достигают силы урагана, а около 25 эволюционируют до третьей категории урагана по шкале Саффира-Симпсона (см. таб.1.2). В 1933 году было зарегистрировано 21 такое событие, что делало этот год рекордным до 2005 года, когда было зафиксировано 26 тропических циклонов. С тех пор количество тропических циклонов варьировалось, увеличиваясь и уменьшаясь, но точные факторы, определяющие их годовое количество, до сих пор полностью не изучены, и исследования продолжаются.

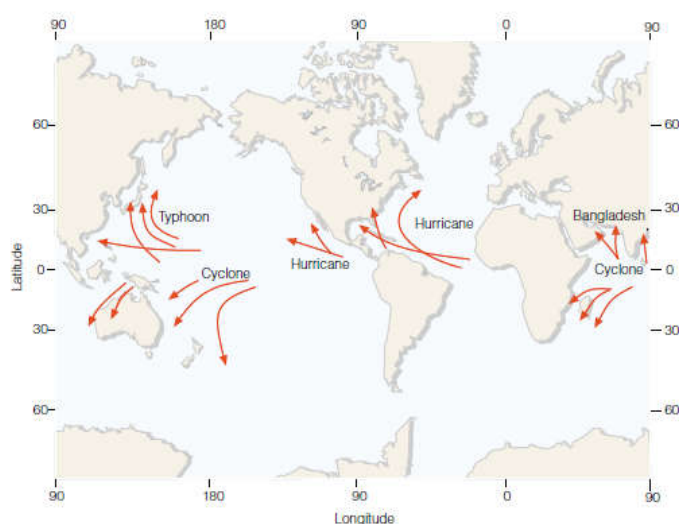


Рис.1.3. — Регионы формирования и движение тропических циклонов

1.6. Интенсивность тропических циклонов

Интенсивность тропических циклонов может варьироваться от очень слабых до чрезвычайно мощных. В связи с этим, для оценки уровня угрозы для

населения и морских судов, находящихся на пути таких циклонов, были разработаны специальные шкалы. Классификация циклонов по этим шкалам зависит не только от их физических свойств, но и от места их возникновения, а также от особенностей места наблюдения. Лишь некоторые из этих шкал получили официальное признание и используются метеорологами по всему миру. Классы интенсивности циклонов могут определяться по таким параметрам, как сила ветра, минимальное давление в центре и общая энергия циклона. Давайте подробнее рассмотрим шкалу Саффира-Симпсона (см. таб.1.2), которую мы будем использовать в дальнейшем для классификации интенсивности тропических циклонов. Интенсивность по этой шкале определяется на основе скорости ветра и высоты штормового прилива. Шкала Саффира-Симпсона включает пять категорий ураганов: от минимальной до катастрофической. Однако современные исследования показывают, что связь между высотой штормового прилива и скоростью ветра на земле не является постоянной, что указывает на то, что классификация может быть устаревшей.

Шкала определения интенсивности ТЦ Саффира-Симпсона		
Категория	Скорость ветра, м/с (км/ч)	Высота волны ветрового нагона, м
5	> 70 (250)	> 5,5
4	58-70 (210—250)	4—5,5
3	50-58 (180—210)	2,5—4
2	42-50 (150—180)	2—2,5

1	33-42 (120—150)	1—2
Тропические циклоны доураганной силы		
Тропический шторм	17-33 (60—120)	0—1
Тропическая депрессия	< 17 (60)	0

Таб. 1.2. — шкала Саффира-Симпсона

Сегодня шкала Саффира-Симпсона применяется в основном для определения силы ураганов и их максимальной скорости ветра, что позволяет оценить возможные риски и предполагаемые разрушения. Однако для измерения высоты штормового прилива используются другие методы.

Чтобы своевременно выявить формирующийся тропический циклон, недостаточно иметь базовые знания о его структуре и местах возникновения. Требуются систематические и точные мониторинги текущих метеорологических процессов. Наблюдение за тропическими циклонами — сложная задача, так как они образуются над океанами, где метеорологические станции встречаются нечасто, и к тому же циклоны быстро эволюционируют и перемещаются.

1.7. Движение тропических циклонов

На рисунке 1.3 представлены регионы, где обычно возникают тропические циклоны, и их обычные пути распространения. Обратим внимание на то, что ураганы обычно образуются в тропических районах океанов, за исключением Южной Атлантики и юго-восточной части Тихого океана, где

температура водной поверхности слишком низка для их формирования. Кроме того, в тёплый период года положение внутритропической зоны конвергенции в Южном полушарии также мешает развитию тропических циклонов в этих областях.

Ураганы, возникающие над северной частью Тихого и Северного Атлантического океанов, подвержены воздействию восточных ветров. Эти ветры направляют их на запад или северо-запад со скоростью примерно 5 метров в секунду на протяжении одной недели. С течением времени ураганы изменяют свой курс в сторону полюсов, следуя вдоль края субтропического антициклона. Достигнув достаточно северных широт, они вступают в западное течение, которое направляет их к северу или северо-востоку. При перемещении в умеренные широты скорость ураганов может возрасти до 25 метров в секунду. Траектория урагана, определяемая его структурой и взаимодействием с окружающей средой, может сильно различаться. Иногда циклоны следуют по необычным и непредсказуемым траекториям, что ставит в тупик прогнозистов. Были случаи, когда ураган, приближаясь к берегу и предстоящей гибели, неожиданно менял направление и обходил побережье.

1.8. Тропические циклоны в северо-западной части Тихого океана

Тропические циклоны образующиеся в северо-западной части Тихого океана, отличаются от аналогичных явлений в других местах планеты по ряду параметров:

- Терминология: Тропические циклоны носят различные наименования в зависимости от региона. Например, в северо-западном Тихом океане их называют тайфунами, в Атлантике и северо-восточной части Тихого океана — ураганами, а в Индийском океане и южной части Тихого океана — циклонами.

- **Мощность и регулярность:** Тайфуны отличаются особенно высокой мощностью и происходят чаще, чем тропические циклоны в других регионах, особенно это касается северо-западного Тихого океана, где они случаются чаще всего.
- **Время года:** Хотя тайфуны могут возникать в течение всего года, большинство из них приходится на период с мая по октябрь, в отличие от более короткого сезона циклонов в других местах.
- **Путь движения:** Обычно тайфуны перемещаются с востока на запад, а затем меняют направление на северо-восток, затрагивая страны Восточной и Юго-Восточной Азии, в то время как в других регионах их пути могут сильно различаться.
- **Взаимодействие с сушей:** При достижении азиатского континента тайфуны сталкиваются с горными массивами, что усиливает выпадение осадков и может привести к оползням и наводнениям, в то время как в других регионах последствия их взаимодействия с сушей могут быть иными.

Эти особенности связаны с уникальными географическими и климатическими характеристиками каждого региона, и они учитываются метеорологическими службами при составлении прогнозов движения и силы тропических циклонов.

Тайфуны могут формироваться в любое время года, но их число значительно увеличивается в период с мая по октябрь. Это связано с повышением температуры океана до уровня, который способствует возникновению тропических циклонов, а также с другими условиями, такими как повышенная влажность и атмосферная нестабильность. В эти месяцы происходит большинство тайфунов, приносящих с собой сильные порывы ветра и проливные дожди, что может привести к серьезным последствиям в виде наводнений и оползней. Службы погодного мониторинга внимательно

следят за этими явлениями, чтобы своевременно информировать общественность о потенциальных опасностях.

Пути движения тайфунов (см рис. 1.4), обычно направлены на запад или северо-запад. Эти пути определяются множеством элементов, включая температурные показатели поверхности океана, расположение высотных ветров в атмосфере и общие метеорологические условия, такие как высокое давление в субтропических регионах.

Тайфуны образуются в тропической области Тихого океана и перемещаются на запад под воздействием пассатов. Когда они достигают Филиппинского или Южно-Китайского моря, некоторые из них меняют направление на север или северо-восток из-за субтропического антициклона. Следует подчеркнуть, что пути циклонов могут сильно отличаться в зависимости от конкретного шторма, и их конкретное направление может изменяться под влиянием различных метеорологических условий. Прогнозирование траектории тайфуна — это сложный процесс, который требует непрерывного наблюдения и анализа данных. Метеорологические службы используют компьютерное моделирование и спутниковую информацию для прогнозирования траекторий тайфунов, что позволяет вовремя предупреждать общественность о приближающихся бурях и уменьшать возможный урон.



Рис. 1.4 — траектории тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана

1.9. Последствия тропических циклонов и меры по их предотвращению

Когда ураган движется к береговой линии с восточной стороны, обычно наблюдается северный ветер. Это происходит потому, что ветры, влияющие на шторм, складываются с ветрами с севера и вычитаются из ветров с юга. В результате, если ураган с ветрами у стены глаза со скоростью 57 м/с движется на запад со скоростью 5 м/с, то на северной стороне скорость ветра достигнет 62 м/с, а на южной будет около 50 м/с. Эти же принципы применимы и к ураганам, движущимся на север.

Когда ветер проходит над открытыми водоёмами, он приводит в движение водные слои. Представим, что поверхностный слой воды состоит из ряда слоёв, где каждый последующий слой движется вправо по отношению к слою, расположенному выше. Этот эффект, известный как экмановский перенос, вызывает смещение воды в сторону, противоположную направлению ветра. В случае урагана Глория, дующего с севера, это приводит к перемещению водных масс в сторону берега, вызывая их накопление и быстрое затопление прибрежных зон.

Мощные ветры урагана порождают высокие волны, достигающие иногда 10-15 метров в высоту. Эти волны распространяются от центра урагана в виде океанских свалов, перенося энергию к берегам. Так, приближение урагана становится заметным на побережье за несколько дней до его прихода.

В то время как ветры урагана причиняют значительные разрушения, наибольший урон обычно наносят мощные штормовые волны. Затопление происходит частично из-за ветра, который направляет воду на сушу, и из-за обильных осадков, достигающих 600 мм в час. К этому добавляется влияние низкого атмосферного давления в центре тропического циклона, которое препятствует подъему уровня моря (при падении давления на 1 гПа уровень воды поднимается на 1 см). Высокий уровень воды, превышающий обычный прилив, сильные ветра и перемещение водных масс к берегу способствуют формированию штормового нагона — необычного повышения уровня моря на несколько метров, что может привести к затоплению низких территорий и превращению пляжей в развалины. Штормовой нагон становится особенно опасным, когда совпадает с моментом прилива.

Данные, собранные с помощью корабельных наблюдений, спутников, радаров, буев и разведывательных самолетов, обеспечивают постоянный мониторинг положения, силы и поведения тропических циклонов. В случаях, когда ураган угрожает жизни и деятельности людей, Национальный Центр Ураганов в Майями, штат Флорида, и Тихоокеанский Центр Ураганов в Гонолулу, Гавайи, выпускают отчеты о тропическом циклоне за 24-48 часов до его приближения. По мере уточнения данных и подтверждения, что ураган достигнет берега в течение следующих 24 часов, издается предупреждение. Это предупреждение дает возможность жителям защитить свою собственность или эвакуироваться при необходимости. Оно охватывает обширную прибрежную зону протяженностью около 550 км, так как обычно ураганы наносят ущерб примерно одной трети этой территории.

Шкалы интенсивности тропических циклонов различаются в зависимости от максимальной скорости ветра, используемой в расчетах, и от океанского бассейна, где циклон возник. В западной части Тихого океана используется шкала Метеорологической службы Японии, в северной части Индийского океана — шкала Индийского метеорологического департамента, в юго-западной части Индийского океана — шкала Метео-Франс на Реюньоне, а в юго-восточной части Индийского океана и южной части Тихого океана — австралийская шкала, используемая Австралийским бюро метеорологии и метеорологической службой Фиджи.

Система Всемирной метеорологической организации (ВМО) для определения максимальных постоянных ветров требует их усреднения на высоте 10 метров над землей в течение десяти минут. В то же время, шкала Саффира-Симпсона основана на одноминутном усреднении скорости ветра на той же высоте. Индийский метеорологический департамент использует трехминутное усреднение, а австралийская шкала учитывает как трехсекундные порывы ветра, так и десятиминутные максимальные постоянные ветры. Эти различия в методах затрудняют прямое сравнение тропических циклонов, возникающих в разных океанских бассейнах.

2. Облачность в тропических циклонах

Облака, формирующие тропические циклоны, отличаются от облаков других атмосферных систем. Они образуются благодаря сильным, глубоким и вращающимся вверх конвективным потокам, в то время как нисходящие потоки в этих системах слабее. В центре тропического циклона, в зоне глаза бури, слоистые облака пограничного слоя опускаются вниз. Облачность, образующая стенку глаза бури, наклонена наружу и поддерживается

вихревыми движениями, вызванными градиентом ветра, и восходящим потоком из пограничного слоя, стремящимся к симметричному нейтральному состоянию. Этот баланс иногда нарушается из-за плавучести, возникающей в результате влажного воздуха, поступающего к основанию стенки глаза бури из-за притока воздуха с нижних уровней, сильного ветра или мелкомасштабных вихрей, включая мощные вертикальные восходящие потоки. В регионе стенки глаза бури образуются снежная крупа и крупные капли, которые быстро выпадают в виде осадков. За пределами стенки глаза бури находятся квазистационарные осадочные зоны с конвективными ячейками, содержащими смешанные восходящие потоки и два типа нисходящих потоков: глубокие и крайние внутренние. Нестабильные вторичные осадочные зоны демонстрируют характеристики вихревых волн Россби. Осадочные зоны могут объединяться во вторичные стенки глаза бури, отделенные от первичных разрывом, имеющим структуру глаза бури. Отдаленные осадочные зоны состоят из кучево-дождевых облаков, схожих с теми, что формируются в внетропических конвективных штормах.

2.1. Облака тропического циклогенеза

Облачные формации, усиливающие тропическую депрессию, представляют собой ключевой элемент тропического циклогенеза. Этот процесс включает в себя конвективные движения воздуха, которые добавляют энергию и вращательное движение к существующему циклоническому нарушению в атмосфере. Центральной точкой таких систем является конвективная облачность, где наблюдается восходящий поток. Спутниковые данные показывают, что перед усилением ветров в центре депрессии происходят продолжительные конвективные активности. Эти активности,

проявляющиеся в виде перистых облаков, выделяются на спутниковых изображениях и указывают на участие определенных типов кучево-дождевых облаков в процессе циклогенеза.

На иллюстрации 2.1 представлен жизненный цикл конвективных структур, способствующих развитию тропической депрессии в тропический шторм. Эти структуры могут быть как отдельными облаками, так и частью мезомасштабной конвективной системы (МКС), содержащей несколько глубоких конвективных ячеек и слоистые облака с осадками. Конвективные образования, обозначенные на иллюстрации как (d), располагаются внутри уже существующей циклонической циркуляции. Циклогенез наиболее вероятен в условиях, благоприятных для возникновения вихрей на низких уровнях, и облачные процессы могут усиливать циклогенез, если они происходят в зоне с низким давлением и высокой завихренностью, как показано пунктирной линией областью L на иллюстрации. Особенно эффективен циклогенез в изолированной циклонической циркуляции, отделенной от внешней среды.

