



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТАЙФУНОВ (НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЙ 2018-2020 ГГ)»

Исполнитель: Докудовская Валентина Владимировна, студент группы ПОЗ-М19-1-6

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«14» февраля 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Объект и предмет исследования – тропические циклоны северо-западной части Тихого океана	4
1.1 Районы зарождения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана.....	4
1.2 Причины возникновения тропических циклонов (тайфунов).....	5
1.3 Стадии эволюции и механизмы формирования тропических циклонов.....	9
1.4 Основные пути и скорости перемещения тропических циклонов.....	18
Глава 2. Материалы, методы исследования тайфунов северо-западной части Тихого океана.....	20
2.1.История анализа и наблюдений за тайфунами.....	20
2.2. Эволюция сильнейших тайфунов, оказавших влияние на северо-западную часть Тихого океана.....	23
Глава 3. Основные результаты исследования	42
Заключение.....	50
Список источников и использованной литературы.....	51

Введение

Исследование механизмов зарождения и развития мощных разрушительных тропических циклонов представляет собой актуальную научную проблему, так как на этой основе возможно прогнозирование эволюции тайфунов и в перспективе создание активных методов воздействия на зарождающийся воздушный вихрь с целью его подавления на начальной стадии, еще до развития его в тропический циклон. Решение данной проблемы возможно лишь на основе углубленного понимания и моделирования процессов зарождения и эволюции сильнейших тропических циклонов.

Тропические циклоны представляют опасность для жизни и здоровья людей, приводят к разрушениям жилой и хозяйственной инфраструктуры, в основном под влиянием затопления территорий и паводковых явлений, связанных с выпадением большого количества осадков. Кроме того, воздействие оказывают сильные и ураганные ветры, высокая влажность, резкие перепады давления и штормовые нагоны.

Целью работы является изучение и анализ параметров и траекторий тайфунов северо-западной части Тихого океана, а также мирового опыта прогнозирования на примере периода сезонов 2015-2021гг.

Объектом исследования являются тропические циклоны западной части Тихого океана.

Задачи работы:

- проанализировать траектории и эволюцию самых мощных тайфунов, зародившихся в период 2015-2021;
- выделить наиболее мощные тайфуны в классы по траекториям следования и выхода на сушу;
- изучить возможности современных методов моделирования для анализа штормовых нагонов, возникающих в результате действия тайфунов.

Глава 1. Объект и предмет исследования – тропические циклоны северо-западной части Тихого океана.

1.1. Районы зарождения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана.

Одним из наиболее разрушительных атмосферных явлений является тайфун – крупно–масштабный стремительно развивающийся атмосферный вихрь. Тайфуны возникают над перегретыми районами океана.

Тропические циклоны возникают в тропической и экваториальной зонах между 22° ю. ш. и 35° с. ш. за исключением экваториальной полосы (2° с. ш. – 2° ю. ш.).

По данным Грэя [1], тропические циклоны в северном полушарии – между 3 и 35° , а в южном – между 3 и 22° . В зоне 3 - 10° широты (обоих полушарий) образуется 22% всех тропических циклонов. 65% тропических циклонов зарождается между 10 и 20° широты. И всего 13% тропических циклонов образуется севернее и южнее 20° широты.

Таким образом, наиболее интенсивное зарождение тропических циклонов (ТЦ) происходит в приэкваториальной области в северо-западной части Тихого океана. На данную область приходится почти 30% возникающих тропических циклонов.

Тропические циклоны обладают радикально выраженным годовым ходом. В основном возникновение ТЦ происходит в теплое время года с июля по октябрь.

Северо-западная часть Тихого океана, включая Южно-Китайское море – является районом наиболее активного воздействия тропических циклонов. ТЦ данной акватории оказывают значительное влияние на безопасность судоходства и населения прибрежных районов. Большая часть тайфунов этого региона перемещается в направлении Китая, Вьетнама, Филиппин, Тайвани, Южной Кореи, Японии и российского Дальнего Востока.

1.2. Причины возникновения тропических циклонов (тайфунов).

Тайфун относится к сложным системам, находящимся в окружении крупномасштабных синоптических структур. На развитие и перемещение тропических циклонов основное влияние оказывают температура приповерхностного слоя океана, преобладающие ветры и эффект Кориолиса.

Тропические циклоны образуются над теплой водной поверхностью с мощным слоем влажного воздуха. Основную роль в формировании тропических циклонов наряду с другими динамическими и термическими причинами играет неустойчивость тропической атмосферы. Максимум энергии неустойчивости тропической атмосферы достигает преимущественно летом. Поэтому большинство тропических циклонов возникают в теплое время года.

Тропические циклоны образуются в областях с высокой температурой приповерхностного слоя воды (выше $26-27^{\circ}\text{C}$). При этом разность температур воды и воздуха должна быть более $1-2^{\circ}\text{C}$. Это приводит к интенсификации испарения, наращиванию запасов влаги в воздухе, что в свою очередь служит причиной накопления тепловой энергии в атмосфере и способствует вертикальному подъему воздуха.

Появляющаяся мощная сила плавучести увлекает каждый новый объем воздуха, нагретый и набравший влажность над водной поверхностью. Эффект Кориолиса придает подъему воздуха вихревое движение и заставляет тропические циклоны Северного полушария отклоняться к северу, а тропические циклоны Южного полушария – к югу.

Образование тропического циклона начинается с углубления слабо выраженной области пониженного давления в зоне встречи пассатов северного и южного полушарий. Таким образом, пассаты являются основными воздушными потоками, определяющими траекторию и интенсивность будущего тайфуна.

Среди исследователей существует несколько мнений о том, как крупномасштабные циркуляционные факторы и физические механизмы приводят к образованию тропических циклонов. Ниже приведены некоторые взгляды, гипотезы и проблемы по данному вопросу.

Грэм в [2] впервые был предложен метод, позволяющий связать районы и частоту возникновения тропических циклонов с шестью параметрами, характеризующими потенциал зарождения тропических циклонов. В критериальной функции Грэя, частота зарождения ТЦ пропорциональна параметру Кориолиса. При больших значениях параметра Кориолиса развитие ТЦ подавляется. Для зарождения ТЦ значения параметра Кориолиса должны быть оптимальными и соответствующими значениям для широты 10-20°.

По мнению Малкуса [3], причиной возникновения тайфунов являются волновые возмущения в зоне пассатов, которые при определенных условиях прорывают слой пассатной инверсии, который создает благоприятные условия для переноса водяного пара в верхние слои атмосферы, тем самым зарождавая тайфун.

Согласно Томпсону [4], тайфуны образуются в основном на линии раздела в области тропического фронта (между восточным течением на севере и западным на юге), расположенного во внетропической зоне конвергенции. Несмотря на незначительные контрасты температур в зоне тропического фронта, они все же оказывают существенное влияние на запасы энергии неустойчивости в зоне формирования тайфуна.

По мнению Шулейкина [5], тропический циклон представляет собой тепловую машину, где нагревателем является сильно перегретая поверхность океана преимущественно в области теплого течения, а в качестве холодильника рассматривается атмосфера вокруг тайфуна.

В публикации Бондаренко [6] показано, что западные и экваториальные акватории океанов динамически активнее остального океана. В этих областях океанов на поверхности воды активно формируются отрицательные

температурные аномалии воды, тогда как в остальном океане они незначительны. Подобные аномалии, образующиеся вертикальными движениями воды океанических долгопериодных волн солитонов, часто имеют округлую форму.

Согласно [19] те же долгопериодные океанические и атмосферные волны принято относить к волнам Россби. Образовавшиеся в тропиках циклоны движутся далеко на Север по западным акваториям океанов, а в восточных районах циклоны, минуя тропическую зону, быстро прекращают свое существование.

Над холодной водой в океане образуется холодный воздух. Это образование принято называть отрицательной аномалией воздуха. В этой аномалии давление низкое, и воздух вынужден поступать в неё, поднимаясь вверх. Далее срабатывает “механизм восполнения”. Пополнение циклона энергией происходит за счёт конденсации влаги, а также за счёт охлаждения воздуха в циклоне при нахождении его над холодной поверхностью воды.

Как было выяснено ранее, атмосферные вихри, тропические циклоны образуются атмосферными долгопериодными волнами солитонами. Такие волны являются прогрессивными и распространяются в западном направлении. Линии тока (силовые линии) атмосферных волн солитонов изображены на Рис.1. Тропическая зона расположена между 12° с. и ю. ш., субтропическая – между 12° и 35° с. и ю. ш.

В Северном полушарии тропической зоны силовое поле волн перемещает частицы воздуха вместе с содержащимися в нём веществами против часовой стрелки, а в южном – по часовой. Циклонические движения частиц воздуха волн солитонов, создающие подъём воздуха и конденсацию влаги в тропической зоне, порождают влажный воздух и обильное выпадение осадков в виде дождей. Эти движения являются пусковым механизмом тайфунов и пополнением циклов энергией.

Линии токов обозначены тонкими линиями в виде эллипсов, стрелки на линиях токов – направление силы, действующей на частицы воздуха. Голубым цветом выделена область подъёма воздуха и его циклонических движений в волнах. Жёлтым цветом выделена область падения воздуха и его антициклонических движений в волнах. Синим и оранжевым цветом выделены области в волнах интенсивного подъёма глубинной холодной воды на поверхность и опускания тёплой поверхностной воды на глубину океана.

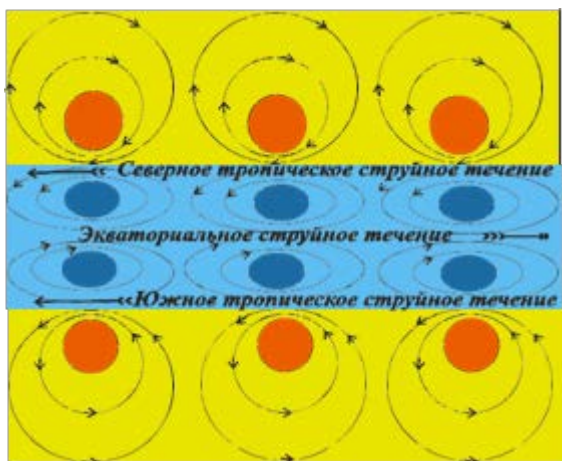


Рис.1. Проекция линий токов волн солитонов на горизонтальную плоскость в зоне между $\sim 35^{\circ}$ с. и ю. ш.

Таким образом, подпитка энергией вихря может осуществляться циклоническими движениями, за счёт конденсации влаги в вихре, а также отрицательными температурными аномалиями воздуха над океаном, морем или же сушей.

Углубление тропического циклона прекращается, как только диссипация кинетической энергии станет равной или больше энергии, поступающей в область тайфуна. Что происходит за счет турбулентного трения и конденсации водяного пара соответственно. Обычно в начальной стадии жизни тайфуна энергия, растрчиваемая им на трение, компенсируется поступающей энергией извне. Нарушение баланса в ту или другую сторону приводит либо к углублению, либо к заполнению тайфуна. При прохождении тайфунов над более холодными участками океана или суши затоки

холодного и сухого воздуха в центральную часть тайфуна, как правило, приводят к уменьшению скрытой теплоты парообразования.

Чем больше разница температур вода-воздух и чем выше их абсолютные величины, тем интенсивнее происходит процесс конвекции. Непрерывное вызывает выделение скрытой теплоты парообразования, которая расходуется на углубление тайфуна. Большая часть скрытой теплоты парообразования, которая образуется из-за поступления тепла и влаги от океана в атмосферу, тратится на преодоление сил турбулентного трения, а также на поддержание механизма непрерывного переноса тепла и влаги из нижних слоев атмосферы в более верхние.

1.3 Стадии эволюции и механизмы формирования тропических циклонов.