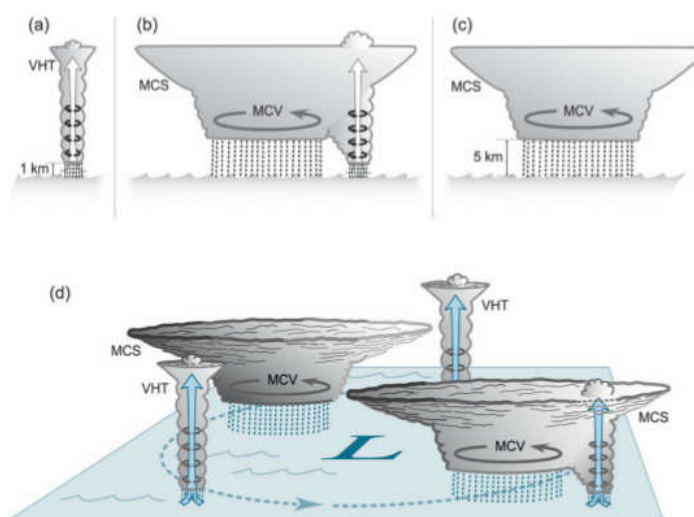


Рис. 2.1. — Жизнь мезомасштабной конвективной системы (МКС)

Иллюстрация 2.1(a) демонстрирует упрощенную модель жизненного цикла мезомасштабной конвективной системы (МКС), возникающей в условиях

с высоким уровнем завихренности на нижних слоях атмосферы. МКС начинается с одной или нескольких отдельных конвективных башен. Эти башни участвуют в процессе растяжения нижней завихренности за счет конвергенции, вызванной конвективными и адвективными восходящими потоками. В результате этих потоков формируется расширенный центр вертикального вихря, известного как вертикальная горячая башня (ВГБ). Со временем конвективные башни теряют свою структуру, ослабевают и превращаются в часть облачного слоистого покрова. Появление новых ВГБ происходит вблизи слоистой облачности, и в зрелой фазе они превращаются в МКС, состоящую из конвективных и слоистых компонентов.

База слоистого облака располагается в средней тропосфере и в основном образована вершинами конвективных ячеек. Вертикальное распределение тепла в слоистой облачности способствует формированию мезомасштабного конвективного вихря (МКВ) в средних слоях, ассоциированных со слоистым покровом. Как показано на рисунке 2.1, слоистая облачность может содержать остатки конвективных ячеек с достаточной положительной завихренностью, которые вносят дополнительную завихренность в МКВ. На рисунке (b) МКС включает в себя ВГБ и широкую зону слоистой облачности, содержащую МКВ. В конечной фазе жизненного цикла МКС, хотя формирование горячих башен прекращается, слоистая облачность с мезомасштабным конвективным вихрем продолжает существовать в течение нескольких часов, как это видно на рисунке 2.1(c).

На рисунке 2.1(d) представлена идеализированная схема облачности, формирующейся во время развития тропического шторма, основанная на конкретном примере. Исследования Симпсона (1997) и Риччи (2003) демонстрируют спутниковые снимки мезомасштабных конвективных систем, которые образуются вокруг центра нарастающего тропического шторма Оливер (1993) в Южном полушарии. Аналогичные наблюдения были описаны

Сиппелом и коллегами (2006), которые зафиксировали систему на спутниковых изображениях и радарах близ побережья, которая впоследствии превратилась в тропический шторм Элисон (2001), поразивший Техас, США. МКС в шторме Элисон располагалась вокруг формирующегося циклона.

Облачные формации, схожие с теми, что наблюдались в штормах Элисон и Оливер, также возникли на начальной стадии формирования урагана Офелия (2005). На рисунке 2.2 показаны инфракрасные спутниковые снимки и данные радиолокационных радаров, отображающие процесс усиления тропической депрессии до тропического шторма пре-Офелия. За день до того, как депрессия эволюционировала в тропический шторм (см. рис. 2.2(a-d)), обширная конвекция охватила большую территорию, однако облака и осадки ещё не формировали чёткую структуру шторма. На рисунках 2.2(c, d) видно, что конвективные облака сгруппировались в три мезомасштабные конвективные системы, примерно по 200 км в горизонтальном измерении, каждая из которых содержит активную конвективную ячейку и слоистую облачность с осадками. ВГБ находится в МКС к северо-востоку от Мельбурна, штат Флорида, США. Таким образом, депрессия, предшествующая Офелии, характеризуется облачностью с интенсивно вращающимися конвективными ячейками и мезомасштабными конвективными системами, разбросанными по зоне низкого давления, что иллюстрируется на рисунке 2.1(d).

К указанному времени (9:15 UTC 6 сентября 2005 года, согласно рис.2.2(e, f)), зона интенсивной конвекции в пределах депрессии, предшествующей шторму Офелия, сократилась, сосредоточившись в пределах одной особо мощной мезомасштабной конвективной системы. В течение последующих часов, эта конвективная зона претерпела значительные изменения в структуре, обретая характеристики тропического шторма, что видно на рис.2.2(g, h). Радарные данные выявили начало формирования стены глаза циклона и выразительные зоны осадков, которые простирались от юга

через восток к северу, с конвективной структурой на стороне, обращённой к ветру, и слоистой структурой с обратной стороны.

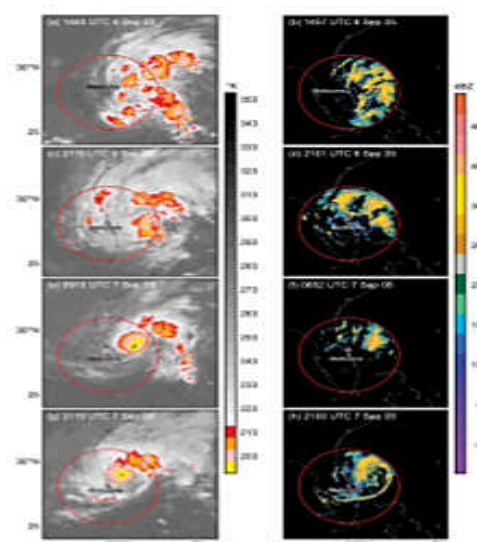


Рис. 2.2 — Спутниковые и радиолокационные снимки интенсификации депрессии пре-Офелия (2005)

Рисунок 2.1(d) демонстрирует идеализированный процесс образования облачного массива в условиях, где общие метеорологические факторы способствуют формированию начальной слабой циклонической активности. В таких условиях облачный массив складывается из различных элементов: это могут быть отдельные глубокие конвективные ячейки с циклоническим вращением в восходящих потоках, как показано на рисунке 2.1(a), а также одна или несколько более развитых мезомасштабных конвективных систем с циклоническим движением внутри конвективных ячеек и мезомасштабными конвективными вихрями, как на рисунке 2.1(c), и более зрелые мезомасштабные конвективные системы с оставшимися вихрями, как на рисунке 2.1.1(c). Каждая из этих систем включает в себя вихревые структуры, называемые горячими башнями, на уровне конвективного масштаба и/или мезомасштабного конвективного вихря.

Тропический циклогенез — это не просто усиление существующего вихря, но и его трансформация в тропический циклон. Основной вопрос заключается в том, как облачный массив, подобный тому, что изображён на рисунке 2.1(d) или на примере рисунка 2.2, способствует преобразованию существующей синоптической циклонической циркуляции в структуру с характерными чертами тропического циклона. Одна из ключевых характеристик тропического циклона — это узкое кольцо максимальных ветров, расположенное на определённом расстоянии (обычно от 10 до 100 км) от центра шторма. Эта область, известная как радиус максимальных ветров, отличается высоким уровнем теплового баланса за счёт интенсивной вторичной циркуляции, которая, в свою очередь, формирует облачность в стене глаза шторма. За пределами этой стены возникают осадки в виде мезомасштабных спиралей.

Облачность, показанная на рисунке 2.1(d), играет роль в преобразовании существующей циклонической циркуляции в циклоническое возмущение. Процесс трансформации заключается в том, что конвективные и мезомасштабные возмущения завихренности, присутствующие в облачном массиве, как на рисунке 2.1(d), в итоге разделяются и смешиваются, способствуя формированию циклона.

2.2. Облачная система ТЦ на снимках видимого спектра

Спутниковые изображения тропических циклонов часто показывают обширные области высоких перистых облаков, а также перисто-слоистые формации. Например, на снимке урагана Катрина 2005 года, представленном на рисунке 2.3(а), видны неровные верхушки конвективных облаков, которые выступают сквозь гладкий слой перистой облачности. Отличительной чертой данного урагана является его ясно видимый глаз бури, обозначенный на изображении спиралевидной структурой облаков. На детализированном спутниковом изображении, отображённом на рисунке 2.3(б), заметны облачные вершины, наклонённые в сторону моря, формирующие скат вокруг центральной части бури. На рисунке 2.3(с), видна облачная граница, окружающая глаз бури и наклонённая под углом 45 градусов, создающая впечатление огромного амфитеатра с величественными трибунами. Эта массивная наклонённая облачность, известная как стенка глаза бури, освещается солнцем с восточной стороны на всех трёх представленных изображениях (рис. 2.3). Морскую поверхность не удаётся увидеть на снимках в видимом спектре (рис. 2.3(б, с)), поскольку её закрывает плотный слой низких слоистых и кучево-слоистых облаков, что является типичным для зрелого тропического циклона.

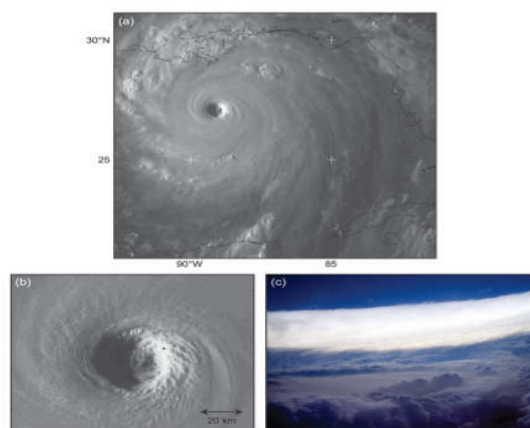


Рис. 2.3 (а) – видимое спутниковое изображение урагана Катрина (22:30 UTC 28 августа 2005). (b) – увеличенное спутниковое изображение глаза бури. (с) – вид из самолёта, летящего внутри глаза бури (23:34 UTC)

2.3. Глаз бури

Центральная зона бури, известная как глаз бури, отличается особенной динамикой и содержит два вида облаков: слоистые и кучево-слоистые, которые формируются горизонтально над зоной глаза и вдоль стенки глаза. На рисунке 2.4 эти облака изображены в контексте ветрового поля тропического циклона. Динамика этих облаков тесно связана с вихревыми процессами в тропическом циклоне. Данные для рисунка 2.4 были получены в результате изучения глаза урагана Уиллоуби в 1998 году. Пунктирная линия на рисунке указывает на предыдущее положение сжимающейся стенки глаза. Район глаза бури создаёт оптимальные условия для образования перемешанного слоя, так как осаджение в этой зоне приводит к формированию стабильного слоя в верхней части перемешанного слоя над тёплой морской поверхностью. На рисунке 2.3(с) видны вершины слоистых облаков с элементами кучевых облаков, расположенные в верхней части перемешанного слоя, рядом со стабильным оседающим слоем.

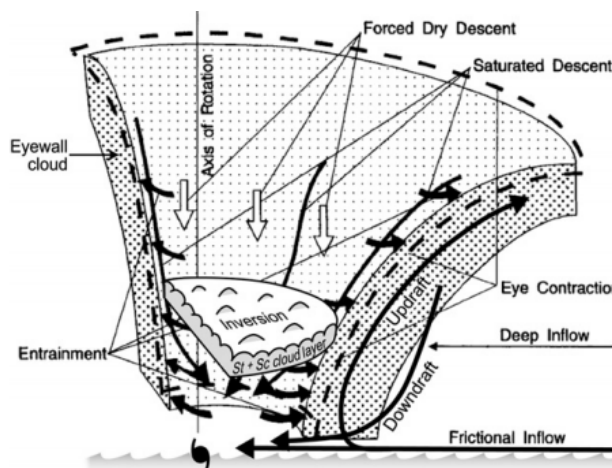


Рис 2.4 — Глаз и стена бури

Облачность, формирующая стенку глаза бури и освещённая солнцем на рисунке 2.3, отражает вторичную циркуляцию, которая представляет собой вертикальное движение в противоположность основной циклонической

циркуляции, как это видно на рисунке 2.4. Эта вторичная циркуляция получает энергию от турбулентных восходящих потоков и скрытой теплоты, перемещаясь над морем к стенке глаза бури. Высвобождение скрытого тепла в вертикальной части циркуляции стенки глаза бури способствует поддержанию её энергии, что важно для вертикальной циркуляции и сохранения мощности тропического циклона.

На рисунке 2.4 показано, как нисходящие потоки воздуха в области глаза бури и дивергенция на нижних уровнях способствуют стабилизации воздуха в стенке глаза и его турбулентному перемешиванию. Это перемешивание изображено на рисунке жирными стрелками вдоль края стенки глаза бури.

Также на рисунке 2.4 представлены два типа нисходящих потоков воздуха, зафиксированных в ходе самолётных наблюдений. Снаружи стенки глаза бури отрицательная плавучесть вызывает нисходящие потоки на нижних уровнях, которые сливаются с фрикционными потоками под стенкой и входят в пограничный слой воздуха в области глаза бури. На более высоких уровнях вдоль внутреннего края стенки тонкий слой влажного воздуха спускается в стенку, где происходит перемешивание с сухим воздухом глаза бури. Испарение облачных частиц охлаждает воздух, создавая отрицательную плавучесть и формируя каскад, похожий на туман, который смешивается с сухим воздухом возле стенки глаза бури. Нисходящий поток воздуха на внутренней стороне стенки также был зафиксирован при самолётных измерениях вертикальной скорости.

2.4. Микрофизические процессы облаков в зоне стены глаза бури

В поднимающемся потоке вторичной циркуляции тропического циклона водяные капли стремительно увеличиваются в размерах, что приводит к

созданию широкой зоны сильных осадков в районе стенки глаза урагана. Основные действия облачных элементов — это их рост и осаждение, как показано на рисунке 2.5. В этой зоне стенки большинство облачных элементов образуется в результате процесса тёплого дождя, когда капли воды конденсируются и ускоренно увеличиваются за счёт коалесценции ниже точки замерзания и выпадают в виде дождя, не успев превратиться в лед.

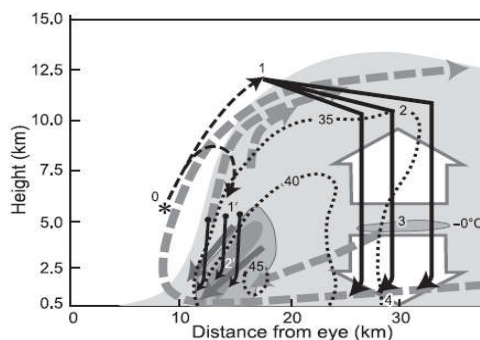


Рис 2.5 — Циркуляция воздуха в стене глаза бури

Тем не менее, предполагается, что основная масса облачных элементов в стенке глаза шторма и около его внутреннего ядра находится в замороженном состоянии. Немного выше точки замерзания, ледяные частицы начинают формироваться и увеличиваться в размерах за счет процесса замерзания, что ведет к образованию града. Наиболее тяжелые градины падают с высокой скоростью (достигая нескольких метров в секунду), тают и превращаются в капли (как показано на рисунке 2.5, траектория 0-1'-2'). В то же время, большинство ледяных частиц в облаках стенки глаза шторма представляют собой агрегаты (кластеры) ледяных частиц (группы кристаллов, соединенных вместе), которые падают гораздо медленнее (примерно 1 м/с). Эти агрегаты и другие медленно падающие ледяные частицы выносятся наружу под действием радиального ветра (см. рис. 2.5) и переносятся на значительные расстояния вокруг шторма благодаря мощному тангенциальному ветру циклона (см. рис. 2.6, траектория 0-1-2-3-4). В результате, ледяные частицы распространяются

наружу. Когда агрегаты ледяных частиц проходят через слой оттаивания, обычно в районе осадков, расположенном на определенном расстоянии от стенки, они создают светлые полосы на уровне чуть ниже 0°C в радарных отражениях, что указывает на стратиформные осадки. Структура этих осадков показана на рисунке 2.6.

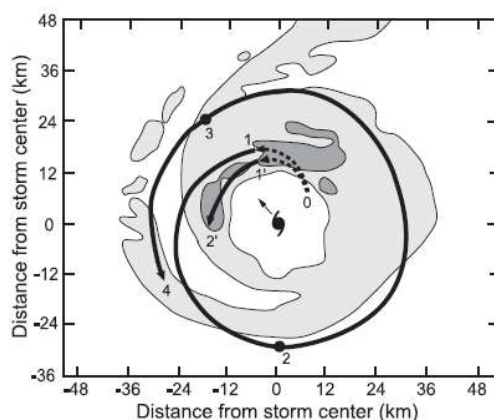


Рис. 2.6 — Горизонтальная проекция области осадков

Иллюстрация 2.7 представляет собой уточненную визуализацию микрофизических процессов, происходящих в зоне перехода в облаках, окружающих глаз циклона (отмечено пунктирной линией). Этот график является результатом двадцатилетнего исследования, подкрепленного данными из 230 полетов, наблюдающих за облачными формациями тропических циклонов. Данные на диаграмме соответствуют информации, представленной на рисунке 2.5. Ниже зоны смещения (промежуток между приблизительно 0°C и -5°C , где присутствуют водяные капли и ледяные кристаллы), облачные капли интенсивно увеличиваются в размерах за счет коалесценции, и значительное количество из них достигает этой зоны.

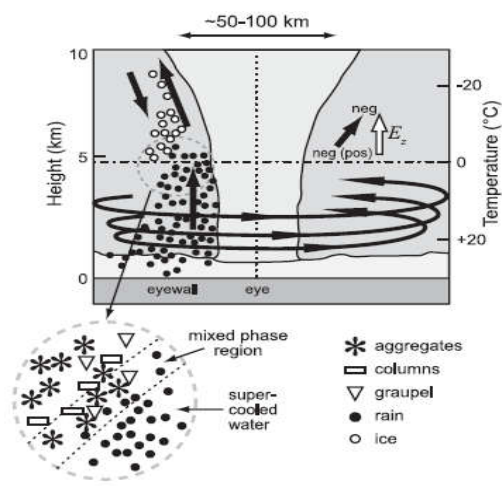


Рис. 2.6 — Формирование облачных частиц в тропическом циклоне

Над зоной смешения облака преимущественно состоят из льда, что обусловлено частыми столкновениями между переохлажденными каплями и множеством ледяных частиц. В этой области концентрация переохлажденных капель обычно мала (менее $0,5 \text{ г/м}^3$) и возникает преимущественно в сильных восходящих потоках с интенсивностью более 5 м/с , хотя не все такие потоки содержат переохлажденные капли. Эти капли конденсируются при температуре ниже 0°C , поднимаются вверх благодаря восходящим потокам и существуют лишь короткое время до того, как столкнутся с уже имеющимися ледяными частицами. Вставка на рисунке 2.7 демонстрирует увеличенный вид облачности в стене глаза бури, где присутствуют переохлажденные частицы. Эту область можно разделить на три сегмента: внутренний край, переходящий в зону глаза бури, центральную область и внешний край стены глаза бури. Переохлажденные капли располагаются во внутреннем крае стены, где свежееобразованные капли еще не встретились с ледяными частицами, так как они возникли недалеко от вершины облачного массива стены.

Центральная часть вставки на рисунке 2.7 изображает взаимодействие ледяных кристаллов с переохлажденными каплями в зоне смешения. Капли замерзают в результате нуклеации и роста, а затем сливаются, образуя

переохлажденные облачные капли. Градины образуются в результате замерзания и последующего роста за счет собирания переохлажденных капель. Процесс замерзания в диапазоне от $\sim 0^{\circ}\text{C}$ до -5°C приводит к формированию большого количества вторичных ледяных частиц. Высокая плотность ледяных частиц (до сотен на литр) способствует этому процессу. Эти вторичные ледяные частицы соединяются со снежинками, выпадая в зоне оттока стены глаза бури, и образуют переохлажденные частицы, освобожденные от ледяных частиц. Кристаллическая структура тонких ледяных частиц возникает благодаря вторичному механизму образования и дальнейшему росту кристаллов из-за осаждения пара, что сложно увидеть при самолетных наблюдениях. При температуре от $\sim 0^{\circ}\text{C}$ до -5°C кристаллическая структура обычно представлена столбцами. Как показано на рисунке 2.7, эти столбцы входят в состав совокупности, включающей в себя переохлажденные водяные капли, градины и другие ледяные частицы внутри восходящих потоков облачного массива стены глаза бури.

Внешний край облачного массива стены глаза бури, как видно на рисунке 2.7, доминирует ледяная облачность с высокой концентрацией кристаллов. Большинство этих частиц мелкие и, вероятно, образованы вторичными процессами кристаллообразования. Тем не менее, в этой зоне также формируются крупные совокупности ледяных частиц. Модель, представленная на рисунке 2.7, основана на самолетных наблюдениях, проведенных на высоте 6 км в стене глаза бури и внутреннем ядре урагана Норберт в 1984 году. В целом, распределение ледяных частиц соответствует процессам, изображенным на рисунке 2.7. Высокая концентрация мелких кристаллов (размером от 0,05 до 0,5 мм), являющаяся результатом вторичных процессов образования ледяных частиц, наблюдается вблизи стены глаза бури. Вокруг этой зоны находится область с более крупными кристаллами (размером более 1,05 мм). Большие кристаллы представляют собой градины, которые из-за своей высокой скорости

падения остаются в зоне стены, откуда и выпадают. Частицы, находящиеся на расстоянии 50 км от стены, представляют собой совокупности и следуют траектории 0-1-2-3-4, показанной на рисунке 2.6; они выносятся наружу, циркулируют вокруг центра шторма и выпадают в виде стратиформных осадков из зоны стены глаза бури.

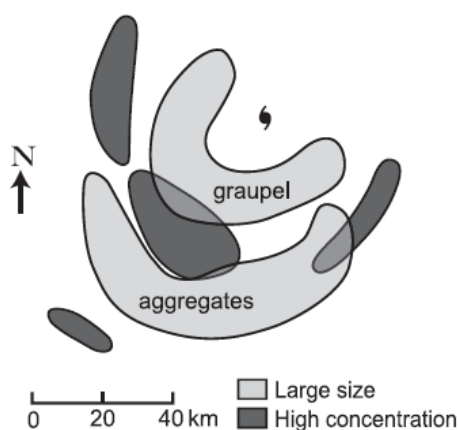


Рис. 2.7 — Распределение ледяных частиц

Изучение микрофизических аспектов облаков в тропических циклонах представляет собой сложную задачу, тесно связанную с их динамикой. Точность, с которой современные модели могут воспроизвести эти процессы, ещё предстоит определить. В исследовании Роджерса и его коллег (2007) было проведено сравнение реальных наблюдений с модельными данными по вертикальной скорости и отражательной способности в тропических циклонах, и были обнаружены определённые совпадения. Тем не менее, остаётся множество неизведанных вопросов, таких как механизмы роста облачных частиц, баланс между разными типами гидрометеоров, процессы их формирования и разрушения, а также пути крупномасштабных и мезомасштабных воздушных потоков внутри циклона, включая конвективные движения в облачном слое и зонах осадков. На данный момент моделирование

не способно полностью учесть все эти факторы, что делает прогнозирование осадков при переходе урагана на сушу значительной проблемой.

2.5. Облачность внешней зоны ТЦ

Основной характеристикой осадков в тропическом циклоне является их спиральная структура. Иллюстрация 2.8 демонстрирует упрощённое изображение характерных зон осадков и глаза шторма в таком циклоне. На этом изображении виден круг, разделяющий тропический циклон на внешнюю и внутреннюю зоны, последняя из которых подчиняется циклонической вихревой циркуляции. Также на рисунке показаны две стены глаза бури, где первичная стена со временем может быть заменена вторичной. Существуют три основных типа зон осадков. Периферийная зона осадков, расположенная далеко от центра шторма, состоит из конвективных облаков, которые вливаются в обширное поле ветра, переходящее в ураганный вихрь. Эта зона находится настолько далеко от глаза бури, что её вертикальная конвективная структура не зависит от внутреннего циклонического вихря.

Центральная зона осадков обычно остаётся неподвижной относительно центра циклона. Причины формирования таких зон осадков до сих пор не ясны. Уиллоуби и его коллеги (1984, 1988) предполагали, что квазистационарные зоны осадков возникают в результате взаимодействия ветрового поля вихря с крупномасштабными воздушными потоками вокруг центра шторма, однако это предположение не было подтверждено. В некоторых случаях, подветренная сторона циклона, находящаяся во внешней зоне, имеет вертикальную конвективную структуру, аналогичную той, что присутствует в периферийной зоне осадков, то есть не зависит от динамики вихря тропического циклона. В то же время, большая часть центральной зоны осадков находится внутри циклона,

и её вертикальная конвективная структура подвержена влиянию циклонического вихря. Вторичная зона осадков, расположенная во внутренней части циклона, обычно меньше по размеру и более кратковременна по сравнению с центральной зоной. Часто вторичная зона осадков сливается с центральной зоной или стеной глаза бури.

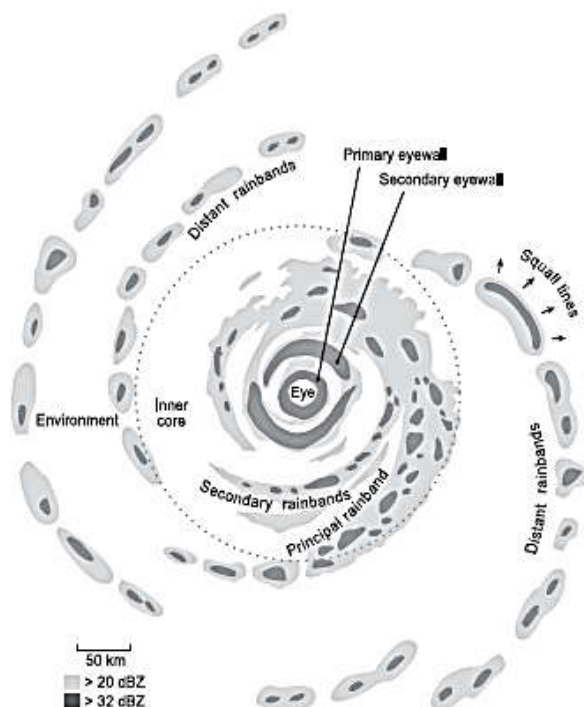


Рис. 2.8 — Схема тропического циклона в северном полушарии

3. Исследование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана

3.1. Определение тропических циклонов по спутниковым снимкам

Тропические циклоны обычно формируются в районах, где нет плотной сети метеорологических наблюдений. Однако с развитием спутниковой технологии стало возможным не только своевременно выявлять такие явления, но и непрерывно следить за их перемещением и эволюцией. Спутниковые данные детально показывают структуру облаков, что способствует более глубокому пониманию физики процессов, происходящих в атмосфере.

Развитие тропического циклона проходит пять основных фаз: тропическое возмущение, тропическая депрессия, тропический шторм, ураган или тайфун и, наконец, стадия распада циклона. На спутниковых изображениях тропическое возмущение видно как увеличение объёма и высоты кучево-дождевых облаков, что свидетельствует о нарастании конвективной активности. Облачный покров на этой стадии состоит из разнообразных облаков и имеет нечеткую форму. Признаком начала возмущения является концентрация и усиление кучево-дождевых облаков в определённом месте, что указывает на усиление конвекции. Тропические возмущения чаще всего возникают в зонах облачных полос.

Тропическая депрессия проходит два этапа: её формирование и переход в тропический шторм. На первом этапе формируется плотный облачный массив с перистыми облаками. В процессе перехода в шторм облачность приобретает форму дуги, уплотняется и увеличивается в размерах. В передней части депрессии развиваются мощные кучево-дождевые облака, а сзади - облачные

скопления. Облачный массив принимает форму дуги, обращённой выпуклостью на восток, и постепенно искривляется, образуя спираль, напоминающую запятую. В "голове" запятой активно развивается конвекция, именно здесь обычно находится центр депрессии.

На спутниковых снимках тропический шторм выглядит как плотный облачный массив в форме дуги или спирали. Эта стадия отмечается началом формирования тропического циклона. Характерной чертой тропического шторма является появление перистых облаков, которые формируются при ветрах около 54 км/ч и служат индикатором углубления циклона. Перистые облака образуют полосы, расходящиеся от центра вихря и маскирующие центр циклона.

На стадии урагана или тайфуна, которая является пиком развития циклона, наблюдается компактный облачный массив в форме диска с чёткими краями. От центра отходят спиральные полосы облаков, а в самом центре виден "глаз" бури. Чем интенсивнее циклон, тем больше его облачная система и тем яснее виден "глаз".

Когда тропический циклон начинает распадаться, уменьшается плотность перистых облаков, нарушается форма облачного массива, исчезают чёткие границы, что свидетельствует о потере внутренней структуры.

Изучение спутниковых снимков в видимом и инфракрасном диапазонах показывает разнообразие облачных структур в системе тропических циклонов. Наблюдается ячеистая структура облаков, а также полосовая и грядовая структура, что свидетельствует о сложности и многообразии процессов внутри тропических циклонов.

3.2. Составление базы данных

С помощью сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database, на котором имеются списки, названия, траектории, скорости ветра (максимальные и ежедневные), данные по осадкам, давлению, датам и времени существования циклонов с 1997 года.

Кроме того, был использован сайт NASA World View, располагающий обширным архивом спутниковых снимков и возможностью настройки по интересующим темам. Был сформирован архив тропических циклонов по данным сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database, и используем различные настройки сайта NASA World View для описания метеовеличин, полей осадков, построения траектории циклона. Для работы были использованы космические снимки в видимом диапазоне спектра, а также дополнительные слои температуры морской поверхности, полей осадков, скорости ветра и траекторий движения циклонов.

На сайте Zoom Earth был сформирован архив данных по максимальной скорости в тропических циклонах по срокам.

В ходе работы были рассмотрены 60 наиболее интересных случаев формирования тропических циклонов за промежуток времени от 2019 года по 2023 год.

Далее в работе рассматриваются примеры анализа условий формирования тропических циклонов.

3.3. Анализ условий формирования и эволюции тропических циклонов

3.3.1. Тайфун Вутип (19.02.2019 - 01.03.2019)

Тайфун "Вутип" установил рекорд как самый сильный тайфун в феврале в истории метеорологических наблюдений, превзойдя предыдущий рекордсмена - тайфун "Хигос" 2015 года. Он стал третьим тропическим циклоном, вторым тропическим штормом и первым тайфуном тихоокеанского сезона 2019 года. "Вутип" сформировался 16 февраля 2019 года из зоны низкого давления, которая двигалась на запад, проходя южнее Федеративных Штатов Микронезии, и 18 февраля преобразовался в тропическую депрессию. Затем депрессия была переклассифицирована в тропический шторм, и уже на следующий день получила имя "Вутип" от Японского метеорологического агентства. Шторм усиливался, двигаясь на северо-запад, и 23 февраля достиг первой категории интенсивности, проходя к юго-западу от о. Гуам. Со скоростью ветра 270 км/ч, "Вутип" был признан первым супер тайфуном категории 5, зарегистрированным в феврале, согласно данным Объединенного центра предупреждения о тайфунах. После этого "Вутип" пережил цикл замены стенки глаза и ослабел, но 24 февраля вновь усилился. На следующий день тайфун снова усилился, достигнув силы ветра, соответствующей 5-й категории. Однако вскоре "Вутип" начал быстро терять силу из-за сильного вертикального сдвига ветра и 2 марта полностью рассеялся над Филиппинским морем.