Тропические циклоны в зависимости от интенсивности и жизненного цикла можно подразделить на 4 вида или этапа развития [1]:

1) тропическое возмущение (tropical disturbance). Представляет собой слабо выраженный вихрь со скоростями ветра менее 17м/с. На карте погоды отсутствуют замкнутые изобары. Вихрь прослеживается по сходимости линий тока;

2) тропическая депрессия (tropical depression). На карте погоды имеются 1-2 замкнутые изобары. Сила ветра достигает 7 баллов по шкале Бофорта (32-38 узлов, или 17-20м/с) (Таб.1);

3) тропический шторм (tropical storm). На карте погоды имеется более 2-х замкнутых изобар, а сила ветра более 7 баллов. Верхний предел скорости ветра 73 узла (38 м/с);

4) ураган (hurricane). Скорость ветра превышает 74 узла (более 39м/с). Термин «ураган» эквивалентен термину «тайфун» (typhoon). Тайфуны в свою очередь делят на 5 категорий (Табл.3).

Тропические циклоны, которые образуются на севере Атлантического или на востоке Тихого океанов, классифицируются по шкале ураганов Саффира-Симпсона. На западе Тихого океана тропические циклоны классифицируются по шкале Метеорологической службы Японии (JMA).

Тропические циклоны, формирующиеся между 100° и 180° восточной долготы в Северном полушарии Тихого океана, классифицируются региональным специализированным метеорологическим центром в Токио (RSMC Токуо), подразделением JMA. JMA использует четыре категории для классификации тропических циклонов в зависимости от максимального постоянного ветра за 10-минутный период, в данных управления эта шкала называется «международной» и представлена в Таб.1.

Tropical Cyclone Classifications (all winds are 10-minute averages)											
Beaufort scale	10-minute sustained winds (knots)	N Indian Ocean IMD	SW Indian Ocean MF	Australia BOM	SW Pacific FMS	NW Pacific JMA	NW Pacific JTWC	NE Pacific & N Atlantic NHC & CPHC			
0–6	<28	Depression	Trop. Disturbance	Tropical Low	Tropical Depression	Tropical Depression	Tropical Depression	Tropical Depression			
7	28-29 30-33	Deep Depression	Depression								
8–9	34–47	Cyclonic Storm	Moderate Tropical Storm	Trop. Cyclone (1)	Tropical Cyclone	Tropical Storm	Tropical Storm	Tropical Storm			
10	48–55	Severe Cyclonic Storm	Severe Tropical Storm	Tropical Cyclone (2)		Severe Tropical Storm					
11	56–63										
12	64–72	Very Severe Cyclonic Storm	Tropical Cyclone	Severe Tropical Cyclone (3)		Typhoon	Typhoon	Typhoon	Hurricane (1)		
	73–85			Severe Tropical Cyclone (4)					Hurricane (2)		
	86–89			Hurricane (3)							
	90–99		Intense Tropical Cyclone	Severe Tropical Cyclone (5)						Super Typhoon	Major Hurricane (4)
	100–106										
	107–114										
	115–119		Super Cyclonic Storm	Very Intense Tropical Cyclone							
>120											

Таб.1 Классификация тропических циклонов JMA.

По (Таб.1) самой низкой категорией является «тропическая депрессия» (TD), которая характеризуется ветрами скоростью до 33 узлов (17м/с). Следующей категорией является «тропический шторм» (TS), включающий ветры от 33 до 47 узлов (17-24м/с). Тропические штормы уже получают имена, что также предоставляются RSMC Токуо. Сильнейшие тропические циклоны с ветрами до 63 узлов (33м/с) классифицируются как «жесткие

тропические штормы» (STS). Сильнейшие тропические циклоны, с ветрами скоростью от 64 узлов (33м/с), классифицируются как «тайфуны» (TY).

Шкала силы тропических циклонов RSMC Tokyo (JMA)	
Категория	Постоянные ветры (за 10 минут)
Тайфун	>64 узлов >33 м/с
Жестокий тропический шторм	48-63 узлов 24-33 м/с
Тропический шторм	33-47 узлов 17-24 м/с
Тропическая депрессия	<33 узлов <17 м/с

Таб.2.Шкала тропических циклонов RSMC Tokyo (JMA).

Категория	Скорость ветра		Высота нагоняемых волн (штормового прилива), м
	м/с	км/ч	
5	более 70	250	более 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
Дополнительные категории			
Тропический шторм	17–33	60–120	0–1
Тропическая депрессия	Менее 17	60	0

Таб.3. Категории тайфунов.

В жизненном цикле тропических циклонов можно выделить четыре основные стадии [1]:

1) Стадия формирования (formative stade), которая начинается с возникновения циклонической циркуляции в зоне конвергенции. Давление в центре циклона понижается до 990мб, а циклоническая циркуляция развивается до высоты 1,5-3,5км;

2) Стадия развития (immaturity stade), или стадия молодого циклона. В этой стадии циклонический вихрь достигает высоты 5-6км (иногда 9-10км). Циклон начинает стремительно углубляться, достигая своей максимальной интенсивности. Ветры ураганной силы образуют вокруг центра циклона кольцо радиусом 40-50 км. Облачный массив приобретает спиралевидный

характер. Облачные поля и зоны выпадения осадков в виде узких спиралевидных полос сходятся к центру циклона (Рис.2);

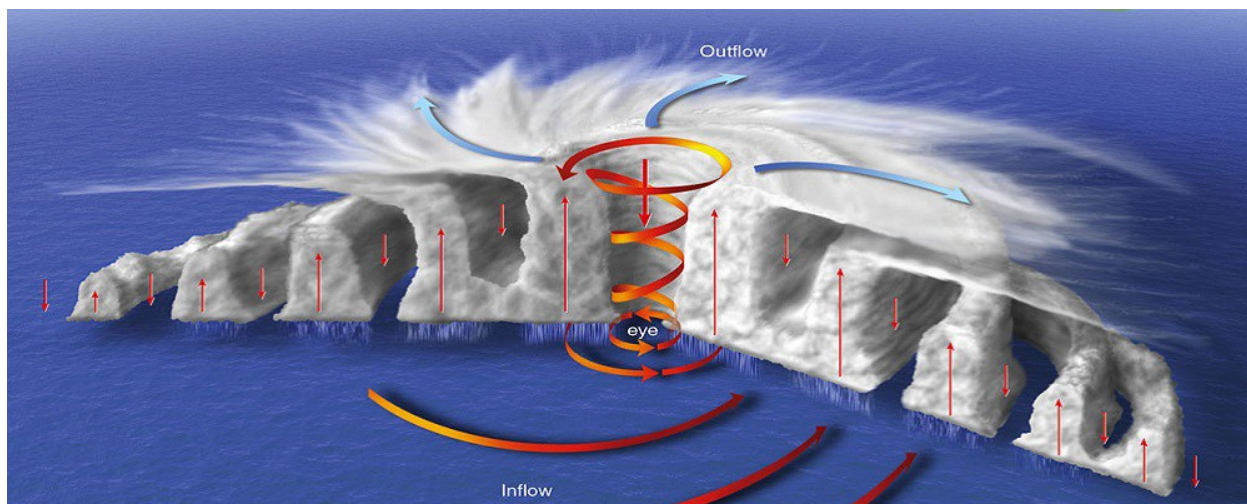


Рис.2 Тропический циклон в разрезе.

3) Зрелая стадия (stade of maturity). На данной стадии падение давления в центре тайфуна и увеличение скорости ветра постепенно прекращаются. Циклоническая циркуляция расширяется по площади и распространяется по высоте. Область штормовых ветров и интенсивных ливней увеличивается. Диаметр тропических циклонов в стадии развития и зрелой стадии может колебаться в пределах (от 60-70 до 1000км).

4) Стадия затухания (диссипации). Она начинается, когда циклон выходит на сушу или холодное морское течение. На этой стадии характерно 2 варианта развития существующего циклона: либо он постепенно затухает, выходя на сушу, где приземный воздух более холодный и менее влажный, поэтому подпитка в тайфун не поступает, и он начинает разрушаться, превращаясь в тропическую депрессию, либо превращается в мощный внетропический циклон на полярном фронте. Заметить приближение тропического циклона можно по появлению облачного покрова, состоящего из высоких перистых облаков, которые движутся от центра циклона, постепенно испаряются и исчезают.

По структуре тропический циклон делится на три концентрические части: внешняя, средняя и центральная.

1) Внешняя часть имеет радиальную ширину 30-50км, равномерно увеличивающуюся по мере приближения к центру циклона скорость ветров. Конвекция в тропических циклонах организована в длинные и узкие полосы мощных кучево-дождевых облаков (КДО) “rain bands” (дождевые полосы) – полосы грозовых кучевых облаков, которые могут быть внешними (outer rainbands), либо внутренними (inner rainbands). Наиболее характерное расположение дождевых полос во внутренней и внешней зонах тропического циклона представлено на Рис.3.

Так как дождевые полосы располагаются в виде спирали, то их иногда называют «спиральные полосы». Rain bands медленно движутся к центру циклона и сливаются со стеной глаза. Вдоль этих полос на нижнем уровне конвергенция максимальна, и, следовательно, на верхнем уровне максимальна дивергенция воздушных потоков. Теплый и влажный воздух поднимается вверх, а затем в пространстве, свободном от низких облаков, опускается между полосами вниз.

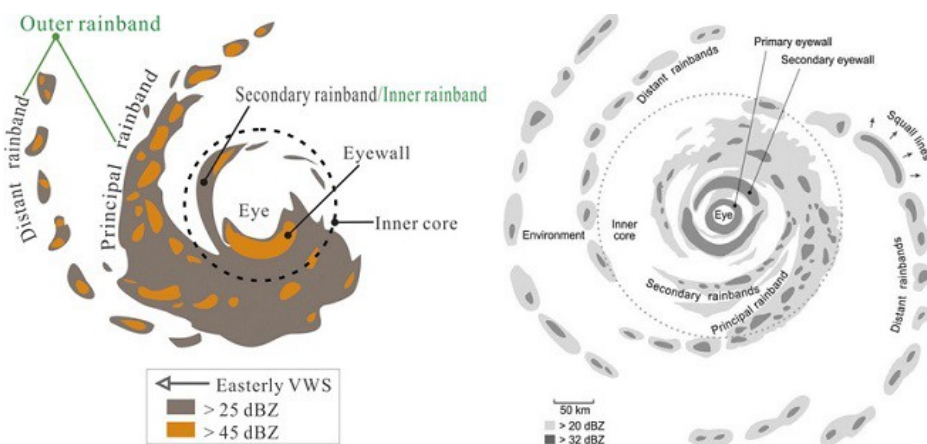


Рис.3 Расположение дождевых полос во внутренней и внешней зонах ТЦ.

2) Средняя часть тропического циклона называется стеной глаза («eye wall»), которая обладает формой наиболее плотного кольца мощных кучево-дождевых облаков и характеризуется большими скоростями ветра и осадками.

Подобно дождевым полосам внешней части тропического циклона, стена глаза тропического циклона бывает внешней и внутренней.

Бывает так, что между внутренней стеной глаза и внешними дождевыми полосами находится зона с незначительными осадками и менее плотными облаками. Такая зона называется «ров» (moat), (см. Рис.5.). Ров возникает за счёт опускания с верхних слоёв более сухого воздуха, что связано с чередованием восходящих и нисходящих потоков в циклоне.

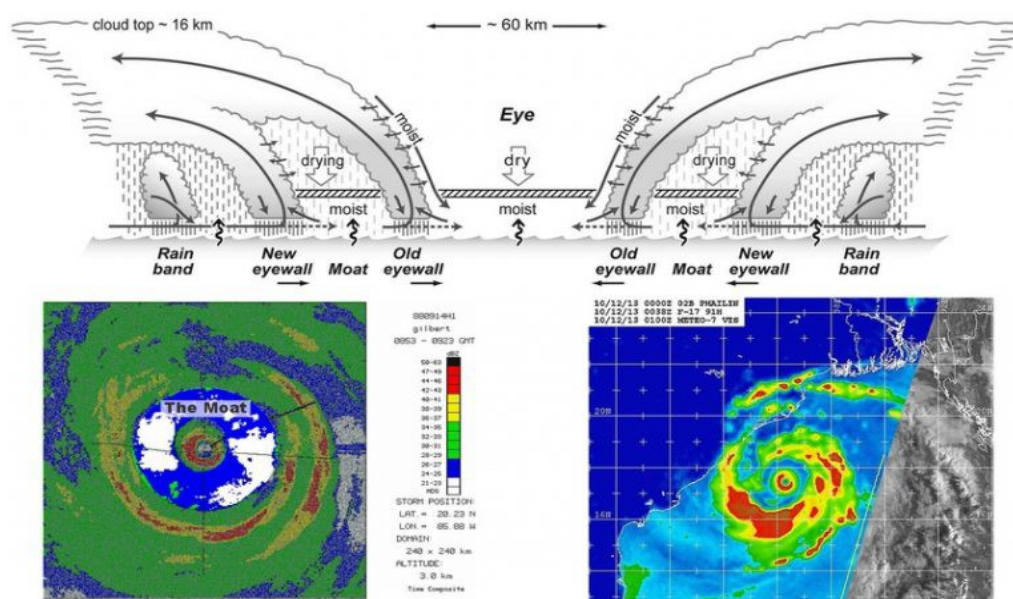


Рис.5. «Ров» тропического циклона и расположение дождевых полос.

В тайфунах 3 или выше категории иногда наблюдаются «концентрические циклы стены глаза» — Eye wall replacement cycles. Оно состоит в том, что некоторые из внешних дождевых полос, изначально расположенные ближе к периферии циклона, могут собираться во внешнее кольцо гроз, то есть так называемую внешнюю стену глаза. Это кольцо медленно движется в сторону центра циклона, понижая влажность внутренней стены глаза. В течение данной фазы, тайфун ослабляется благодаря затуханию ветров и повышению давления в центре, т.к. внутренняя стена становится «зажатой» внешней. При этом старая стена глаза сужается до 10-25км, ее заменяет новая, благодаря чему тайфун возобновляет свою интенсивность до прежней, а порою и сильнее.

3) Центральная часть диаметром 30-60км называется глазом («eye»). Эта часть тропического циклона характеризуется самым низким атмосферным давлением и слабыми ветрами благодаря отсутствию горизонтального барического градиента. Наиболее низкое давление было зафиксировано в глазу супер-тайфуна (STY) в октябре 1979 года и достигло 870гПа.

Глаз имеет круглую форму, но в заключительной стадии эволюции циклона (при его разрушении), глаз может принимать овальную, либо неправильную форму.

Средний диаметр глаза составляет 30-65км. Самый маленький глаз имел диаметр 3,7км (ураган Wilma в Карибском море 19 октября 2005 года), а самый большой наблюдался у тайфуна Carmen – 370км 20 августа 1960 года на северо-западе Тихого океана.

Глаз является самой тёплой частью тропического циклона, тёплым ядром. Данная особенность связана с тем, что в центральной части циклона происходит движение воздуха вниз и его адиабатический нагрев (см. Рис.6). Наиболее тёплый глаз наблюдался в урагане «Patricia» на северо-востоке Тихого океана 23 октября 2015 года. Температура воздуха на уровне 758гПа достигала +32,2°C.

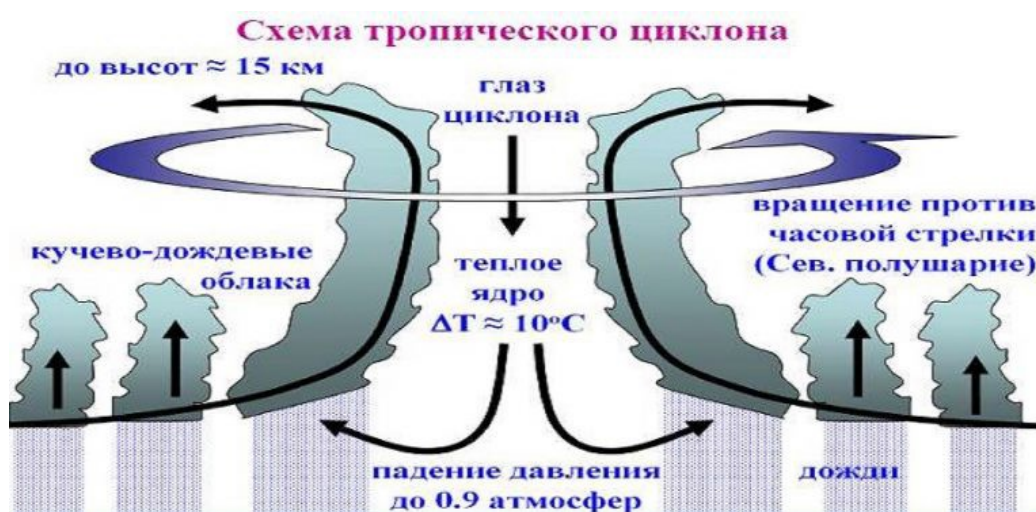


Рис.6

Глаз тайфуна окружен стеной плотных конвективных облаков, мощно развивающихся за счет энергии, выделяющейся при конденсации водяного пара в результате конвергенции воздушных потоков, что приводит к выпадению сильных ливневых дождей. В нижних слоях атмосферы воздух, движущийся вниз, выбрасывается наружу центробежной силой и вовлекается в вихревое движение вокруг центра. Это приводит к еще большему затягиванию воздуха сверху. Поступающий снизу-вверх водяной пар поддерживает данный циркуляционный механизм.

По данным метеорологических спутников было выявлено, что на ранних стадиях развития циклона глаз тропического циклона находится на периферии облачного массива, но по мере превращения тропического циклона в тайфун глаз сдвигается к центру циклона. Чем глубже тропический циклон, тем темнее становится глаз на спутниковых фотографиях облачности (Рис.7).

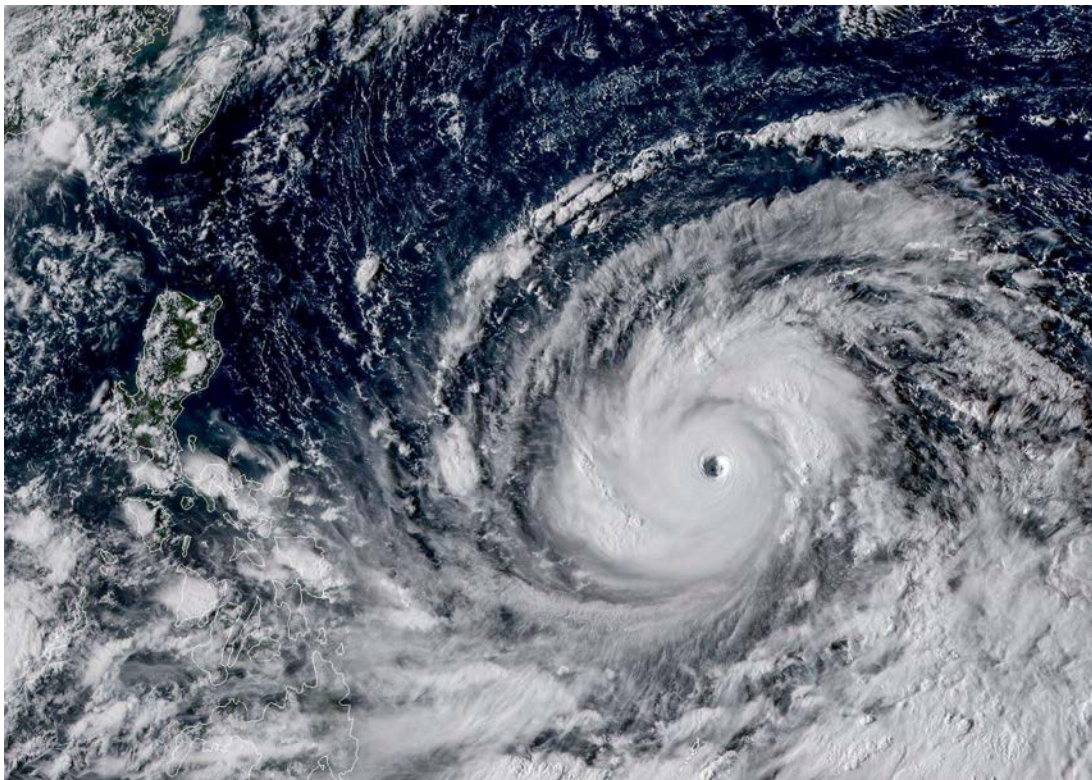


Рис. 7

Глаз слабого тропического циклона может быть частично или полностью

покрыт облаками. Эта зона, в отличие от глаза сильных циклонов, характеризуется значительной грозовой активностью.

Характерной особенностью некоторых тропических циклонов является наличие в стене глаза и ближе к его центру мезовихрей (Eyewall mesovortices). В таких вихрях скорость ветра может быть на 10% выше, чем в остальной части стены глаза. Замечено, что подобные вихри появляются в периоды интенсификации циклонов. Опасность возникновения мезовихрей в момент выхода циклона на сушу заключается в том, что они могут спровоцировать возникновение вспышек торнадо, поскольку вращательный момент будет передаваться в нижние слои воздуха.

Интересной особенностью мощных тропических циклонов является эффект «стадиона» (stadium effect) (Рис.8). Он заключается в том, что облака стены глаза располагаются под наклоном относительно центра тайфуна. При этом, диаметр глаза вверху циклона значительно больше, чем у поверхности, и с высоты это визуально напоминает стадион.



Рис.8. Stadium effect.

1.4 Основные пути и скорости перемещения тропических циклонов.

Тайфуны, возникающие на западе Тихого океана, вблизи Филиппинских островов, поворачивают к северу и северо-востоку, иногда через Восточно-Китайское море они смещаются на Японию и Приморский край и могут проходить в более северные широты до Охотского моря и Камчатки; другая часть тайфунов перемещается на материк (на юг Китая и Индокитайский полуостров).

В начале лета (июнь) и в конце осени (октябрь) пути тайфунов лежат южнее Японии. Точка поворота располагается примерно на широте 16-18°. С июля до октября тайфуны перемещаются в более северные широты. Их траектории следуют над Японией, Японским и Восточно-Китайским морями, над Кореей и Китаем.

В низких широтах скорость движения тропических циклонов небольшая, в среднем – около 20км/ч. Вблизи точки поворота скорость движения еще меньше; после поворота на участке траектории, направленной к северо-востоку в северном полушарии, она возрастает до значений скорости внетропических циклонов (до 30-50км/ч).

При переходе на материк скорость движения тропических циклонов, как правило, резко уменьшается. Тропические циклоны обычно задерживаются горными хребтами вблизи побережья или отклоняются от них.

В первых трех стадиях (тропическая депрессия, тропический шторм, ураган) тропические циклоны северного полушария перемещаются в западном и северо-западном направлении по юго-западной периферии субтропического антициклона.

В стадии перерождения тропического циклона в полярно-фронтальной циклон (на широте 20-30°) тропические циклоны меняют направление движения на северное и затем на северо-восточное и восточное.

В связи с трансформацией тропические циклоны попадают в зону юго-западных высотных потоков.

Вытянутая относительно пониженного давления область, так называемая высотная барическая ложбина к северо-западу от центра приземного циклона (тайфуна) как правило служит указанием на возможность поворота циклона к северо-востоку. Точка поворота в Тихом океане находится на широте около 20° . Чем ближе к экватору возник циклон, тем южнее будет его точка поворота.

В период максимальной повторяемости тропических циклонов районы их возникновения и точки поворота лежат значительно севернее среднего многолетнего положения.

По мере накопления фактических данных о движении тропических циклонов исследователи стали замечать, что траектории циклонов не всегда имеют правильную геометрическую форму (прямую, параболу, гиперболу). Часто на фоне правильной траектории циклона появляются выпуклости, вогнутости, петли и смещения к юго-западу или юго-востоку.

Наибольшую опасность для судоходства представляют тропические циклоны, смещающиеся по нестандартным траекториям. Нахождение циклона на месте, виляние, резкое изменение направления циклона создают трудности при уклонении судна от опасной зоны тайфуна.

Причиной движения тропических циклонов по неклассическим путям является неустойчивость деформационного поля, образованного полярной ложбиной, восточной волной и областями высокого давления. Большое влияние на характер траектории движения циклона оказывает неоднородность подстилающей поверхности (наличие островов, рифов), а также гетерогенность температуры поверхностного слоя воды.