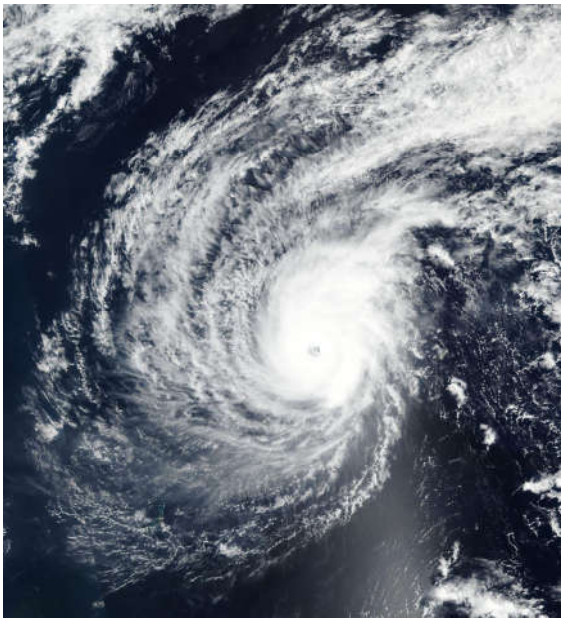
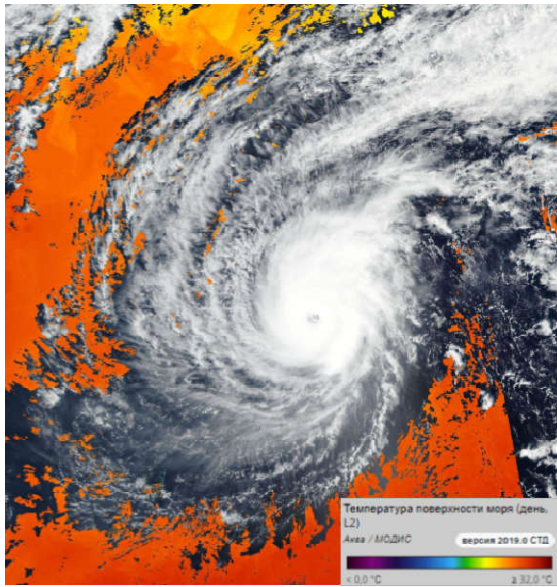
На рис. 3.3.1.1 представлены снимки тропического циклона Вутип с наложенными на них слоями поля осадков, температуры поверхности океана и траектории перемещения ТЦ.

Анализ рис. 3.3.1.1(а) показал, что облачная структура циклона характеризуется плотной облачностью в центре циклона и интенсивными выбросами перистых облаков, которые говорят о том, что циклон находится в стадии интенсивного развития.

Из рис. 3.3.1.1(б) следует, что циклон формируется на фоне повышенных значений ТПО (28 - 29°). Причём к северу от циклона наблюдается область с температурами порядка 25°.

Анализируя рис. 3.3.1.1(в) можно сказать, что область наиболее интенсивных осадков (более 25 мм/ч) связана с глазом циклона. Скорость выпадения осадков в центральной плотной облачности соответствует 10 - 20 мм/ч.

По рис. 3.3.1.1(г) можно понять, что траектория перемещения циклона проходила с юго-востока на северо-запад, севернее островов Папуа, Индонезии и Филиппин.

	
3.3.1.1(а) – снимок в видимом спектре	3.3.1.1(б) – снимок с наложением значений ТПО

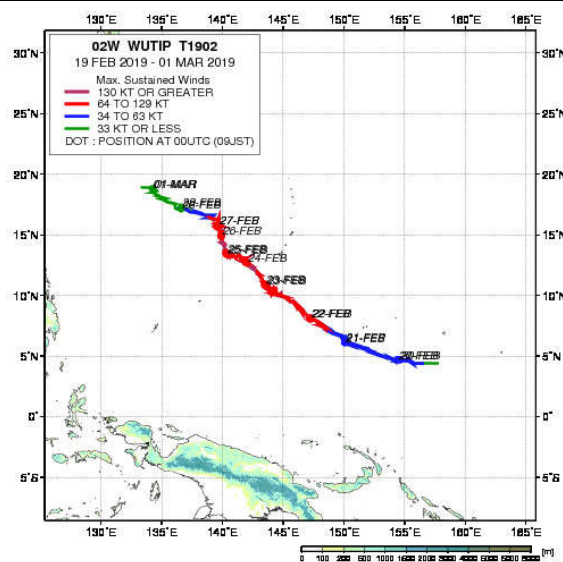
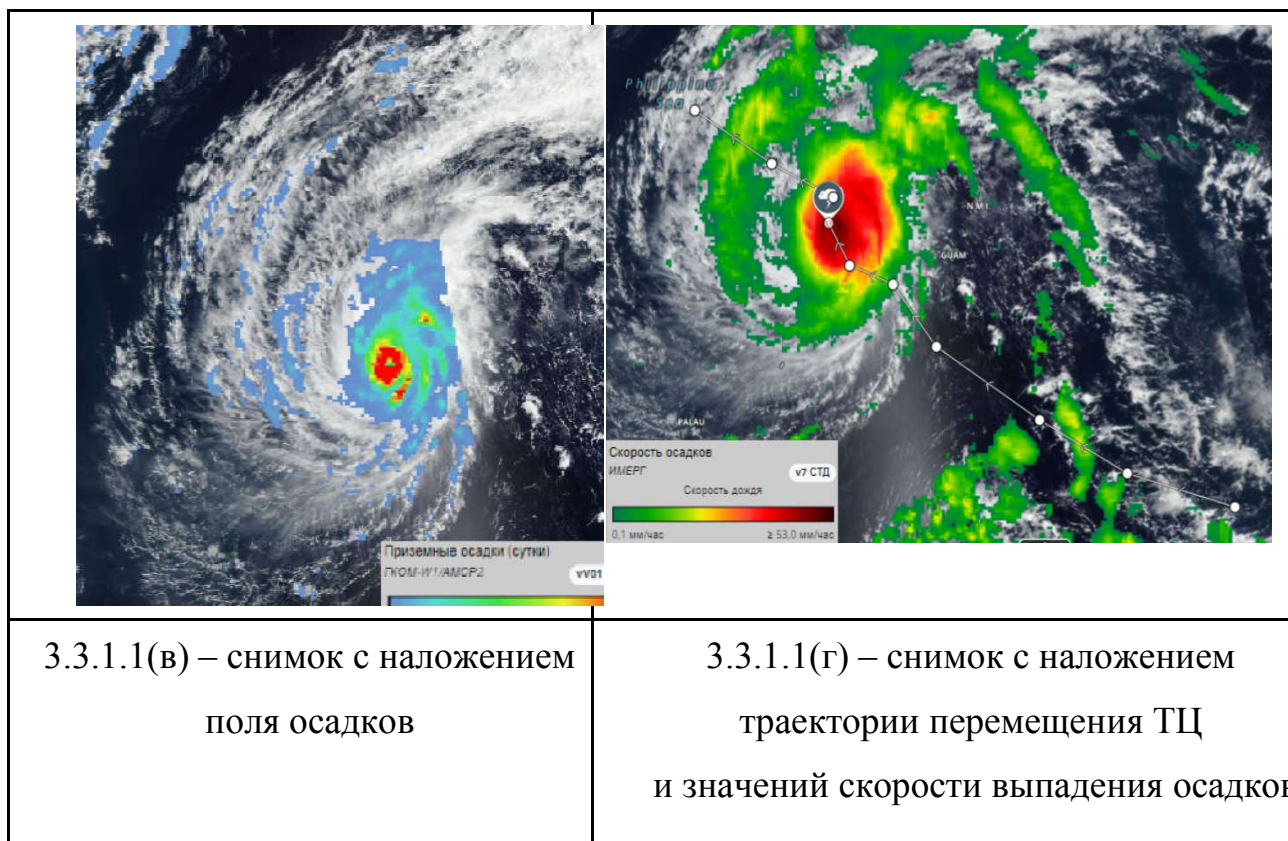


Рис. 3.3.1.2 — подробная траектория ТЦ с сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database

3.3.2. Тайфун Хайшен (31.08.2020 - 08.09.2020)

Тайфун Хайшен, стал первым супертайфуном тихоокеанского тайфунного сезона 2020 года и отличался особой мощностью. Он был десятым по счету штормом, получившим имя, и пятым тайфуном этого сезона. Его формирование связано с неструктурированной зоной низкого давления у побережья о. Гуам. Пока возмущение двигалось на юго-запад и интенсивно формировалось, Центр предупреждения о тропических циклонах (JTWC) выпустил предупреждение о возможном формировании тропического циклона (TCFA). Затем, 1 сентября, система преобразовалась в тропическую депрессию. Согласно Японскому метеорологическому агентству, депрессия эволюционировала в тропический шторм Хайшен, продолжая движение на юго-запад. Около полудня 2 сентября Филиппинское управление атмосферных, геологических и астрономических служб объявило, что Хайшен вошел в зону их ответственности и был переименован в Кристину. В тот же день Хайшен превратился в тайфун. 3 сентября тайфун значительно усилился, дрейфуя на северо-запад в исключительно благоприятных условиях, достигнув статуса тайфуна третьей категории с четко выраженным глазом, после чего прошел через цикл замены стенки глаза. После этого усиление возобновилось, и JTWC оценило скорость ветра в 250 км/ч (135 узлов), когда Хайшен достиг пика своей мощности как супертайфун четвертой категории с новым, симметричным и ясным глазом.

Когда тайфун двигался на север к суше, тепловые условия океана стали менее благоприятными для поддержания такой сильной системы. Несмотря на снижение центрального давления, скорость ветра в системе начала снижаться из-за разрушения структуры. Глаз тайфуна потерял свою первоначальную форму, а края стали неровными на спутниковых снимках, а метод Дворжака показал, что Хайшен стал ослабевать. 5 сентября тайфун начал терять свой глаз, поскольку внутренняя стенка глаза сжималась, и вскоре он ослаб до

уровня тайфуна третьей категории. 6 сентября Хайшен достиг Японии и Южной Кореи, будучи сильным тайфуном второй категории.

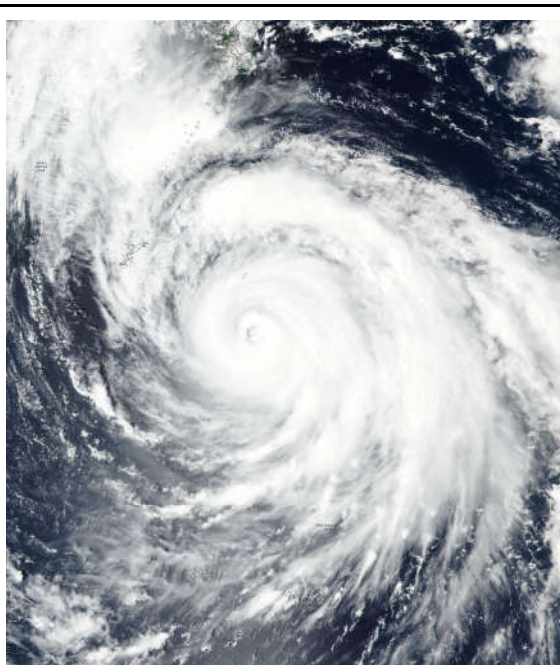
На рис. 3.3.2.1 представлены снимки тропического циклона Хайшен с наложенными на них слоями поля осадков, температуры поверхности океана и траектории перемещения ТЦ.

Анализ рис. 3.3.2.1(а) показал, что облачная структура циклона характеризуется плотной облачностью в центре циклона и интенсивными выбросами перистых облаков, которые говорят о том, что циклон находится в стадии интенсивного развития.

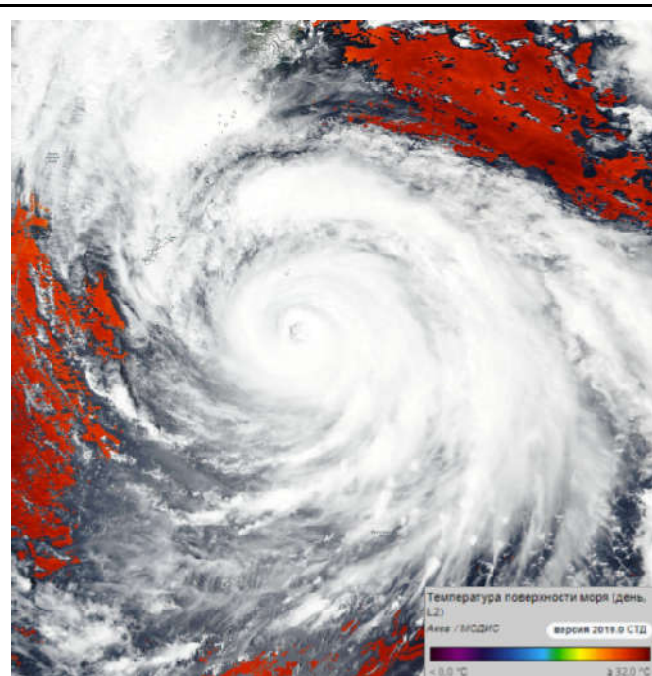
Из рис. 3.3.2.1(б) следует, что циклон формируется на фоне повышенных значений ТПО ($30 - 32^{\circ}$).

Анализируя рис. 3.3.2.1(в) можно сказать, что область наиболее интенсивных осадков (более 25 мм/ч) связана с глазом циклона. Скорость выпадения осадков в центральной плотной облачности соответствует 5 - 15 мм/ч.

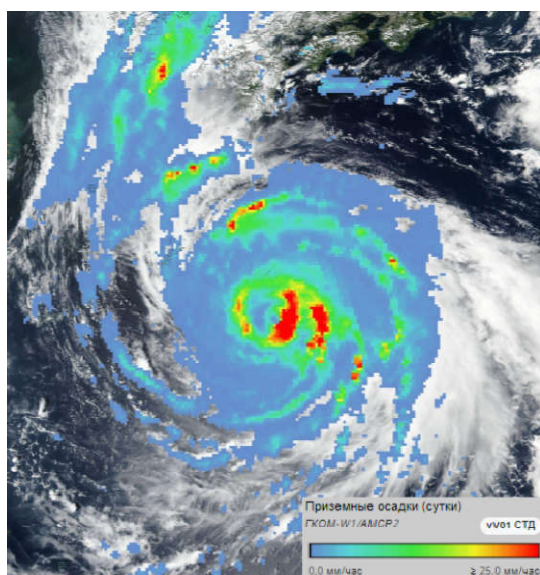
По рис. 3.3.2.1(г) можно понять, что образовавшись в Тихом океане, южнее Японских островов, циклон двигался на запад, но по итогу повернул на север, в сторону Корейского полуострова.