Глава 2. Материалы и методы исследования тайфунов северо-западной части Тихого океана.

Тропические циклоны (ТЦ) являются самыми разрушительными из всех явлений с точки зрения ущерба для человека, экономики и природы. Негативное воздействие ТЦ (сильный ветер, интенсивные осадки) становится особенно неблагоприятным при выходе ТЦ в районы судоходства, интенсивной хозяйственной деятельности и при выходе ТЦ на сушу. В отличие от тропических и субтропических районов, до территории российского Дальнего Востока тайфуны доходят преимущественно в качестве слабых тропических штормов, тропических депрессий, или уже трансформированными внетропическими циклонами.

В связи с этим разработка новых методов прогноза ТЦ на Дальнем Востоке России наряду с автоматизированными средствами моделирования ЖМА и соседних стран, является важной и актуальной задачей.

2.1. История анализа и наблюдений за тайфунами в России.

Интерес, проявляемый российскими учеными к тропическим циклонам, связан не только с потребностями улучшения гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства Дальнего Востока РФ, но и с необходимостью совершенствования глобальных моделей циркуляции атмосферы и океана, развития методов прогноза погоды различной заблаговременности, создания моделей короткопериодных колебаний климата.

Исследования по тайфунам уже длительное время ведутся в РФ. Среди первых отечественных исследований тайфунов следует отметить работы, например, таких ученых как Стремоусов, 1935; Хромов, 1940; Барабашкина и Лескова, 1958[2].

В дальнейшем особенности формирования, эволюции и перемещения тайфунов вызвали широкий и возрастающий интерес отечественных исследователей.

Стоит отметить вклад таких исследователей как Минина Л.С., которая заложила основы изучения тропических циклонов с использованием спутниковой информации об облачности. Уже позже Шулейкин В.В. разработал теорию расчета движения и затухания тропических циклонов и главных волн, создаваемых тайфунами. Первая в РФ теоретическая модель тропического циклона была построена Игнаевым В.И.

Первые исследования тайфунов научно-исследовательскими судами погоды ДВНИГМИ были начаты в 1970г.

Программа исследований процессов синоптического масштаба была центральной в Атлантическом тропическом эксперименте. Это связано с разработкой численных моделей тропической циркуляции, установлением физики механизма взаимодействия между процессами в зоне тропиков, изучением механизма перераспределения энергии в процессах.

Как известно из [2], конечной целью подобных экспериментов является усовершенствование долгосрочных прогнозов погоды и прогнозов зарождения, эволюции и перемещения тропических циклонов.

Эволюция тропических циклонов всегда привлекала внимание исследователей, эволюция ТЦ изучалась по данным натурных измерений в атмосфере и океане, методами теоретического анализа, численного и лабораторного (физического) моделирования.

Применительно к ТЦ эффективной оказалась модель, впервые разработанная в 1973 г. американским ученым Фитцджеральдом. В дальнейшем эта модель была дополнена измерительной техникой и модернизирована.

В настоящее время численные региональные прогнозы тропических циклонов для Дальневосточного региона РФ осуществляется на основе негидростатической мезомасштабной модели WRF-NMM. Здесь WRF

является сокращением от Weather Research and Forecasting. Вторая составляющая этого сокращенного названия модели обозначает её динамическое ядро. NMM является сокращением от Nonhydrostatic Mesoscale Model, это динамическое ядро было разработано в NCEP (National Centers for Environmental Prediction) в США З. Яничем и Т. Блэком. В ДВНИГМИ модель WRF-NMM была собрана и настроена под дальневосточный регион в 2011 году. Эксперименты по составлению прогнозов моделью WRF-NMM начались в этом же году.

Данную модель HWRF «ДВНИГМИ» в совокупности с различными программными комплексами для гидродинамического моделирования, например, такими как ПК CARDINAL используют для исследовательских целей, а также для практического применения в оперативно-прогностической работе.

Метеорологические агентства региона Восточной Азии имеют собственные разработанные модели и методы исследования и прогнозирования тайфунов.

Например, Xiaoxu Qi в своем исследовании Research on the “No-Typhoon July” in 2020 and Typhoon Frequency Variations in July in Recent 70 Years для выявления закона распределения, изменения побуждений и аномальных колебаний частоты тайфунов в июле использовал модель сезонных прогнозов второго поколения "воздух-море" (BCC-CSM) Китайского национального климатического центра. Операционная система Dynamic Extended Range Forecast второго поколения версии 2.0 (DERF2.0) Национального климатического центра Китайского метеорологического управления создана на основе модели спектра атмосферной циркуляции, обеспечивающей декадную и среднемесячную циркуляционную ситуацию, и метеорологические элементы в следующие 40 дней. В 2014 году на основе модели климатической системы второго поколения была разработана модель BCC_CSM1.2 для расширенного прогнозирования[7].

В качестве другого примера применения новейших инструментов моделирования можно привести работу Haibo Niu «Modeling Study on the Asymmetry of Positive and Negative Storm Surges along the Southeastern Coast of China» с соавторами [10]. В данном исследовании для решения поставленных задач использовалась трехмерная модель штормовых нагонов, которая была разработана на основе модели океана конечного объема (FVCOM) на основе ретроспективных прогнозов четырех штормовых нагонов, вызванных тайфунами. Для прогнозирования развития штормовых нагонов применялась методика системы ансамблевого прогнозирования (EPS). Она оперативно использовалась различными агентствами, такими как Агентство по окружающей среде Великобритании, Служба предупреждения о штормовых нагонах Рейксватерштат и Управление водного хозяйства в Нидерландах.

Основным преимуществом метода EPS является получение информации неопределенности прогноза, и он может работать, выполняя несколько прогнозов с разными начальными условиями, граничными условиями и физикой модели.

2.2. Эволюция сильнейших тайфунов, оказавших влияние на северо-западную часть Тихого океана за период 2015-2021гг.

Ряд национальных метеорологических служб и научных агентств прогнозируют, сколько тропических циклонов, тропических штормов и тайфунов сформируется в течение каждого сезона, и какая часть тропических циклонов окажет влияние на конкретную страну.

Среди этих агентств – Консорциум риска тропических штормов (TSR) Университетского колледжа Лондона, Тайванское Центральное бюро погоды.

В северо-западной части Тихого океана есть два отдельных агентства: Японское метеорологическое агентство (JMA) и Бюро Филиппинских атмосферных, геофизических и астрономических услуг (PAGASA), которые присваивают названия тропическим циклонам, потому так часто тайфуны имеют двойные названия.

JMA присваивает имя тропическому циклону, когда тот приобретает 10-ти минутную устойчивость скорости ветра не менее 65км/час в любом месте северо-западного региона Тихого океана, в то время как PAGASA присваивает название тропическим циклонам, которые переходят в стадию Тропическая депрессия (TS) образуются в зоне ответственности Филиппин, расположенной между 135° в.д. и 115° в.д. и между 5° с.ш. и 25° с.ш.

В качестве исходных данных для анализа траекторий и эволюции тайфунов в данной работе были выбраны тропические циклоны за сезоны 2015-2021гг.

По данным ДВНИГМИ [8] в 2015 году в северо-западной части Тихого океана образовалось 27 тропических циклонов (ТЦ), что на 5,5% выше нормы (в сравнении со средним многолетним количеством (1970-2009гг.) – 25,6ТЦ). Сезон тайфунов в северо-западной части Тихого океана начался рано и был довольно активным в первой своей половине (9ТЦ), что превысило норму (4,1ТЦ) более чем вдвое (на 119,5%). В период с июля по октябрь возникло 18 ТЦ (84,1% от нормы). ТЦ зарождались ежемесячно, последний ТЦ образовался 9 декабря. Наиболее активный циклогенез был в июле (4 ТЦ) и сентябре (6 ТЦ) при норме 3,6 и 4,8 ТЦ соответственно.

Самыми глубокими были ТЦ SOUDELOR (1513) и NOUL (1506), с давлением в их центрах 900 и 915гПа, и максимальной скоростью ветра 100–115 (в порывах 140–165) узлов. Российский Дальний Восток подвергался влиянию 11 ТЦ, из них 4 уже трансформировались во внетропические циклоны.

Траектории сильнейших ТЦ за сезон 2015г. представлены на Рис.9.

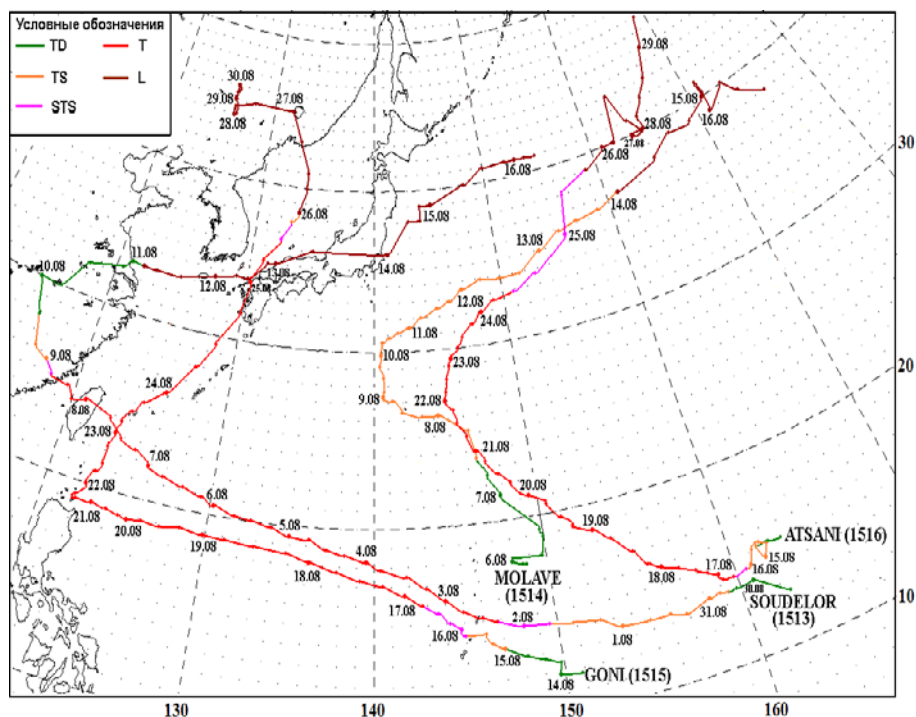


Рис.9. Траектории тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана в августе 2015 г.

ТЦ SOUDELOR (1513) возник в 18 час. ВCB 29 июля в районе $12,5^{\circ}$ с. ш., $162,4^{\circ}$ в. д. Смещаясь на запад, северо-запад вдоль южной периферии субтропического антициклона, в 12 час. 30 июля тропическая депрессия (TD) преобразовалась в TS. Далее в 18 час. 1 августа, через 12 часов достиг стадии тайфуна. Давление в его центре понизилось до 975гПа, максимальная скорость ветра возросла до 40 (порывами 60) узлов. В последующие двое суток над теплыми водами в зоне слабых вертикальных сдвигов ветра началась быстрая интенсификация тайфуна SOUDELOR. Днем 2 августа тайфун SOUDELOR, сопровождаемый проливными дождями и шквалистым ветром, прошел над островом Сайпан. На острове отмечались массовые разрушения: повалены деревья и линии электропередачи, повреждены дома, перевернуты автомобили. В общей сложности пострадало 50 тыс. жителей. В течение нескольких дней от воздействия тайфуна продолжался высокий прибой. В 12 час. 3 августа SOUDELOR стал супер-тайфуном с давлением 925гПа, максимальной скоростью ветра 100 порывами 140 узлов. По данным спутника НАСА за 11 час. 3 августа интенсивность дождя южнее хорошо определенного глаза тайфуна была более 58мм/час. Спустя 6 часов

SOUDELOR достиг пика своего развития, углубившись до 900гПа с максимальной скоростью ветра 115 узлов и порывами 165 узлов. Став самым сильным в сезоне 2015 года, супер-тайфун SOUDELOR в течение суток сохранял свою максимальную интенсивность, вызывая волны до 14,6метров. На инфракрасном спутниковом изображении облачности за 00:40час. ВCB 4 августа (Рис.10) виден большой вихрь с хорошо организованной облачной системой и четким глазом диаметром 15 морских миль, окруженным мощными грозовыми облаками.