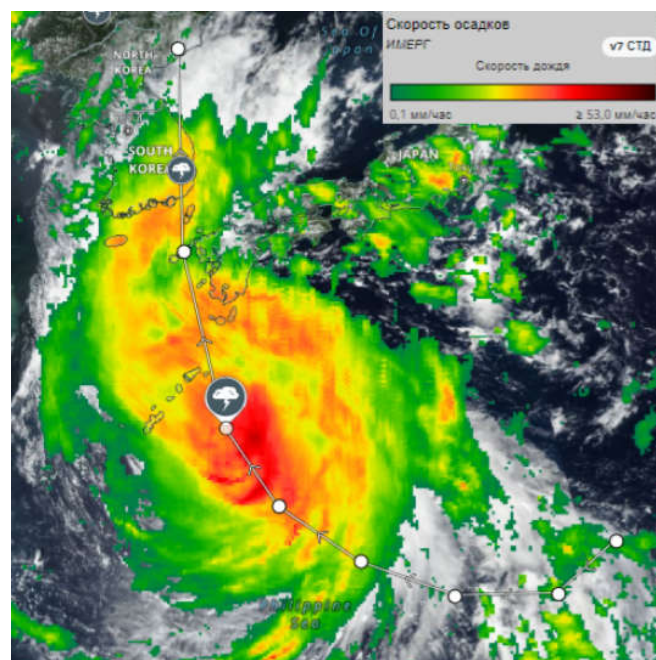
3.3.2.1(а) – снимок в видимом спектре



3.3.2.1(б) – снимок с наложением значений ТПО



3.3.2.1(в) – снимок с наложением поля осадков



3.3.2.1(г) – снимок с наложением траектории перемещения ТЦ и значений скорости выпадения осадков

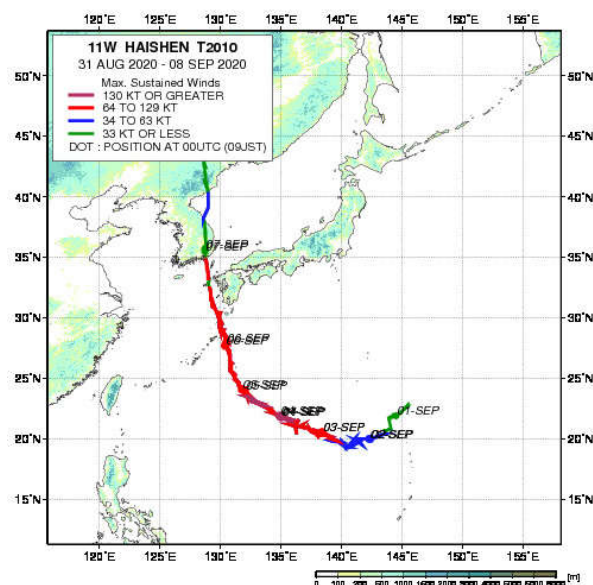


Рис. 3.3.2.2 — подробная траектория ТЦ с сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database

3.3.3. Тайфун Ньятох (29.11.2021 - 04.12.2021)

Утром 26 ноября Центр предупреждения о тропических циклонах зафиксировал появление конвективной зоны на расстоянии 1393 км к юго-востоку от Гуама. На следующий день Японское метеорологическое агентство (JMA) также определило эту систему как зону низкого давления. В 06:00 по координированному всемирному времени 28 ноября JTWC издало предупреждение о формировании тропического циклона, учитывая развитие нечетко очерченного центра системы, и к полуночи JMA повысило статус системы до тропической депрессии. В 15:00 того же дня JTWC присвоило системе обозначение 27W, а через шесть часов повысило её до тропического шторма. В полночь JMA назвало шторм Ньятох. 1 декабря в 00:00 JMA классифицировало его как сильный тропический шторм, а через пятнадцать часов JTWC объявило его тайфуном первой категории, отметив развитие глаза на микроволновых снимках. В 18:00 JMA подтвердило это обновление. К 03:00 следующего дня шторм усилился до тайфуна второй категории и временно сформировал неровный глаз. В тот же день Ньятох неожиданно усилился до

супертайфуна четвертой категории из-за взаимодействия струйных течений и достиг максимальной интенсивности с устойчивым ветром 185 км/ч. Однако пиковая интенсивность была кратковременной, так как сильный ветровой сдвиг, сухой воздух и пониженные температуры поверхности моря привели к быстрому ослаблению системы до тайфуна первой категории к 18:00 UTC. 4 декабря в 06:35 JMA объявило Ньятох остаточным минимумом.

На рис. 3.3.3.1 представлены снимки тропического циклона Ньятох с наложенными на них слоями поля осадков, температуры поверхности океана и траектории перемещения ТЦ.

Анализ рис. 3.3.3.1(а) показал, что облачная структура циклона характеризуется плотной облачностью в центре циклона и интенсивными выбросами перистых облаков, которые говорят о том, что циклон находится в стадии интенсивного развития.

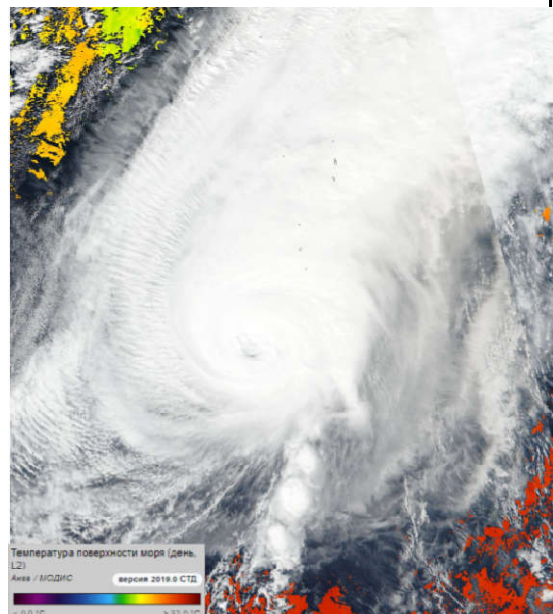
Из рис. 3.3.3.1(б) следует, что циклон формируется на фоне повышенных значений ТПО (30 - 32°). Причём к северу от циклона наблюдается область с температурами порядка 20 - 25°.

Анализируя рис. 3.3.3.1(в) можно сказать, что область наиболее интенсивных осадков (более 25 мм/ч) связана с глазом циклона. Скорость выпадения осадков в центральной плотной облачности соответствует 10 - 15 мм/ч.

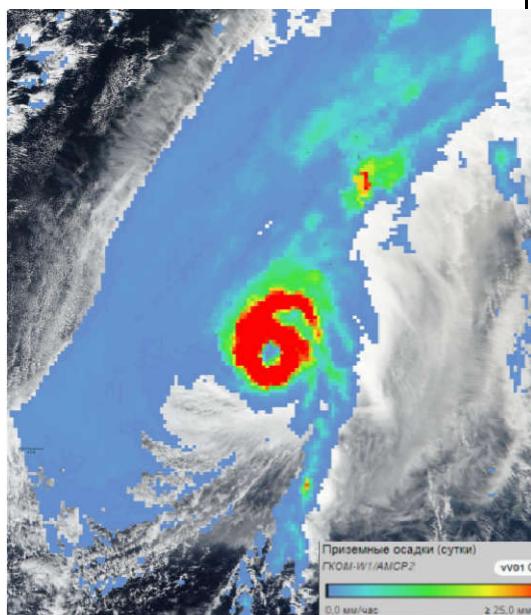
По рис. 3.3.3.1(г) можно понять, что траектория перемещения циклона проходила в водах Тихого океана южнее Японских островов. Образовавшись, циклон двигался на восток, но позже повернул по часовой стрелке, и стал двигаться на северо-восток.



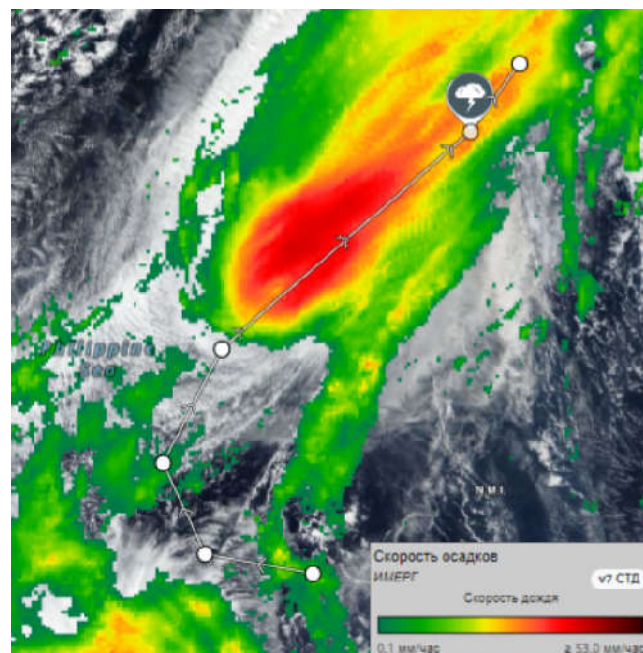
3.3.3.1(а) – снимок в видимом спектре



3.3.3.1(б) – снимок с наложением значений ТПО



3.3.3.1(в) – снимок с наложением поля осадков



3.3.3.1(г) – снимок с наложением траектории перемещения ТЦ и значений скорости выпадения осадков

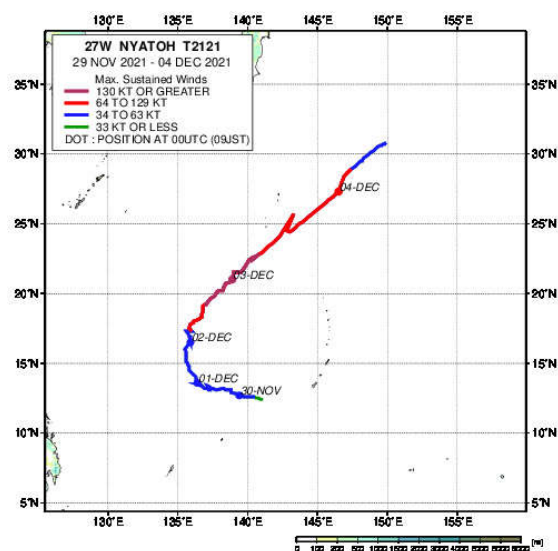


Рис. 3.3.3.2 — подробная траектория ТЦ с сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database

3.3.4. Тайфун Нанмадол (12.09.2022 - 20.09.2022)

Тайфун Нанмадол, ставший четырнадцатым именованным штормом и седьмым тайфуном, а также вторым супертайфуном сезона 2022 года в Тихом океане, оказался самым мощным тропическим циклоном в мире за этот год. Он сформировался из возмущения к востоку от о. Иводзимы, которое 12 сентября было классифицировано Объединенным центром предупреждения о тайфунах (JTWC) как тропическая депрессия. В тот же день, достигнув силы тропического шторма, он получил от Японского метеорологического агентства (JMA) имя Нанмадол.

С каждым днем шторм набирал силу и через два дня был уже классифицирован как тайфун. Его интенсивность резко возросла, и скорость ветра увеличилась на 45 км/ч. 17 сентября Нанмадол достиг пика со скоростью ветра в 195 км/ч и кратковременно попал в зону ответственности Филиппин, где его называли Джози. После достижения максимальной мощности тайфун начал процесс замены стенок глаза и двинулся на север к Японии, где 18 сентября обрушился на берег Южного Кюсю. К 19 сентября он ослаб до

сильного тропического шторма, а на следующий день перешел во внетропический минимум.

В преддверии приближения тайфуна в Японии была проведена массовая эвакуация более полумиллиона человек, а JMA выпустило для Кагосимы специальное предупреждение. В Кагосиме 8 000 жителей были вынуждены покинуть свои дома, а 12 000 человек нашли убежище в эвакуационных центрах. В Южной Корее из-за тайфуна 7 000 домохозяйств остались без электричества. В результате стихийного бедствия в Японии были зарегистрированы четыре летальных исхода и более 115 случаев травм, большинство из которых оказались несерьезными.

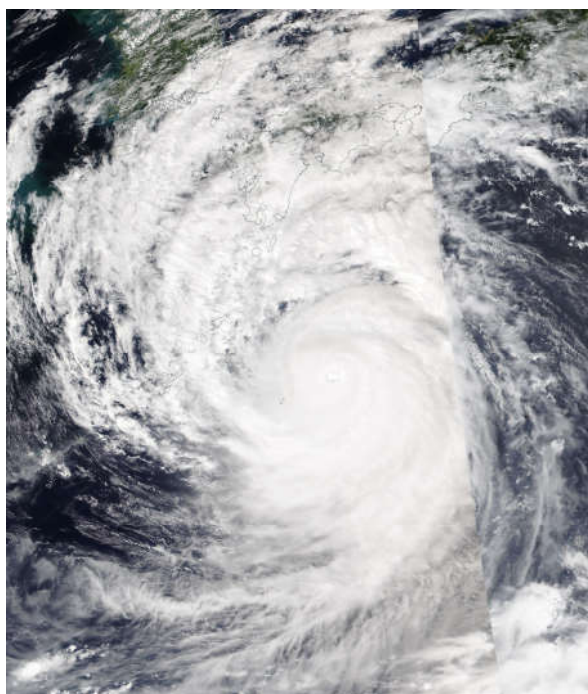
На рис. 3.3.4.1 представлены снимки тропического циклона Нанмадол с наложенными на них слоями поля осадков, температуры поверхности океана и траектории перемещения ТЦ.

Анализ рис. 3.3.4.1(а) показал, что облачная структура циклона характеризуется плотной облачностью в центре циклона и интенсивными выбросами перистых облаков, которые говорят о том, что циклон находится в стадии интенсивного развития.

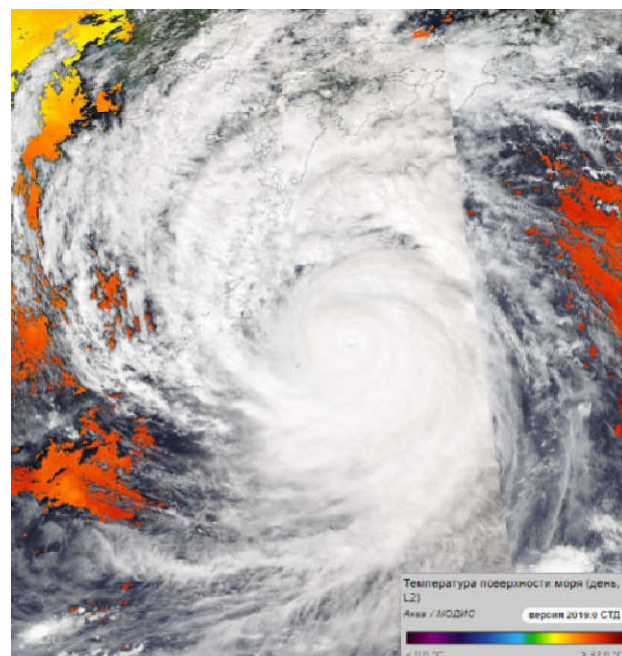
Из рис. 3.3.4.1(б) следует, что циклон формируется на фоне повышенных значений ТПО (28 - 30°). Причём к северу от циклона наблюдается область с температурами порядка 20 - 25°.

Анализируя рис. 3.3.4.1(в) можно сказать, что область наиболее интенсивных осадков (более 25 мм/ч) связана с глазом циклона. Скорость выпадения осадков в центральной плотной облачности соответствует 10 - 14 мм/ч.

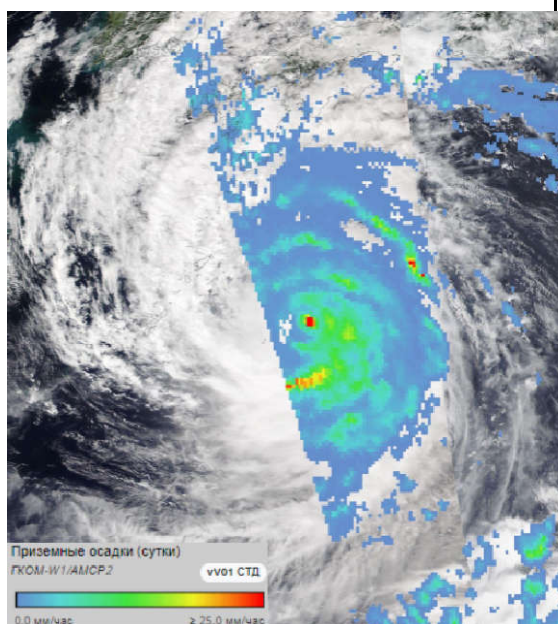
По рис. 3.3.4.1(г) можно понять, что циклон образовался в Тихом океане южнее Японских островов. Двигаясь на запад, он понемногу поворачивал на север, и по итогу обрушился на южные острова Японии, повернув на северо-восток, пройдя по её территории.



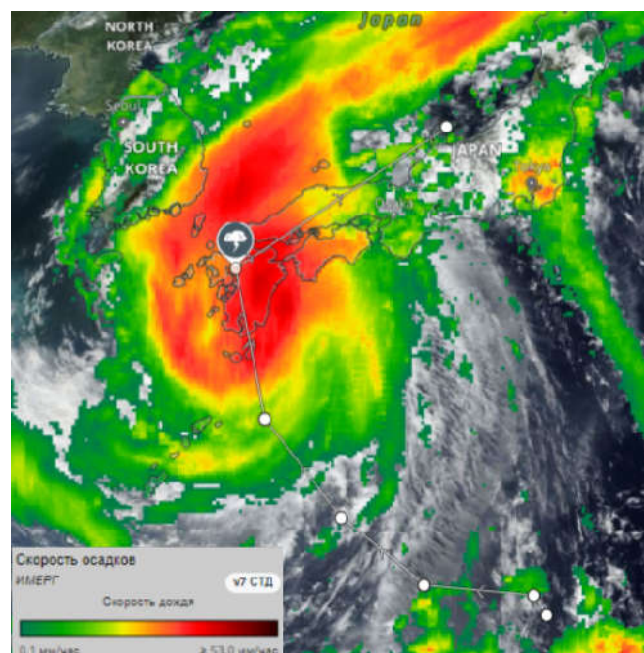
3.3.4.1(а) – снимок в видимом спектре



3.3.4.1(б) – снимок с наложением значений ТПО



3.3.4.1(в) – снимок с наложением поля осадков



3.3.4.1(г) – снимок с наложением траектории перемещения ТЦ и значений скорости выпадения осадков

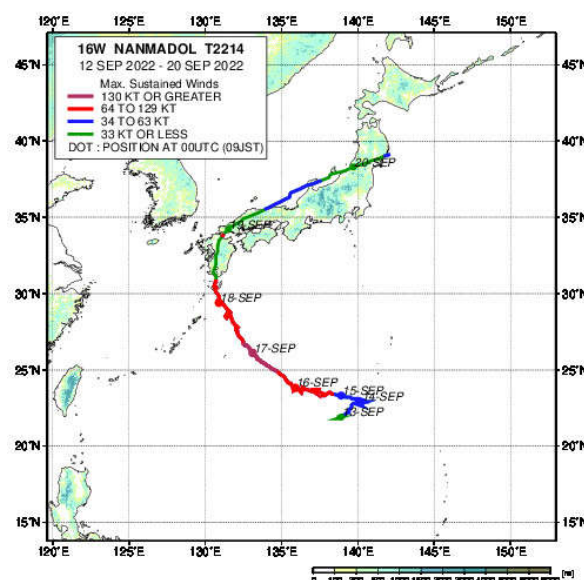


Рис. 3.3.4.2 — подробная траектория ТЦ с сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database

3.3.5 Тайфун Мавар (20.05.2023 - 03.06.2023)

Тайфун Мавар, который стал одним из наиболее мощных тропических циклонов в истории наблюдений за май и самым сильным в мире в 2023 году, получил свое имя, означающее "Роза" на малайском языке. Он был вторым именованным штормом, первым тайфуном и первым супертайфуном тихоокеанского сезона 2023 года. Мавар развился из зоны низкого давления к юго-юго-западу от Чуукской лагуны, которая 19 мая превратилась в тропическую депрессию. После того как его сила колебалась и он достиг статуса тропического шторма, Мавар усилился до супертайфуна, соответствующего 4-й категории по шкале Саффира-Симпсона. Он прошел через цикл замены стенки глаза и снова усилился, достигнув пиковых значений скорости ветра в 295 км/ч (185 миль в час) по данным JTWC, что соответствует 5-й категории супертайфуна. Затем Мавар ослабел, двигаясь вдоль юго-западного края субтропического максимума, что изменило его курс на север от Филиппин и восток от Тайваня. Пересекая о. Окинаву как тропический шторм,

Мавар в конечном итоге стал внетропическим циклоном, двигаясь на северо-восток по морю и рассеиваясь к востоку от Камчатки.

Проходя к северу от о. Гуам 24 мая как тайфун 4-й категории, Мавар принес с собой ураганные ветры и ливневые дожди, став самым сильным штормом, поразившим остров с 2002 года. Президент США Джо Байден объявил о. Гуам зоной стихийного бедствия 27 мая, что позволило выделить федеральные средства. Предполагается, что два человека погибли в водах о. о. Гуам, а на о. Тайвань была зарегистрирована одна смерть, связанная с тайфуном. Мавар вызвал смерть одного человека, одну легкую травму и ущерб в размере 3584 доллара США, проходя недалеко от восточных Филиппин. В Японии из-за сильных дождей погибли два человека, четверо пропали без вести, и было отключено электричество как минимум в 8900 домах. Общий ущерб от Мавара оценивается в 4,3 миллиарда долларов США.

На рис. 3.3.5.1 представлены снимки тропического циклона Мавар с наложенными на них слоями поля осадков, температуры поверхности океана и траектории перемещения ТЦ.

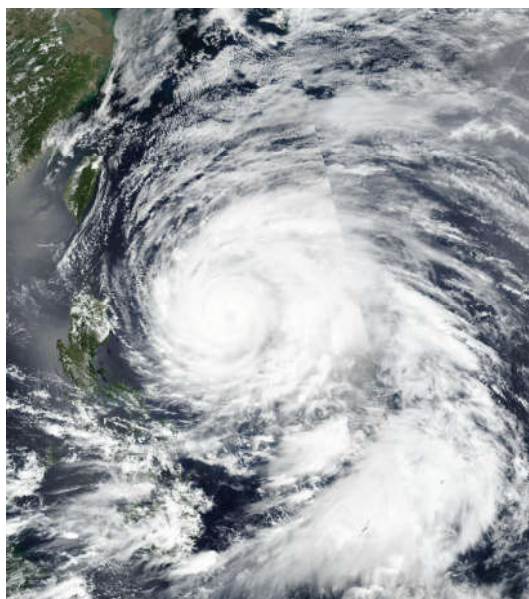
Анализ рис. 3.3.5.1(а) показал, что облачная структура циклона характеризуется плотной облачностью в центре циклона и интенсивными выбросами перистых облаков, которые говорят о том, что циклон находится в стадии интенсивного развития.

Из рис. 3.3.5.1(б) следует, что циклон формируется на фоне повышенных значений ТПО ($30 - 32^{\circ}$). Причём к северу от циклона наблюдается область с температурами порядка $22 - 25^{\circ}$.

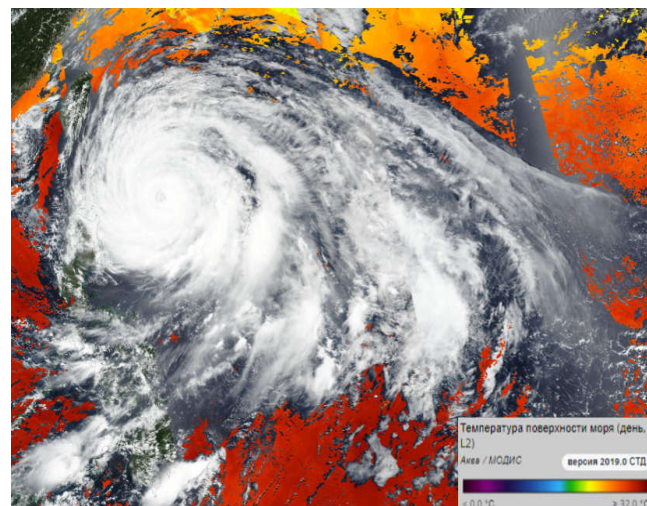
Анализируя рис. 3.3.5.1(в) можно сказать, что область наиболее интенсивных осадков (более 25 мм/ч) связана с глазом циклона. Скорость выпадения осадков в центральной плотной облачности соответствует 15 - 20 мм/ч.

По рис. 3.3.5.1(г) можно понять, что циклон образовался в Тихом океане севернее острова Папуа, направляясь на северо-запад - северо-западо-запад.

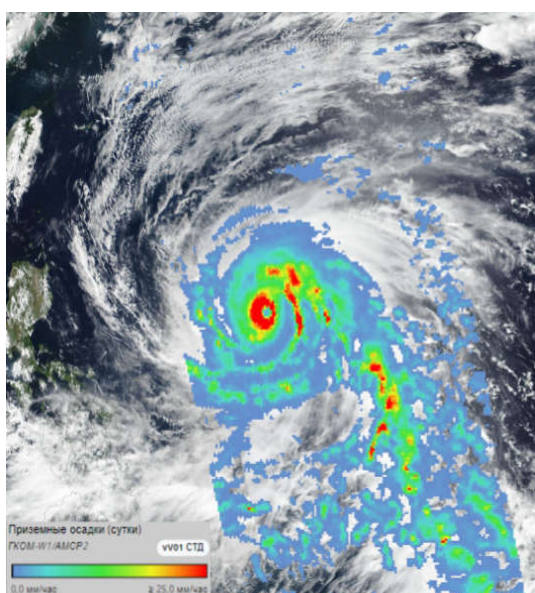
Между северными островами Филиппин и о. Тайвань он резко развернулся на северо-восток, пройдя южнее Японских островов.



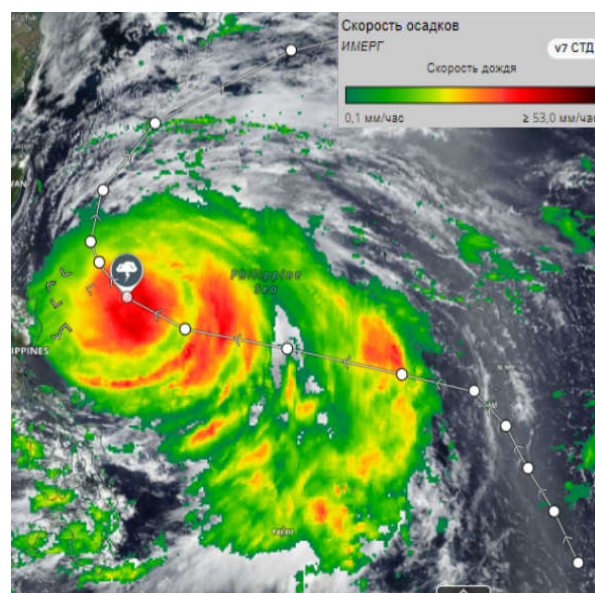
3.3.5.1(а) – снимок в видимом спектре



3.3.5.1(б) – снимок с наложением значений ТПО



3.3.5.1(в) – снимок с наложением поля осадков



3.3.5.1(г) – снимок с наложением траектории перемещения ТЦ и значений скорости осадков

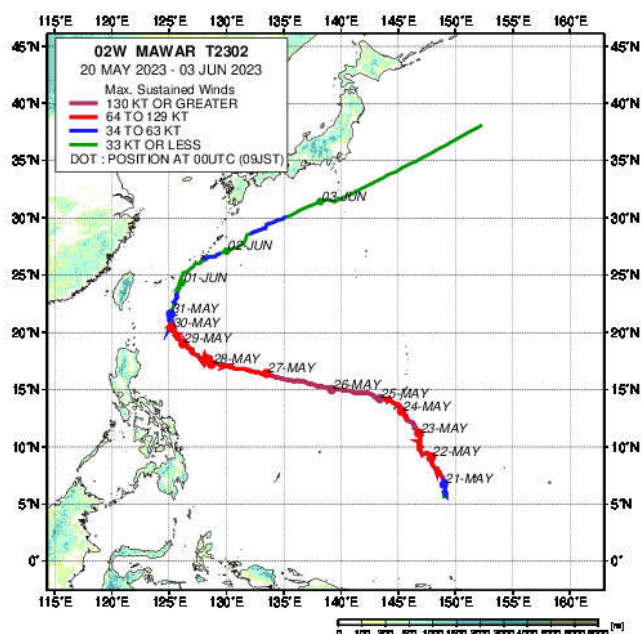


Рис. 3.3.5.2 — подробная траектория ТЦ с сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database

3.4. Анализ гистограмм основанных на значениях тропических циклонов

В ходе выполнения работы были построены гистограммы повторяемости тропических циклонов, значений средней и максимальной скорости по годам.

Исходя из рисунка 3.4.1(а) можно сказать, что наибольшее количество ТЦ (31) было в 2019 году. Этот год также занимает вторые места в гистограммах максимальной и средней скоростей (рис. 3.4.1(б) и 3.4.1(в)), из чего можно сделать вывод, что этот год был крайне благоприятен для формирования ТЦ, не только с точки зрения их количества, но и интенсивности. Также можно заметить, что в 2023 году ТЦ было меньше всего (18). Но это не позволяет говорить о существовании тенденции уменьшения их количества. Анализ рисунка 3.4.1(б) позволяет сделать вывод, что в этот же год наблюдалась самая высокая среднегодовая скорость ветра за пять лет. Это приводит к заключению о том, что в 2023 году хоть и было меньше ТЦ, но все они были сильнее, чем в предыдущие годы. По гистограмме максимальных скоростей (см. рис. 3.4.1(в)) и гистограмме средних скоростей (см. рис 3.4.1(б)) видно, что в 2022 году были

самые слабые ТЦ, хоть их было и больше, чем в 2020 и 2023 годах (см. рис. 3.4.1(a)).