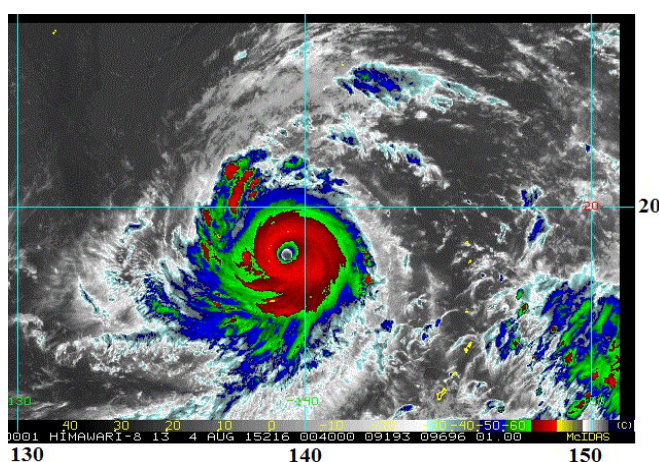


Рис.10. Инфракрасное спутниковое изображение облачности супер-тайфуна SOUDELOR (1513) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 00:40час. ВCB 4 августа 2015 г.

Значительный ущерб Тайфун SOUDELOR(1513) нанес Тайваню и юго-восточным районам страны (провинциям Чжэцзян, Фуцзянь, Аньхой и Цзянси). Общий ущерб составил более 1,3млрд долларов. Всего погибло 34 человека. Сильный дождь и штормовой ветер повалили деревья, привели к наводнениям и оползням в горных районах. Было уничтожено или повреждено более 65тыс. домов. Более 4млн потребителей остались без электроснабжения. Разрушено 2293 берегоукрепительных и ирригационных инфраструктурных объектов. Отменено более 530 авиарейсов и 200 рейсов высокоскоростных поездов.

По данным [11] в 2016 году в северо-западной части Тихого океана образовалось 26 тропических циклонов, что примерно на 2% выше нормы

(25,6 ТЦ). Сезон тайфунов в северо-западной части Тихого океана начался поздно. Открыл его супер-тайфун (STY) NEPARTAK (1601), зародившийся 2 июля. Самыми глубокими были супер-тайфуны NEPARTAK (1601), MERANTI (1614), HAIMA (1622), CHABA (1618), NOCK-TEN (1626). Давление в их центрах понижалось соответственно до 890, 900, 900 905, 915гПа. Максимальная скорость ветра достигала 100–115 (в порывах 140–165) узлов. Российский Дальний Восток подвергался влиянию 10 ТЦ в стадиях: тайфуна, STS, TS, TD и внетропического циклона (L).

Траектории сильнейших ТЦ за сезон 2016г. представлены на Рис.11.

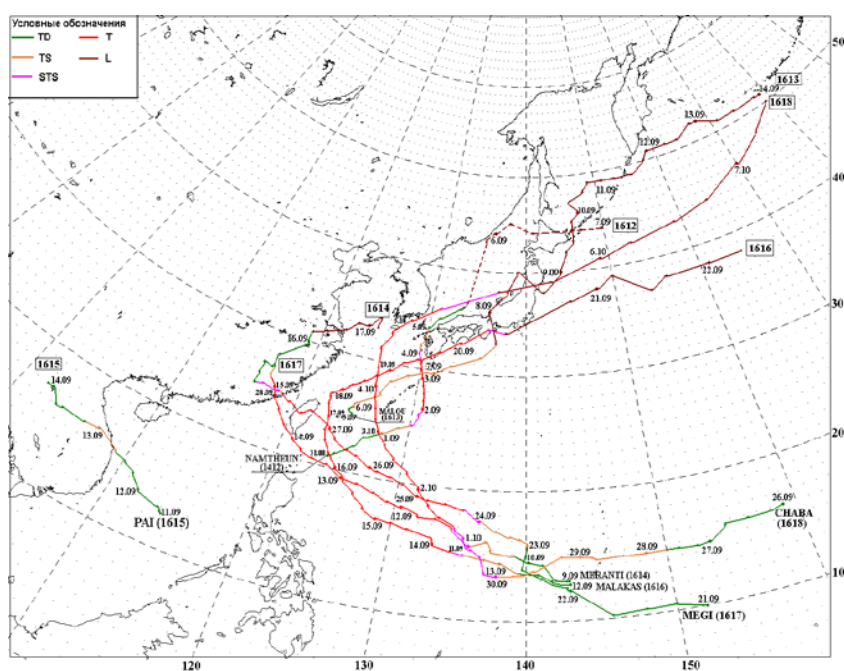


Рис.11.Траектории тропических циклонов на северо-западе Тихого океана в сентябре 2016 г.

ТЦ MERANTI (1614) образовался в 00 ВСВ 9 сентября к западу от о. Гуам. Смещаясь на северо-запад со скоростью 10–12 узлов, в 06час. ВСВ 10 сентября TD преобразовалась в TS, спустя 18 часов развился до стадии STS. Давление в его центре понизилось до 980гПа, максимальная скорость ветра возросла до 55 (порывами 75) узлов, радиусы сильного и штормового ветров соответственно составляли 120 и 50 морских миль. Через двое суток ТЦ достиг стадии супер-тайфуна. Давление в его центре понизилось до 920гПа, максимальная скорость ветра возросла до 100 (порывами 140) узлов. Инфракрасное спутниковое изображение облачности за 06час.12 сентября

(Рис.12) показало холодный плотный центральный облачный массив с четким глазом тайфуна, окруженный кольцом облаков глубокой конвекции. Облачные спирали с мощными грозами окутывали центральный облачный массив с северо-востока и юга, юго-запада. Грозовые облака достигли южных островов Филиппин. В 12 час. 13 сентября тайфун MERANTI(1614) достиг своего максимального развития и сохранял интенсивность в последующие 18 часов. Давление в его центре понизилось до 890гПа, максимальная скорость ветра возросла до 120 (порывами 170) узлов.

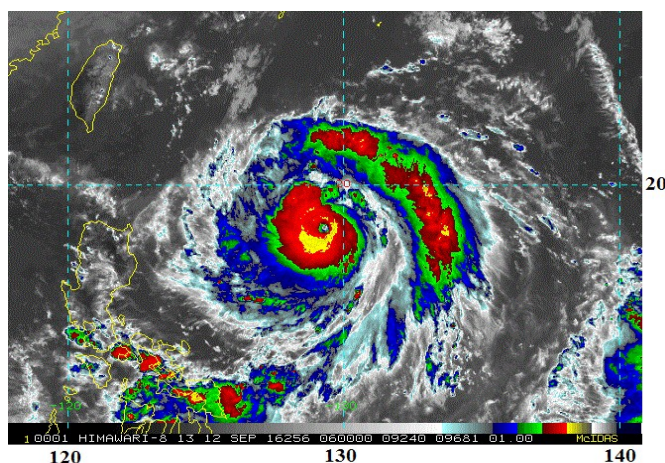


Рис.12. Инфракрасное спутниковое изображение облачности супер-тайфуна MERANTI (1614) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 06 час. ВСВ 12 сентября 2016 г.

MERANTI(1614) стал самым сильным с 1949 года тайфуном, который выходил на побережья Китая. По официальным данным на юго-востоке Китая погибло 28 человек, 50 человек ранены, 15 человек числятся пропавшими без вести. Проливные дожди и сильный ветер вызвали наводнения и оползни. Стихия разрушила 16тыс. и повредила 12тыс. строений. Было нарушено авиасообщение и работа общественного транспорта. [11].

Сезон тихоокеанских тайфунов 2017 г был сезоном ниже среднего с точки зрения накопленной энергии циклонов, а также количества тайфунов, супер-тайфунов. За 2017 год не зародилось тайфунов, достигших 5 категории.

По информации [12] на северо-западе Тихого океана развились 27 тропических циклонов, что на 5,5 % выше нормы (25,6ТЦ). Сезон тайфунов начался 23 апреля. Наиболее активный циклогенез происходил в июле (9ТЦ) и в августе (5ТЦ) при норме 3,6 и 5,9ТЦ, соответственно.

Из 27 ТЦ сезона 2017 г. на Филиппины вышло 12ТЦ, на Вьетнам – 7ТЦ, на Китай – 6ТЦ, на Японию – 5ТЦ и 2ТЦ воздействовали на Корейский п-ов. Пострадали от ТЦ также Марианские и Каролинские острова.

Самым интенсивным в сезоне был супер-тайфун LAN(1721). Давление в его центре в момент максимального развития понижалось до 925гПа, а максимальная скорость ветра достигала 95 (в порывах 135) узлов.

Траектории сильнейших ТЦ за сезон 2017г. представлены на Рис.13.

ТЦ LAN(1721) развивался из тропической депрессии, зародившейся в 18час.ВСВ 14 октября восточнее Палау. Смещаясь над теплой (30°С) поверхностью Филиппинского моря в области низкого вертикального сдвига ветра, через сутки TD преобразовалась в TS LAN(1721) с давлением в центре 994гПа, максимальной скоростью ветра 40 (порывами 60) узлов.

В 18час. 20 октября он достиг своего максимального развития, углубившись до 925гПа, максимальная скорость ветра возросла до 95 (порывами 135) узлов, соответствующая стадии супер-тайфуна.

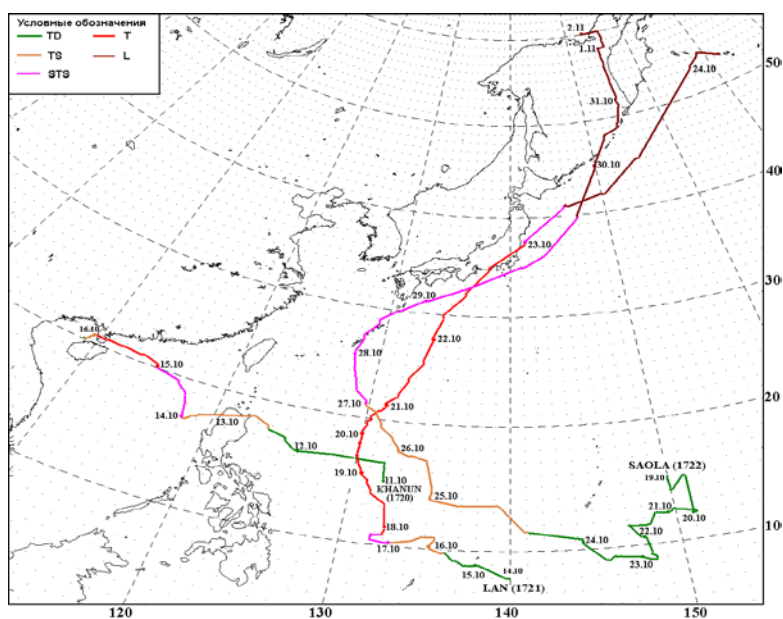


Рис.13.Траектории тропических циклонов, возникших в северо-западной части Тихого океана в октябре 2017 г.

На инфракрасном спутниковом изображении облачности (Рис.14) видна хорошо сформированная облачная структура тайфуна с большим, в диаметре 50 морских миль, глазом, окруженным сильными грозами.

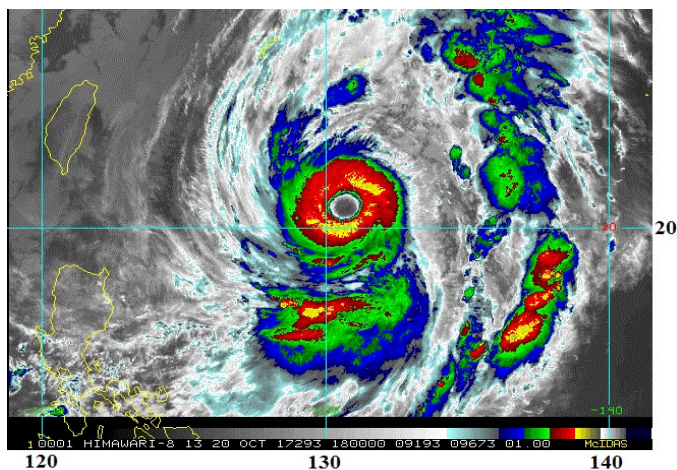


Рис.14.Инфракрасное спутниковое изображение облачности тайфуна LAN(1721) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 18час. ВСУ 20 октября 2017 г

По сообщениям СМИ в Японии тайфун LAN(1721) унес жизни 7 человек, 95 человек получили ранения. По данным Метеорологического агентства Японии количество осадков во многих районах Японии превысило климатическую норму в несколько раз.

На северо-западе Тихого океана в 2018 г. по данным [13] развивалось 29 тропических циклонов, что на 12,3 % выше нормы (25,6ТЦ). Наиболее активный циклогенез происходил в августе и июле, действовали соответственно 9 и 5ТЦ при норме 5,9 и 3,6ТЦ. В июне и сентябре зарождалось по 4ТЦ (при норме 1,7 и 4,8ТЦ, соответственно), в ноябре – 3ТЦ. Стадии супер-тайфуна достигли 6 ТЦ. Самыми интенсивными в сезоне были супер-тайфуны MANGKHUT(1822) и YUTU(1826). Давление в их центрах в момент максимального развития понижалось до 905гПа, а максимальная скорость ветра достигала 110 и 115 (в порывах 155 и 165) узлов, соответственно.

Траектории сильнейших ТЦ, зародившихся в северо-западной части Тихого океана в 2018 г., представлены на Рис.15.

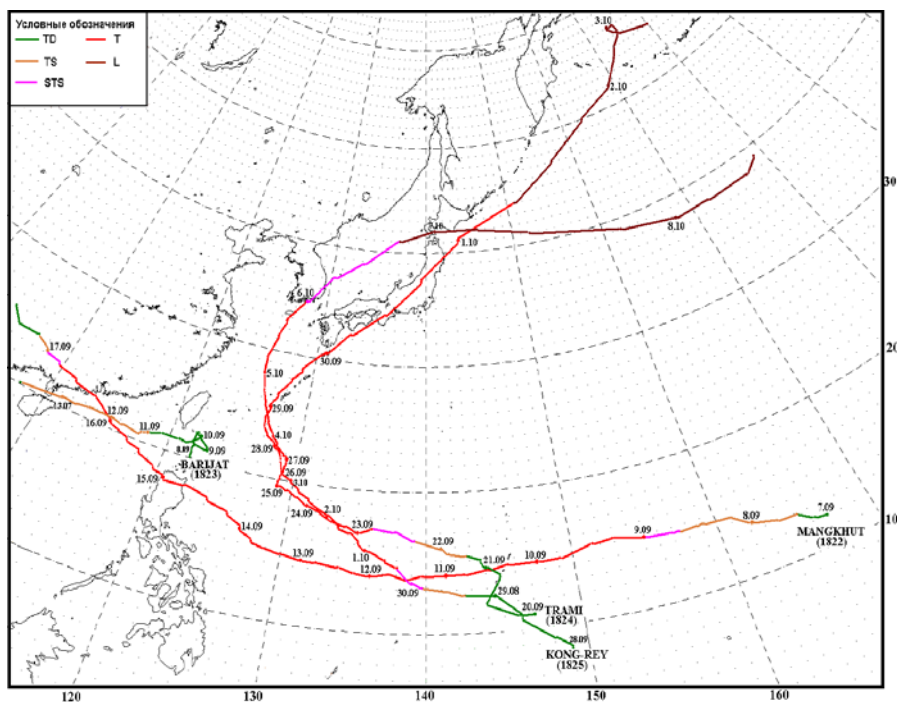


Рис.15. Траектории тропических циклонов, зародившихся в северо-западной части Тихого океана в сентябре 2018 г.

ТЦ KONG-REY(1825) развился из TD, возникшей в 06час. ВCB в районе Каролинских островов. Смещаясь вдоль юго-западной периферии субтропического антициклона на запад – северо-запад со скоростью 12–14 узлов, через сутки TD вышла в район с благоприятными гидродинамическими условиями: температура морской поверхности 30–31 °С, низкий (5–10 узлов) вертикальный сдвиг ветра и хороший двойной отток воздуха в верхней тропосфере. К 18час. 1 сентября KONG-REY достиг стадии супер-тайфуна с давлением 915гПа, максимальной скоростью ветра 105 (порывами 150) узлов и сохранял эту интенсивность в течение 30 часов. Инфракрасное спутниковое изображение показало, что тайфун имеет обширную облачную систему с небольшим, в диаметре около 15 морских миль, четким глазом бури, окруженным областью глубокой конвекции (Рис.16).

В западные районы острова Кюсю и юго-западные районы острова Хонсю KONG-REY принес сильный до штормового ветер. На острова Кюсю

и Сикоку обрушились проливные дожди. Здесь выпало около 100 мм осадков.

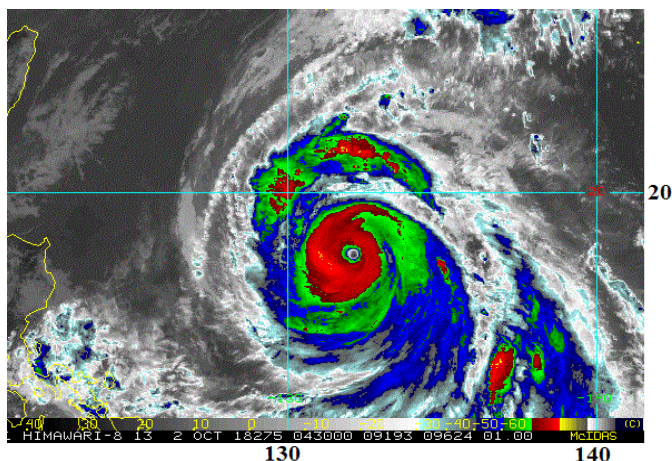


Рис.16. Инфракрасное спутниковое изображение облачности супер-тайфуна KONG-REY (1825) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 04:30час.ВСВ 2 октября 2018 г.

Сезон 2019г начался рано и стал самым дорогостоящим сезоном тихоокеанских тайфунов. По данным [14] в 2019 г. действовало 29 тропических циклонов, что на 13,3 % выше нормы (норма – 25,6ТЦ).

Наиболее активный тропический циклогенез происходил в сентябре (6ТЦ, при норме5,9).

Самым интенсивным в 2019 г. был супер-тайфун HALONG(1923). Давление в его центре в момент максимального развития понижалось до 905гПа, а максимальная скорость ветра достигала 115 (порывами 165) узлов.

Из 29ТЦ сезона 2019 г. на Японию воздействовало 11ТЦ, на Китай и Вьетнам – по 6ТЦ, на Корейский п-ов – 5ТЦ. На Филиппины и Марианские острова вышло по 7ТЦ.

На российскую территорию Дальнего Востока оказали прямое или косвенное воздействие 10ТЦ (34,5 % от всех ТЦ).

В сезоне 2019 г. выделялось два очага зарождения тайфунов. Первый очаг (5ТЦ) наблюдался в Филиппинском море в зоне, ограниченной 7–21° с. ш., 128–138° в. д. Второй очаг (5ТЦ) располагался в районе Марианских островов и восточнее (10–18°с. ш., 152–163° в. д.). Точки поворота ТЦ на

обратную ветвь траектории лежали в широтной зоне 19–38° с. ш. между 119,5 и 137,5° в. д.

Самый сильный ТЦ HALONG(1923) сформировался из тропической депрессии (TD), возникшей в 00час. ВCB 2 ноября к востоку от Марианских островов. Давление в ее центре изменялось от 1004 до 1000гПа, максимальная скорость ветра составляла 30 (в порывах 45) узлов. Смещаясь на северо-запад со скоростью 12–14 узлов над теплой (29–30°C) морской поверхностью в области слабого (меньше 15 узлов) вертикального сдвига ветра, в 18час. 2 ноября TD преобразовалась в TS HALONG.

Продолжив движение над открытыми водами северо-западной части Тихого океана вдоль юго-западной периферии гребня субтропического антициклона, шторм продолжал усиливаться.

Тайфун HALONG(1923) развился до стадии супер-тайфуна с минимальным давлением 905гПа, максимальная скорость ветра составляла 115 (в порывах 165) узлов. В 15час. 5 ноября супер-тайфун HALONG находился северо-восточнее Северных Марианских островов в координатах 20,1° с. ш., 150,7° в. д. На инфракрасном спутниковом изображении облачности виден хорошо организованный вихрь с большой симметричной областью глубокой конвекции, окружающей глаз тайфуна диаметром 8 морских миль (Рис.18).

Траектории ТЦ, возникших в ноябре 2019 г., представлены на Рис.17. Цветом обозначены стадии развития. В 15час. 5 ноября супер-тайфун HALONG находился северо-восточнее Северных Марианских островов в координатах 20,1° с. ш., 150,7° в. д.

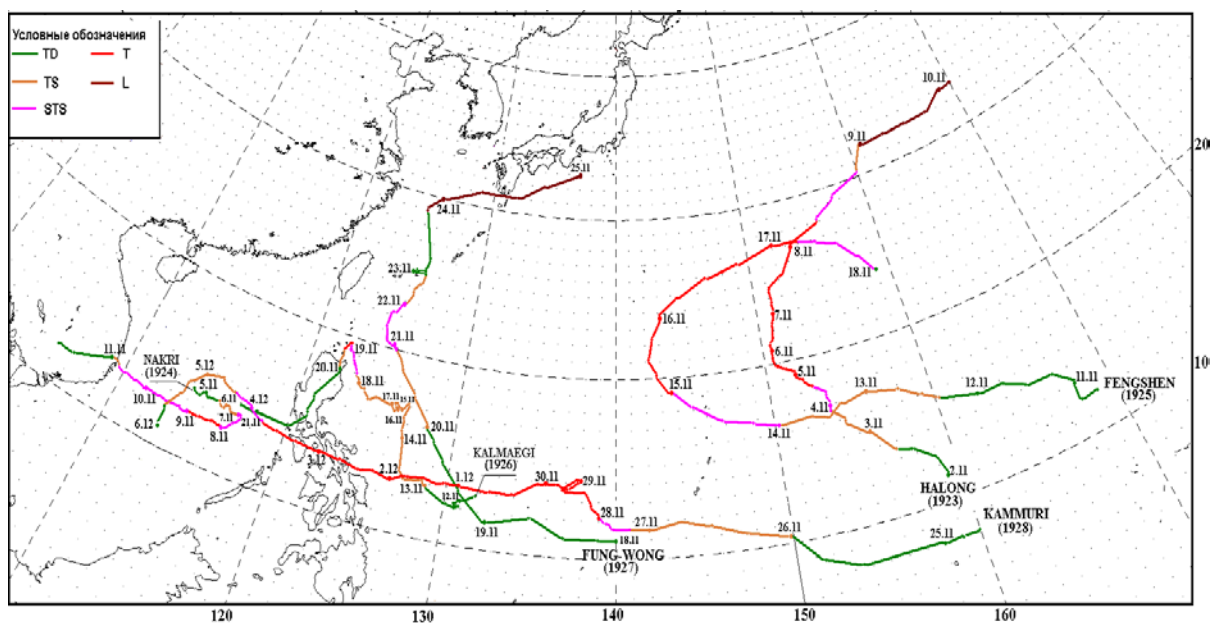


Рис.17 Траектории сильнейших тропических циклонов, возникших в 2019 г.