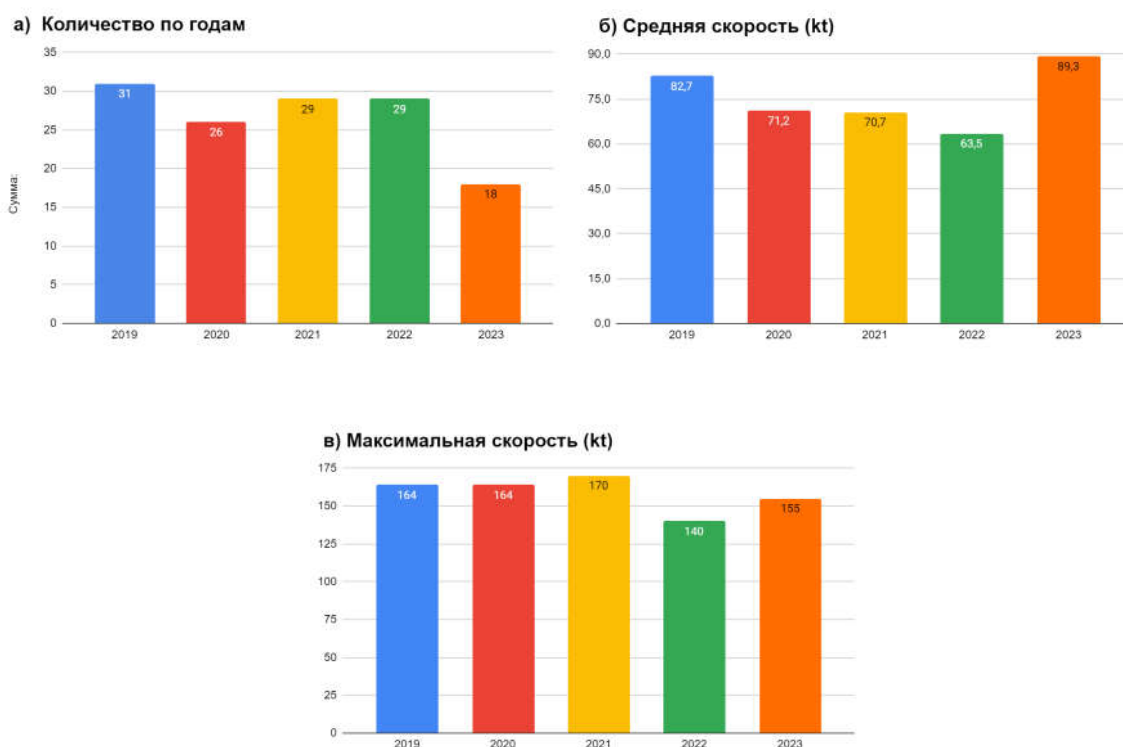


Рис. 3.4.1 — по годам: (а) - количество ТЦ; (б) - средняя скорость; (в) - максимальная скорость

Были также построены гистограммы внутрегодовой изменчивости повторяемости ТЦ.

Анализируя рис. 3.4.2 можно сделать вывод, что ТЦ чаще всего образуются в переходные месяца между летом и осенью (август, сентябрь, октябрь). Это обусловлено тем, что в это время температура поверхности океана достигает своего пика, в то время, как поверхность земли уже начинают остывать, из-за сокращения дневной инсоляции. Эта разность в температуре и приводит к формированию мощной конвекции и образованию ТЦ.

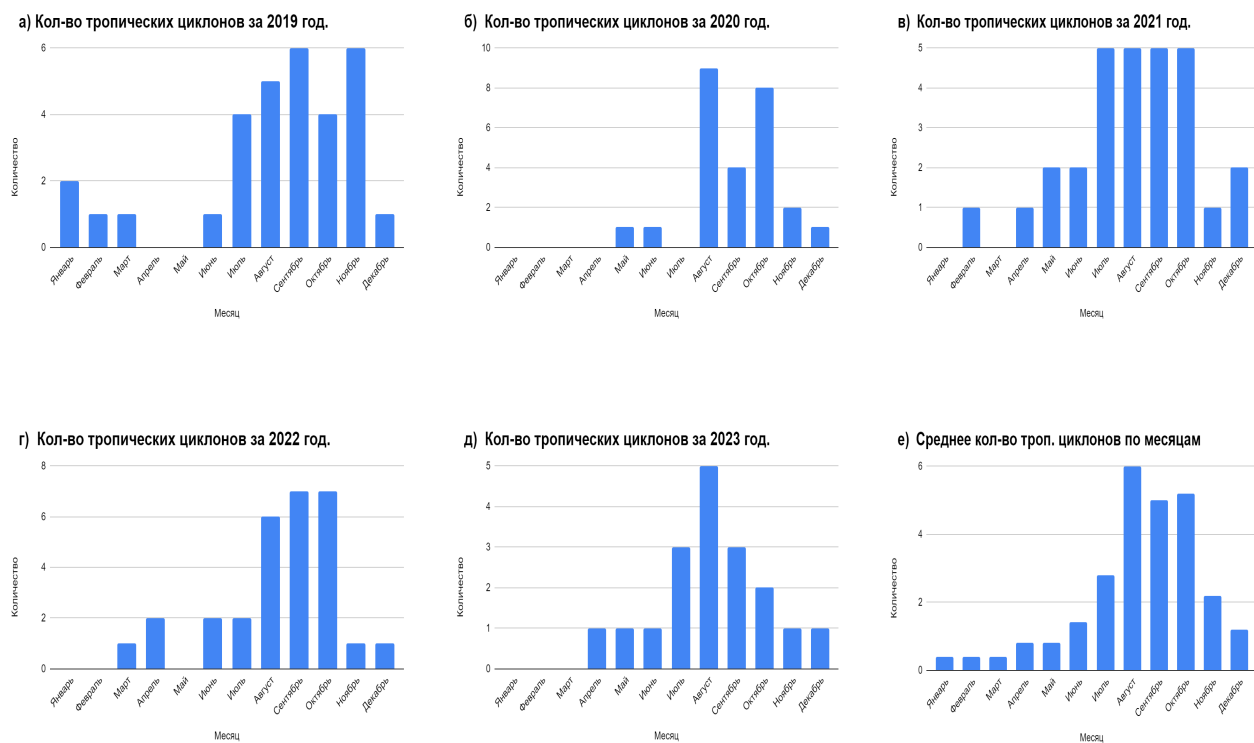


Рис 3.4.2 — годовое количество ТЦ по месяцам: (а) - 2019 год; (б) - 2020 год; (в) - 2021 год; (г) - 2022 год; (д) - 2023 год; (е) - осредненное кол-во

Для оценки интенсивности ТЦ был использован индекс Накопленной энергии циклона (ACE), который рассчитывается по формуле:

$$ACE = \frac{\sum_{j=1}^1 \sum_{i=1}^n v_{max}^2}{10000} \quad (1),$$

где v_{max} — скорость ветра в циклоне превышающая 35 узлов;

i — количество сроков когда скорость ветра в циклоне достигала значения v_{max} ;

j — количество тропических циклонов в сезоне.

Были построены гистограммы значений индекса ACE для рассмотренных в работе случаев тропических циклонов.

Поскольку индекс ACE прямо пропорционален квадрату скорости ветра в циклоне и продолжительности времени жизни циклона, из рисунка 3.4.3 следует, что наиболее интенсивным циклоном был супертайфун Мавар, а наименее интенсивным - Ньятох.

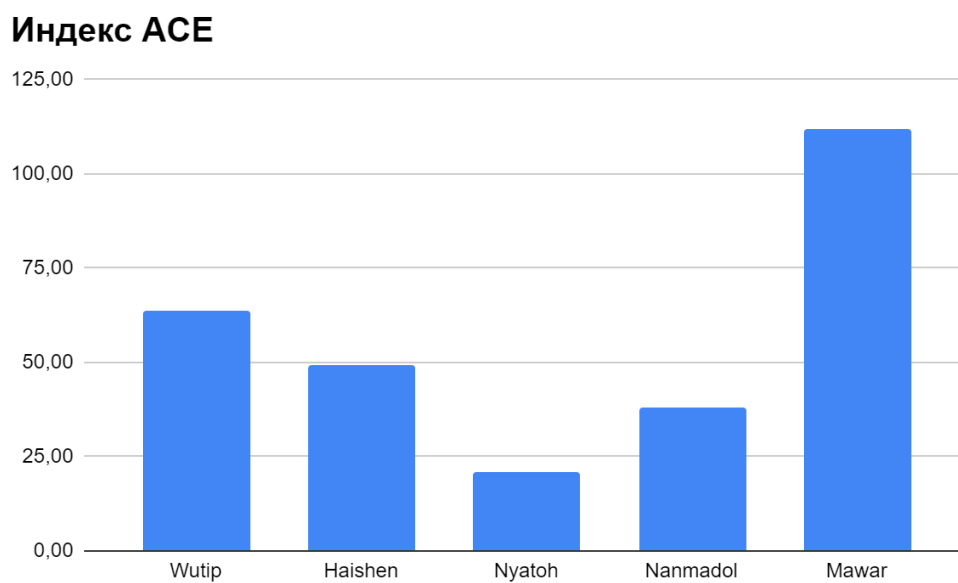


Рис. 3.4.3 — индекс ACE

Заключение

С помощью сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database, на котором имеются списки, названия, траектории, скорости ветра (максимальные и ежедневные), данные по осадкам, давлению, датам и времени существования циклонов с 1997 года.

Кроме того, был использован сайт NASA World View, располагающий обширным архивом спутниковых снимков и возможностью настройки по интересующим темам. Был сформирован архив тропических циклонов по данным сайта JAXA/EORC Tropical Cyclone Database, и используем различные настройки сайта NASA World View для описания метеовеличин, полей осадков, построения траектории циклона. Для работы были использованы космические снимки в видимом диапазоне спектра, а также дополнительные слои температуры морской поверхности, полей осадков, скорости ветра и траекторий движения циклонов.

На сайте Zoom Earth был сформирован архив данных по максимальной скорости в тропических циклонах по срокам.

В ходе работы были рассмотрены 60 наиболее интересных случаев формирования тропических циклонов за промежуток времени от 2019 года по 2023 год.

В ходе выполнения работы были построены гистограммы повторяемости тропических циклонов, значений средней и максимальной скорости по годам.

Исходя из гистограммы повторяемости тропических циклонов можно сказать, что наибольшее количество ТЦ (31) было в 2019 году. Этот год также занимает вторые места в гистограммах максимальной и средней скоростей, из чего можно сделать вывод, что этот год был крайне благоприятен для формирования ТЦ, не только с точки зрения их количества, но и интенсивности. Также можно заметить, что в 2023 году ТЦ было меньше всего

(18). Но это не позволяет говорить о существовании тенденции уменьшения их количества. Анализ гистограммы максимальных скоростей позволяет сделать вывод, что в этот же год наблюдалась самая высокая среднегодовая скорость ветра за пять лет. Это приводит к заключению о том, что в 2023 году хоть и было меньше ТЦ, но все они были сильнее, чем в предыдущие годы. По гистограмме максимальных скоростей и гистограмме средних скоростей видно, что в 2022 году были самые слабые ТЦ, хоть их было и больше, чем в 2020 и 2023 годах.

Были также построены гистограммы внутрегодовой изменчивости повторяемости ТЦ.

Анализируя гистограммы внутригодовой изменчивости можно сделать вывод, что ТЦ чаще всего образуются в переходные месяцы между летом и осенью (август, сентябрь, октябрь). Это обусловлено тем, что в это время температура поверхности океана достигает своего пика, в то время, как поверхность земли уже начинают остывать, из-за сокращения дневной инсоляции. Эта разность в температуре и приводит к формированию мощной конвекции и образованию ТЦ.

Для оценки интенсивности ТЦ был использован индекс Накопленной энергии циклона (ACE).

Поскольку индекс ACE прямо пропорционален квадрату скорости ветра в циклоне и продолжительности времени жизни циклона, из гистограммы значений индекса ACE для пяти тропических циклонов следует, что наиболее интенсивным циклоном был супертайфун Мавар, а наименее интенсивным - Ньятох.

Список использованных источников

1. Тараканов, Г. Тропическая метеорология / Г.Г. Тараканов; Ред. В.М. Радикевич. – Л.: Гидрометиздат, 1980. – 174с.
2. Ярошевич, М.И. Тропические циклоны, как элемент системы океан-атмосфера [Текст] / М.И. Ярошевич, Л.Х. Ингель // Доклады Академии Наук. – 2004. – № 3. – С. 397-400.
3. Hurricanes – Development [Электронный ресурс] // State Climate Office of North Carolina. – Режим доступа: <http://climate.ncsu.edu/climate/hurricanes/development.php>
4. Потапов, И.И. Зарождение тропического циклона в океане и глобальный климат [Текст] / И.И. Потапов, В.Ю. Солдатов, В.Ф. Крапивин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2015. – № 4. – С. 56-64.
5. Похил, А.Э. Взаимодействие тропического циклона с сушей и окружающей атмосферой [Текст] / А.Э. Похил, Е.С. Глебова // Энергия: экономика, техника, экология. – 2014. – № 8. – С. 40-48.
6. Герман, М.А. Спутниковая метеорология / М.А. Герман; Ред. С.В. Солонин. – Л.: Гидрометиздат, 1975. – 367с.
7. About Tropical Cyclones [Электронный ресурс] // Australian Government Bureau of Meteorology. – Режим доступа: <http://www.bom.gov.au/cyclone/about/>
8. Hurricane Floyd [Электронный ресурс] // The National Weather Service. – Режим доступа: <http://www.weather.gov/mhx/Sep161999EventReview>
9. Крапивин, В.Ф. Социально-экономические аспекты последствий от тропических циклонов [Текст] / В.Ф. Крапивин, И.И. Потапов, В.Ю. Солдатов // Экономика природопользования. – 2013. – № 4. – С. 58-77.
10. Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale [Электронный ресурс] // National Hurricane Center. – Режим доступа: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>

11. Hurricanes [Электронный ресурс] // Weather Explained. – Режим доступа: <http://www.weatherexplained.com/Vol-1/Hurricanes.html>
12. Simpson, J. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) / J. Simpson; Ред. Wei-Kuo Tao, Roger Adler. – American Meteorological Society, 2003. – 234с.
13. Созранов, А.Х. Тропические циклоны (Тайфуны) [Текст] / А.Х. Созранов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – № 3. – С. 60-66.
14. Минина, Л.С. Практика нефанализа / Л.С. Минина; Ред. В.А. Бугаева. – Л.: Гидрометиздат, 1970. – 335с.
15. Determining the Onset and Risk of Tropical Cyclone Winds: [Электронный ресурс] // University Corporation for Atmospheric Research's (UCAR's) Community Programs (UCP). – Режим доступа: https://www.meted.ucar.edu/tropical/tc_wind_haz/wind_probs/
16. Introduction of Tropical Meteorology [Электронный ресурс] // University Corporation for Atmospheric Research's (UCAR's) Community Programs (UCP). – Режим доступа: http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition
17. Неёлова, Л.О. Душа циклона [Текст] / Л.О. Неёлова // Экология и жизнь. – 2006. – № 1. – С. 50-53.
18. Yamasaki Masanori. A Study on the Effects of the Ice Microphysics on Tropical Cyclones [Электронный ресурс] / М. Yamasaki. – Showa-machi: 2012. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2013/573786/>
19. Rogers, R. Tropical Cyclone Rainfall / R. Rogers, F. Marks, T. Marchok; Copyright, 2009. – 3456с.
20. Головкин, В.А. Космический мониторинг ураганов [Текст] / В.А. Головкин, Т.В. Кондранин // Земля и вселенная. – 2009. – № 6. – С. 17-25.

21. Пермяков М.С. Мезомасштабная структура тропических циклонов [Текст] / М.С. Пермяков, Е.Ю. Поталова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – № 1. – С. 72-80.
22. About Satellite Images [Электронный ресурс] // Australian Government Bureau of Meteorology. – Режим доступа: http://www.bom.gov.au/australia/satellite/about_images.shtml
23. Крапивин, В.Ф. Системы наблюдения за процессами в мировом океане [Текст] / В.Ф. Крапивин, И.И. Потапов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2013. – № 6. – С. 30-49.
24. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Ред. И. П. Ветлова, Н. Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 299 с.
25. Бобков В.А. Визуализация динамики циклонов [Текст] / В.А. Бобков, С.В. Мельман, В.П. Май. // Информационные технологии. – 2012. – № 2. – С. 49-54.
26. Images: [Электронный ресурс] // MODIS. – Режим доступа: <http://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/showall.php>
27. LAADS Web: [Электронный ресурс] // NASA. – Режим доступа: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>
28. Berg, R. Hurricane Joaquin: [Электронный ресурс] // NASA: 2015. – Режим доступа: http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL112015_Joaquin.pdf
29. Kimberlain, T. Hurricane Patricia: [Электронный ресурс] // NASA: 2015. – Режим доступа: http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP202015_Patricia.pdf
30. Cyclonic Storm Chapala: [Электронный ресурс] // India Meteorological Department: 2015. – Режим доступа: <http://www.rsmcnewdelhi.imd.gov.in/images/pdf/publications/preliminary-report/chap.pdf>

31. Tropical Cyclone Debbie: [Электронный ресурс] // NASA: 2017. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/91p-southern-pacific-ocean>

32. Hironori Fudeyasu Research and development on typhoon control and typhoon power generation, and initiative research on practical implementation with the aim of achieving the Moonshot Goal: [Электронный ресурс] // Moonshot R&D MILLENNIA Program: 2021. – Режим доступа: https://www.jst.go.jp/moonshot/en/program/millennia/pdf/report_en_19_fudeyasu.pdf

Приложение

Списки ТЦ за 2019 - 2023 г.г.