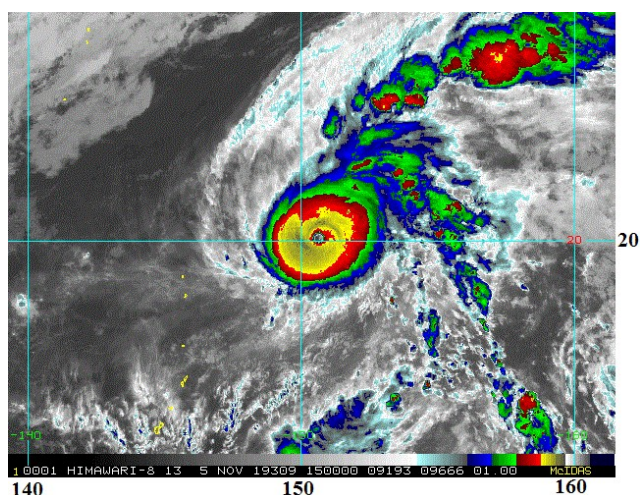


Рис.18.Инфракрасное спутниковое изображение облачности супер-тайфуна HALONG(1923) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 15час. ВСВ 5 ноября 2019 г.

Поскольку тайфун HALONG смещался в сторону открытых вод северо-западной части Тихого океана, об ущербах не сообщалось.

На северо-западе Тихого океана в сезоне 2020 г. по данным [15] оказывали влияние 23 тропических циклонов, достигших стадии тропического шторма, что на 10,2% ниже нормы (25,6ТЦ). ТЦ возникали с мая по декабрь. Наиболее активный тропический циклогенез был выявлен в октябре и августе. Из 23ТЦ за сезон на Филиппины и Вьетнам

воздействовало по 12ТЦ, на Китай – 9ТЦ, на Японию – 7ТЦ, на Корейский п-ов – 5ТЦ. На Марианские острова оказал влияние один ТЦ.

Самым мощным в 2020 г. был супер-тайфун GONI(2019). Давление в его центре в момент максимального развития понижалось до 905гПа, а максимальная скорость ветра достигала 120 (в порывах 170) узлов.

Траектории сильнейших ТЦ, зародившихся в северо-западной части Тихого океана в 2020 г., представлены на Рис.19, ниже приведено краткое описание их развития.

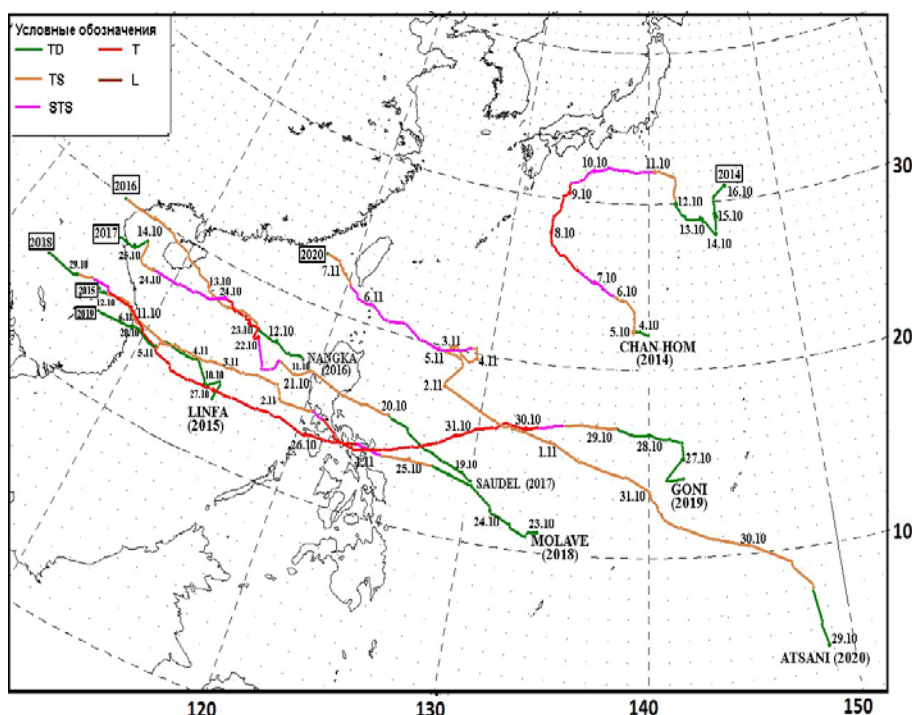


Рис.19 Траектории тропических циклонов, зародившихся в северо-западной части Тихого океана в октябре 2020 г.

ТЦ GONI(2019) развился из тропической депрессии, сформировавшейся в 12час.ВСВ 26 октября в Филиппинском море к западу от Марианских островов.

К 06час. 30 октября давление в центре тайфуна GONI понизилось до 945гПа (на 20гПа за 6 часов), а максимальная скорость ветра возросла до 100 (порывами 140) узлов. На инфракрасном спутниковом изображении облачности (Рис.20) виден очень компактный вихрь с четко очерченным глазом бури в диаметре 11 морских миль. Продолжая быстро углубляться, в

12час. 30 октября GONI стал супер-тайфуном. Давление в его центре достигло 915гПа, максимальная скорость ветра составляла 115 (в порывах 165) узлов

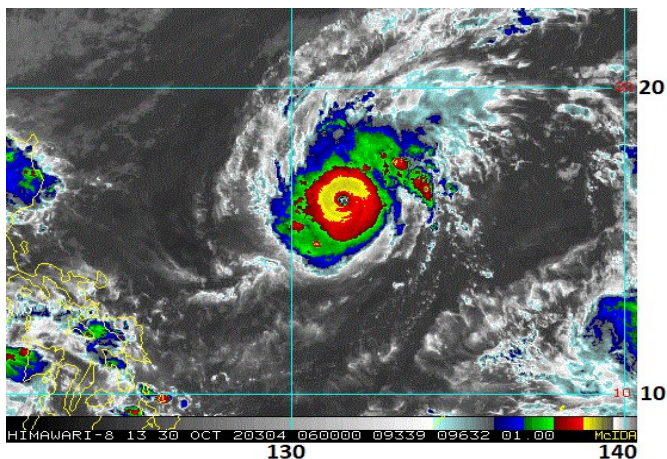


Рис.20. Инфракрасное спутниковое изображение облачности тайфуна GONI (2019) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 06час. ВСУ 30 октября 2020 г.

Наибольший ущерб от тайфуна GONI получил регион Бикол (Филиппины). Тайфун GONI затронул более 2млн. человек. Были эвакуированы почти 390тыс. человек. Общая сумма нанесенного ущерба составила 369млн долларов США.

Сезон тихоокеанских тайфунов 2021 года по данным [16] был сезоном ниже среднего (25,6ТЦ), когда в общей сложности произошло 22 шторма, меньше всего с 2011 года, 9 тайфунов и 5 супер-тайфунов.

Тайфун SURIGAE(2102) стал самым мощным тропическим циклоном за многолетнюю историю наблюдений в Северном полушарии за апрель, достигший стадии супер-тайфуна (при норме 0,6ТЦ), превзойдя по интенсивности тайфун THELMA в апреле 1956 года, в котором максимальная скорость ветра составляла 105 (в порывах 150) узлов. В момент пика своего развития давление в его центре составляло 895гПа, максимальная скорость ветра достигла 120 (в порывах 170) узлов

Траектория супер-тайфуна SURIGAE(2102) представлена на Рис.21.

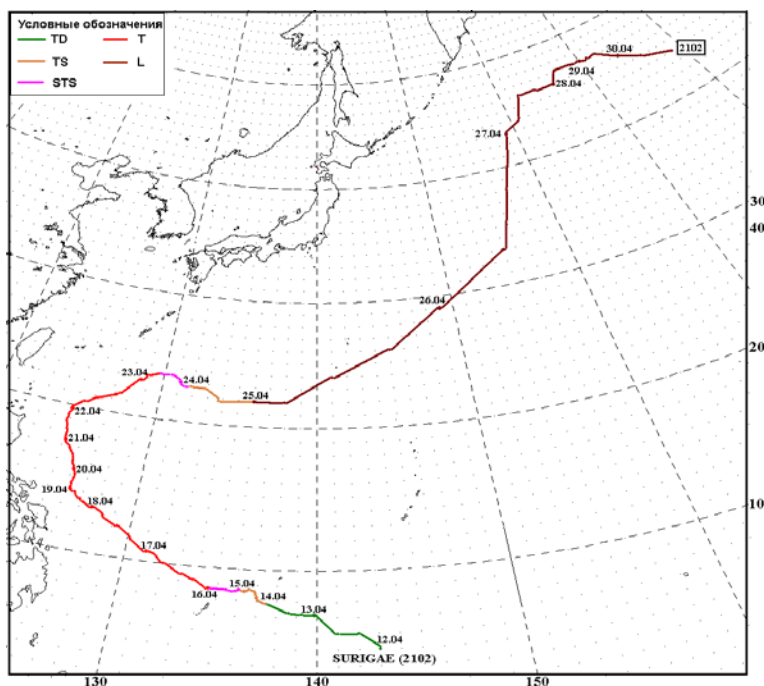


Рис.21 Траектория супер-тайфуна SURIGAE(2102), возникшего в северо-западной части Тихого океана в апреле 2021 г.

В 18:00 UTC JMA модернизировало циклон до тропического шторма и назвало его SURIGAE. Затем SURIGAE(2102) вошел в филиппинскую зону ответственности PAGASA, получив местное название BISING.

SURIGAE(2102) после развития до стадии тропического шторма продолжал стремительно усиливаться, и 16 апреля JTWC повысил статус SURIGAE(2102) до TY категории 2, на SSHWS. ТЦ продолжал быстро развиваться, пока не достиг стадии супер-тайфуна категории 5, став самым сильным тайфуном, когда-либо зарегистрированным в апреле месяце. SURIGAE(2102) вскоре достиг своего максимума интенсивности с минимальным центральным давлением 895гПа с максимальным устойчивым ветром 120 (в порывах 170) узлов. На снимках (Рис.22.) видно, как тайфун SURIGAE(2102) стремительно развивается до пика интенсивности к востоку от Филиппин 16 апреля.

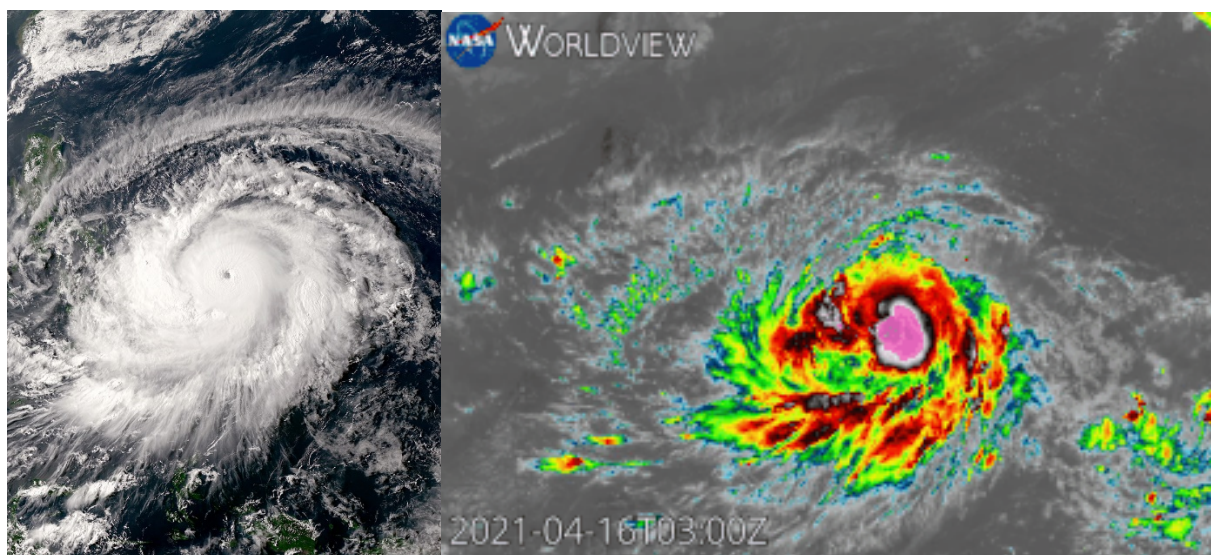


Рис.22. Тайфун SURIGAE(2102) 16 апреля

После достижения максимальной интенсивности признаки концентрической стены глаза тайфуна указывали на то, что шторм подвергался циклу замены стены глаза, при этом центральная плотная облачность начинала нагреваться, а глаза заполнялись облаками. 19 апреля, после цикла замены глазных стенок, SURIGAE(2102) стал кольцевидным.

Ущерб от SURIGAE(2102) на Палау оценивается в 4,8 млн долларов США. Мощные ветры и проливные дожди затронули восточную часть Филиппин, при этом штормовой нагон, вызванный SURIGAE(2102) затопил части береговой линии. Тайфун SURIGAE(2102) убил в общей сложности 8 человек и оставил еще 10 пропавшими без вести. Ущерб от урагана составил не менее 5,65млн долларов США

Обобщая данные, за последние 6 лет в период 2015-2021гг. по территории северо-западной части Тихого океана проследовало более 80 тропических циклонов, достигших стадии Тайфун (ТУ). Из них порядка 31 достигли стадии супер-тайфуна (STY5). Например, по данным [22] за более ранний период (2008-2014гг.) тропических циклонов, достигших стадии Тайфун, было менее 70.

Основная информация о сильнейших ТЦ за период 2015-2021гг. собранная на основании полученных данных [10-16] представлены в Таб.4.

Как можно заметить из Таб.4, самыми мощными за 2015-2021гг стали 8 супер-тайфунов. По траекториям следования тайфуны можно условно разделить на достигших побережий Японии и Дальнего Востока РФ и прошедших по западной части Тихого океана.

год	всего тц	Из них: в СЗТО	Достигли 3-4 категории	Оказали влияние на ДВ на В-Вост, Сахалин, Курилы
2008	84	22	11	0
2009	82	22	4	3
2010	69	14	7	1
2011	73	21	11	5
2012	84	25	14	6
2013	89	29	12	6
2014	77	22	9	3

Таб.5. Общий обзор всех ТЦ в период с 2008 по 2014 гг.

По сравнению с периодом 2008-2014, по данным [22], отраженным в Таб.5 за 2015-2021гг. берегов Дальнего Востока РФ и Японии достигли: 3 супер-тайфуна: SOUDELOR, LAN и KONG-REY.

В то время как 5 супер-тайфунов: HALONG, GONI, SURIGAE, MERANTI, YUTU проследовали по западной части Тихого океана и затронули Филиппины, Китай и Тайвань.

Наблюдая за тем какую опасность и разрушительные последствия несут за собой тропические циклоны, достигающие стадии тайфунов, становится понятной такая критическая необходимость в совершенствовании современных методов моделирования для создания заблаговременного прогноза и более точного анализа, чтобы правительства стран и общественность могли отслеживать тенденциозность развития тайфунов и заранее принимать меры по предотвращению и смягчению последствий стихийных бедствий.

В нашей стране для анализа штормовых нагонов используется метод гидродинамического моделирования, основой которого являются программный комплекс CARDINAL и численная модель Японского моря.

Входные поля давления и ветра для океанографической модели задаются по данным оперативной региональной прогностической модели атмосферы Weather Research and Forecasting (WRF).

Негидростатическая модель WRF обширно применяется в целях краткосрочного прогнозирования погоды и моделирования атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба.

Name/имя	Date active	Peak classification	Sustained wind speeds (km/h)	Pressure (hPa)	Areas affected	Damage (USD)	Deaths	
Higos/ Хигос	February 6–12	Super TY 4	165	940	-	-	-	2015
Maysak (Chedeng)/ Майсак	March 26 – April 7	Super TY 5	195	910	-	8,5 million	4	
Noul (Dodong)/Ноул	May 2–12	Super TY 5	205	920	Japan	23,8 million	2	
Dolphin/Дельфин	May 6–20	Super TY 5	185	925	Kamchatka Peninsula	13,5 million	1	
Nangka/Нагнка	July 2–18	Super TY 4	185	925	Japan	209 million	2	
Souldelor (Hanna)/Суделор	July 29 – August 11	Super TY 5	215	900	Japan	4,09 billion	59	
Atsani/Атсани	August 14–25	Super TY 5	185	925	-	-	-	
Dujuan (Jenny)/Дженни	September 19–30	Super TY 4	205	925	-	407 million	3	
Korpu (Lando)/Ланго	October 12–21	Super TY 4	185	925	Japan	313 million	62	
Nepartak (Butchoy)	July 2–10	Super TY 5	205	900	-	1,89 billion	111	2016
Meranti (Ferdie)	September 8–16	Super TY 5	220	890	-	4,79 billion	47	
Chaba (Igme)	September 24 – October 5	Super TY 5	215	905	Japan, Russian Far East	1,29 billion	10	
Songda	October 4–13	Super TY 4	185	925	-	-	-	
Haima (Lawin)	October 14–21	Super TY 5	215	900	Japan	972 million	19	
Nock-ten (Nina)	December 20–28	Super TY 5	195	915	-	123 million	13	
Noru	July 19 – August 8	Super TY 4	175	935	Japan	100 million	2	2017
Lan (Paolo)	October 15–23	Super TY 4	185	915	Japan	2 billion	17	
Jelawat (Caloy)	March 24 – April 1	Super TY 4	195	915	-	-	-	2018
Maria (Gardo)	July 3 – 12	Super TY 5	195	915	-	626 million	1	
Jebi (Maymay)	August 26 – September 4	Super TY 5	195	915	Japan, Russian Far	18,6 billion	17	
Mangkhut (Ompong)	September 6 – 17	Super TY 5	205	905	-	3,77 billion	134	
Trami (Paeng)	September 20 – October 1	Super TY 5	195	915	Japan, Russian Far East	2,69 billion	4	
Kong-rey (Queenie)	September 28 – October 6	Super TY 5	215	900	Japan	172 million	3	
Yutu (Rosita)	October 21 – November 2	Super TY 5	215	900	-	854 million	30	
Wutip (Betty)	February 18 – March 2	Super TY 5	195	920	-	3,3 million	-	2019
Lekima (Hanna)	August 2 – 13	Super TY 4	195	925	-	9,28 billion	90	
Hagibis	October 4 – 13	Super TY 5	195	915	Japan, Russian Far East	>15 billion	98	
Bualoi	October 18 – 25	Super TY 5	185	935	-	-	-	
Halong	November 1 – 8	Super TY 5	215	905	-	-	-	
Haishen (Kristine)	August 30 – September 7	Super TY 4	195	910	Japan	100 million	4	
Goni (Rolly)	October 26 – November 6	Super TY 5	220	905	-	1,02 billion	32	2020
Surigae (Bising)	April 12 – 24	Super TY 5	220	895	-	10,5 million	10	
Chanthu (Kiko)	September 5 – 18	Super TY 5	215	905	Philippines, Taiwan, Ryukyu Islands, East China, South Korea, Japan	748 million	-	2021
Rai (Odette)	December 12 – 22	Super TY 5	195	915	Caroline Islands, Palau, Philippines, Spratly Islands, Vietnam, South China, Hong Kong, Macau	794 million	410	

Таб.4. Сильнейшие ТЦ северо-западной части Тихого океана за 2015-2021гг.

Глава 3. Основные результаты исследования.

Для примера успешного моделирования эволюции тайфуна, вышедшего на Японское море и Дальний Восток, рассмотрена работа К.А. Клеванного [17]. В работе для задания граничных условий на поверхности океана произведен расчет ежечасных полей приземного ветра и давления на основе оперативной технологии численного краткосрочного прогноза погоды “Хаб-15”, разработанной в ДВНИГМИ на базе модели WRF с ядром Advanced Research WRF (ARW) версии 3.4.1.

Данные моделирования приведены за период с 27 августа по 4 сентября 2016 г., и сохранялись через каждый час в проекционной системе Ламберта. Расчеты динамики вод выполнялись с помощью программного комплекса CARDINAL [17] по модели Японского моря (Рис.23) в большей степени в двумерном виде по уравнениям мелкой воды. Для проверки выполнен также расчет в трехмерном представлении.

Поле глубин задавалось по данным сайта NOAA [18] (Рис.23). Площадь акватории в модели 978 тыс. км², объем воды 1638 тыс. км³, средняя глубина 1673 м, максимальная глубина 3800 м. Расчетная сетка состоит из 205 × 437 узлов, средний шаг сетки 8.5 км, max 30.5 км, min 0.5 км.

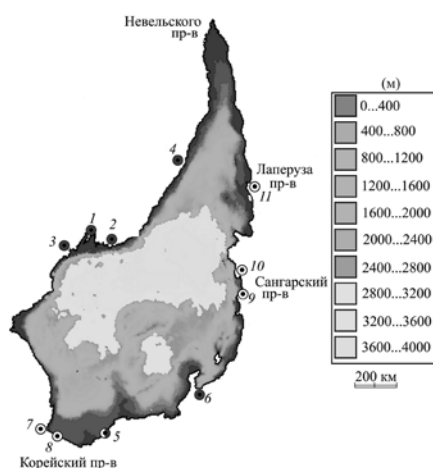


Рис. 23. Поле глубин в модели Японского моря: 1-Владивосток, 2-Находка, 3-Посьет, 4-Сосуново, 5-Хамада, 6-Тояма, 7-Кванъян, 8-Цусимахитакатсу, 9-Симокита, 10-Хакодате, 11-Вакканай. Темные кружки-станции, использованные для сопоставления хода уровня, светлые-для задания граничных условий.

Как известно из [17] на открытых границах модели сначала задавался временной ход приливных колебаний уровня. В дальнейших расчетах в качестве граничных условий для Корейского пролива использовались данные наблюдений в Кванъяне, Цусимахитакатсу и Хамаде, для Сангарского пролива – данные Симокита и Хакодате, для пролива Лаперуза – данные Вакканай на юге и ТРХО7.2 на севере. В точках, расположенных на линии открытой границы между этими пунктами для задания уровня использовалась линейная интерполяция. В начальный момент были заданы 0 уровни и скорости. Временной шаг данных – 1 час

Рассмотрим подробнее эволюцию развития выбранного тайфуна LIONROCK.

Согласно данным [11] ТЦ LIONROCK (1610) развился из тропической депрессии. В 18час.ВСВ 23 августа он развился до стадии тайфуна.

В районе $23,1^{\circ}$ с. ш., $130,5^{\circ}$ в. д. тайфун LIONROCK повернул на северо-восток. Пика своего максимального развития он достиг в 06 ВСВ 28 августа и в течение 18 часов сохранял прежнюю интенсивность. Давление в центре тайфуна понизилось до 940гПа, максимальная скорость ветра возросла до 90 порывами 130 узлов, радиусы сильного и штормового ветров соответственно были 280 и 70 морских миль. На инфракрасном спутниковом изображении облачности за 09час.ВСВ 28 августа ТЦ видно плотно сжатое конвективное ядро диаметром около 60 морских миль с глазом круглой формы (диаметром 20 морских миль), окруженным стеной глаза ТЦ (Рис.24). Наиболее сильные грозы были расположены вокруг центра тайфуна и в его юго-восточном секторе. Был наблюден четкий радиальный отток воздуха в верхней тропосфере над ТЦ. Далее 29 августа в районе $33,0^{\circ}$ с. ш., $133,8^{\circ}$ в. д. тайфун LIONROCK «замкнул» крупную удлиненную петлю и благодаря усилившемуся на востоке антициклону был вынужден повернуть на северо-запад в направлении о. Хонсю, где началось его заполнение.

В связи с нарастающей циклонической активностью над Японским морем и влиянием тайфуна LIONROCK, МЧС было объявлено штормовое

предупреждение: «в период с 29 по 31 августа в южной половине Приморского края и на восточном побережье края ожидаются продолжительные сильные дожди. Дожди будут сопровождаться восточным, северо- восточным ветром 13-18 м/с, на побережье порывами до 25-30 м/с, на мысах до 30-35 м/с (ураган). В заливе Петра Великого ожидается шторм с высотой волн в 4-5 м».

Днем 29 августа в Приморском крае начались сильные дожди, сопровождаемые штормовым ветром, обусловленные южным циклоном. На мысах ветры достигали ураганной силы до 30-33 м/с. 30 августа в крае продолжались сильные, местами очень сильные дожди.