Type	Number	Name	Japanese name	Period	MSW(kn)	GPM/KuPR, GMI Obs.	GCOM-W/AMSR2 Obs.	Track
TS	01W	ONE_W	-	Jan 04,2019 - Jan 07,2019	55	0	5	track
TS	36W	PABUK	T1901	Jan 01,2019 - Jan 06,2019	53	1	7	
STY	02W	WUTIP	T1902	Feb 19,2019 - Mar 01,2019	135	7	17	track
TS	03W	THREE_W	-	Mar 15,2019 - Mar 19,2019	51	2	2	track
TS	04W	FOUR_W	-	Jun 28,2019 - Jul 01,2019	53	0	1	track
TS	05W	MUN	T1904	Jul 02,2019 - Jul 04,2019	35	0	3	track
TS	06W	DANAS	T1905	Jul 16,2019 - Jul 21,2019	53	4	10	track
TS	07W	NARI	T1906	Jul 25,2019 - Jul 27,2019	39	1	5	track
TS	08W	WIPHA	T1907	Jul 30,2019 - Aug 03,2019	55	2	8	track
TY	09W	FRANCISCO	T1908	Aug 01,2019 - Aug 08,2019	75	1	11	track
STY	10W	LEKIMA	T1909	Aug 04,2019 - Aug 13,2019	135	6	19	track
TY	11W	KROSA	T1910	Aug 05,2019 - Aug 16,2019	110	9	23	track
TS	12W	BAILU	T1911	Aug 21,2019 - Aug 26,2019	47	1	8	track
TS	13W	PODUL	T1912	Aug 26,2019 - Aug 30,2019	47	4	7	track
TY	14W	FAXAI	T1915	Sep 01,2019 - Sep 10,2019	115	3	18	track
TY	15W	LINGLING	T1913	Sep 02,2019 - Sep 08,2019	122	7	14	track
TS	16W	KALIKI	T1914	Sep 02,2019 - Sep 04,2019	35	1	3	track
TS	17W	PEIPAH	T1916	Sep 15,2019 - Sep 17,2019	39	0	5	track
TS	18W	TAPAH	T1917	Sep 19,2019 - Sep 23,2019	43	4	10	track
TY	19W	AMTAG	T1918	Sep 27,2019 - Oct 04,2019	95	3	14	track
STY	20W	HAGIBIS	T1919	Oct 05,2019 - Oct 13,2019	140	7	20	track
TY	21W	NEOGURI	T1920	Oct 16,2019 - Oct 23,2019	75	3	15	track
STY	22W	BUALOI	T1921	Oct 19,2019 - Oct 26,2019	132	2	17	track
TY	23W	MATMO	T1922	Oct 29,2019 - Nov 10,2019	87	1	2	track
STY	24W	HALONG	T1923	Nov 02,2019 - Nov 10,2019	164	2	12	track
TS	25W	NAKRI	T1924	Nov 05,2019 - Nov 11,2019	59	1	11	track
TY	26W	FENGSHEN	T1925	Nov 11,2019 - Nov 18,2019	105	2	10	track
TY	27W	KALMAEGI	T1926	Nov 12,2019 - Nov 21,2019	95	6	17	track
TY	28W	FUNG-WONG	T1927	Nov 19,2019 - Nov 23,2019	80	2	9	track
STY	29W	KAMMURI	T1928	Nov 25,2019 - Dec 06,2019	130	6	18	track
TY	30W	PHANFONE	T1929	Dec 21,2019 - Dec 29,2019	105	4	12	track

Type	Number	Name	Japanese name	Period	MSW(kn)	GPM/KuPR, GMI Obs.	GCOM-W/AMSR2 Obs.	Track
TY	01W	VONGFONG	T2001	May 11,2020 - May 17,2020	107	5	10	track
TS	02W	NURI	T2002	Jun 12,2020 - Jun 14,2020	35	4	14	track
TY	03W	HAGUPIT	T2004	Aug 01,2020 - Aug 06,2020	95	1	8	track
TS	04W	SINLAKU	T2003	Aug 01,2020 - Aug 03,2020	43	2	2	track
TS	05W	JANGMI	T2005	Aug 08,2020 - Aug 11,2020	45	2	5	track
TS	06W	SIX_W	-	Aug 09,2020 - Aug 13,2020	39	3	2	track
TS	07W	MEKKHALA	T2006	Aug 09,2020 - Aug 11,2020	53	0	2	track
TS	08W	HIGOS	T2007	Aug 17,2020 - Aug 20,2020	59	1	3	track
TY	09W	BAVI	T2008	Aug 21,2020 - Aug 28,2020	107	0	16	track
TY	10W	MAYSAK	T2009	Aug 28,2020 - Sep 03,2020	127	8	13	track
STY	11W	HAISHEN	T2010	Aug 31,2020 - Sep 08,2020	132	4	17	track
ID	12W	TWELVE_W	-	Sep 11,2020 - Sep 12,2020	30	2	2	track
TS	13W	NOUL	T2011	Sep 15,2020 - Sep 19,2020	59	2	7	track
TS	14W	DOLPHIN	T2012	Sep 20,2020 - Sep 24,2020	55	2	10	track
TS	15W	KUIIRA	T2013	Sep 26,2020 - Sep 30,2020	57	2	3	track
TY	16W	CHAN-HOM	T2014	Oct 04,2020 - Oct 13,2020	92	6	17	track
TS	17W	LINFA	T2015	Oct 10,2020 - Oct 12,2020	41	2	4	track
TS	18W	NANGKA	T2016	Oct 11,2020 - Oct 15,2020	53	3	7	track
TS	19W	SAUDEL	T2017	Oct 19,2020 - Oct 26,2020	63	6	13	track
TS	20W	TWENTY_W	-	Oct 20,2020 - Oct 22,2020	35	0	0	track
TY	21W	MOLAVE	T2018	Oct 24,2020 - Oct 29,2020	90	5	11	track
STY	22W	GONI	T2019	Oct 28,2020 - Nov 06,2020	164	4	21	track
TS	23W	ATSANI	T2020	Oct 29,2020 - Nov 08,2020	51	8	19	track
TS	24W	ETAU	T2021	Nov 08,2020 - Nov 11,2020	49	2	2	track
STY	25W	VAMCO	T2022	Nov 09,2020 - Nov 16,2020	130	5	14	track
TS	26W	KROVANH	T2023	Dec 20,2020 - Dec 23,2020	39	2	8	track

Type	Number	Name	Japanese name	Period	MSW(kn)	GPM/KaPR/GMI Obs.	GCOM-W/AMSR2 Obs.	Track
TS	01W	DUFUAN	T2101	Feb 17,2021 - Feb 22,2021	51	6	12	track
STY	02W	SURIGAE	T2102	Apr 13,2021 - Apr 25,2021	170	8	29	track
TS	03W	THREE_W	-	May 12,2021 - May 15,2021	34	1	4	track
TS	04W	CHOI-WAN	T2103	May 29,2021 - Jun 06,2021	47	4	15	track
TS	05W	KOGUMA	T2104	Jun 12,2021 - Jun 13,2021	33	1	2	track
TY	06W	CHAMPI	T2105	Jun 21,2021 - Jun 28,2021	65	3	15	track
TS	07W	SEVEN_W	-	Jul 05,2021 - Jul 06,2021	34	0	3	track
TD	08W	EIGHT_W	-	Jul 07,2021 - Jul 08,2021	31	1	1	track
TY	09W	IN-FA	T2106	Jul 16,2021 - Jul 28,2021	110	10	24	track
TY	10W	CENPAKA	T2107	Jul 18,2021 - Jul 24,2021	97	2	12	track
TS	11W	NEPARTAK	T2108	Jul 23,2021 - Jul 29,2021	43	3	13	track
TS	12W	TWELVE_W	-	Aug 02,2021 - Aug 06,2021	41	3	8	track
TS	13W	LUPIT	T2109	Aug 02,2021 - Aug 10,2021	53	3	18	track
TS	14W	MIRINAE	T2110	Aug 04,2021 - Aug 10,2021	39	2	14	track
TY	15W	NIDA	T2111	Aug 04,2021 - Aug 08,2021	77	3	7	track
TS	16W	OMAIS	T2112	Aug 10,2021 - Aug 24,2021	57	6	20	track
TS	17W	SEVENTEEN_W	-	Sep 02,2021 - Sep 04,2021	39	1	3	track
TY	18W	CONSON	T2113	Sep 06,2021 - Sep 13,2021	72	5	15	track
STY	19W	CHANTHU	T2114	Sep 06,2021 - Sep 18,2021	152	9	30	track
STY	20W	MINDULLE	T2116	Sep 22,2021 - Oct 02,2021	132	2	21	track
TS	21W	DIANMU	T2115	Sep 22,2021 - Sep 24,2021	45	2	2	track
TS	22W	LIONROCK	T2117	Oct 07,2021 - Oct 11,2021	47	2	6	track
TY	23W	NAMTHEUN	T2119	Oct 10,2021 - Oct 18,2021	75	6	16	track
TS	24W	KOMPASU	T2118	Oct 08,2021 - Oct 15,2021	59	5	15	track
TY	25W	MALOU	T2120	Oct 24,2021 - Oct 30,2021	92	2	13	track
TS	26W	TWENTYSIX_W	-	Oct 26,2021 - Oct 27,2021	35	0	1	track
STY	27W	NYATOH	T2121	Nov 29,2021 - Dec 04,2021	137	2	1	track
STY	28W	RAI	T2122	Dec 13,2021 - Dec 21,2021	155	5	15	track
ID	29W	TWENTYNINE_W	-	Dec 16,2021 - Dec 17,2021	27	1	3	track
Type	Number	Name	Japanese name	Period	MSW(kn)	GPM/KaPR/GMI Obs.	GCOM-W/AMSR2 Obs.	Track
TS	01W	ONE_W	-	Mar 30,2022 - Mar 31,2022	32	0	2	track
STY	02W	MALAKAS	T2201	Apr 07,2022 - Apr 16,2022	130	8	20	track
TS	03W	MEGI	T2202	Apr 09,2022 - Apr 12,2022	45	2	6	track
TY	04W	CHABA	T2203	Jun 29,2022 - Jul 03,2022	87	4	6	track
TS	05W	AERE	T2204	Jun 30,2022 - Jul 09,2022	45	5	17	track
TS	06W	SONGDA	T2205	Jul 28,2022 - Aug 01,2022	37	0	10	track
TS	07W	TRASES	T2206	Jul 31,2022 - Aug 01,2022	33	0	5	track
ID	08W	EIGHT_W	-	Aug 04,2022 - Aug 04,2022	26	0	1	track
TS	09W	MEARI	T2208	Aug 11,2022 - Aug 14,2022	39	2	8	track
TS	10W	MA-ON	T2209	Aug 21,2022 - Aug 26,2022	49	3	9	track
TY	11W	TOKAGE	T2210	Aug 22,2022 - Aug 26,2022	95	0	9	track
STY	12W	HINNAMNOR	T2211	Aug 28,2022 - Sep 06,2022	140	5	21	track
TS	13W	THIRTEEN_W	-	Aug 30,2022 - Sep 01,2022	35	0	4	track
TY	14W	MUIFA	T2212	Sep 06,2022 - Sep 17,2022	112	7	22	track
TS	15W	MERBOK	T2213	Sep 10,2022 - Sep 15,2022	55	2	10	track
STY	16W	NANMADOL	T2214	Sep 12,2022 - Sep 20,2022	135	6	18	track
TS	17W	TALAS	T2215	Sep 21,2022 - Sep 24,2022	39	2	5	track
TY	18W	NORU	T2216	Sep 22,2022 - Sep 28,2022	120	2	16	track
TY	19W	KULAP	T2217	Sep 25,2022 - Sep 29,2022	77	3	9	track
TY	20W	ROKE	T2218	Sep 28,2022 - Oct 05,2022	87	2	13	track
TS	21W	DIANMU	-	Oct 12,2022 - Oct 16,2022	43	2	8	track
ID	22W	SONCA	T2219	Oct 14,2022 - Oct 15,2022	25	2	2	track
TY	23W	NESAT	T2220	Oct 14,2022 - Oct 21,2022	85	2	13	track
TS	24W	HAITANG	T2221	Oct 18,2022 - Oct 19,2022	34	1	3	track
TS	25W	TWENTYFIVE_W	-	Oct 19,2022 - Oct 23,2022	39	2	6	track
TS	26W	NALGAE	T2222	Oct 27,2022 - Nov 03,2022	61	6	31	track
TS	27W	BANYAN	T2223	Oct 30,2022 - Nov 01,2022	39	0	2	track
TS	28W	YAMANNEKO	T2224	Nov 12,2022 - Nov 15,2022	41	3	12	track
TS	29W	PAKHAR	T2225	Dec 10,2022 - Dec 13,2022	57	1	2	track

Type	Number	Name	Japanese name	Period	MSW(kt)	GPM/KuPR,GMI Obs.	GCOM-W/AMSR2 Obs.	Track
TS	01W	SANVU	T2301	Apr 19,2023 - Apr 22,2023	55	3	10	track
STY	02W	MAWAR	T2302	May 20,2023 - Jun 03,2023	149	11	58	track
TY	03W	GUCHOL	T2303	Jun 06,2023 - Jun 13,2023	102	4	31	track
TY	04W	TALIM	T2304	Jul 14,2023 - Jul 18,2023	95	3	11	track
STY	05W	DOKSURI	T2305	Jul 21,2023 - Jul 29,2023	130	5	13	track
TY	06W	KHANUN	T2306	Jul 27,2023 - Aug 11,2023	122	11	62	track
TY	07W	LAN	T2307	Aug 07,2023 - Aug 17,2023	120	3	43	track
TS	08W	DAMREY	T2310	Aug 23,2023 - Aug 29,2023	45	4	25	track
STY	09W	SAOLA	T2309	Aug 23,2023 - Sep 04,2023	135	3	46	track
TY	10W	HAIKUI	T2311	Aug 28,2023 - Sep 05,2023	97	5	35	track
TY	11W	KIROGI	T2312	Aug 30,2023 - Sep 05,2023	80	2	28	track
TS	12W	YUN-YEUNG	T2313	Sep 05,2023 - Sep 09,2023	39	0	16	track
TS	13W	THIRTEEN_W	-	Sep 25,2023 - Sep 26,2023	32	1	4	track
STY	14W	KOINU	T2314	Sep 29,2023 - Oct 10,2023	132	4	43	track
STY	15W	BOLAVEN	T2315	Oct 07,2023 - Oct 14,2023	155	7	30	track
TS	16W	SANBA	T2316	Oct 17,2023 - Oct 21,2023	53	1	16	track
TS	17W	SEVENTEEN_W	-	Nov 12,2023 - Nov 14,2023	34	0	6	track
TS	18W	JELAWAT	T2317	Dec 17,2023 - Dec 19,2023	33	0	8	track

Спутниковые снимки ТЦ:

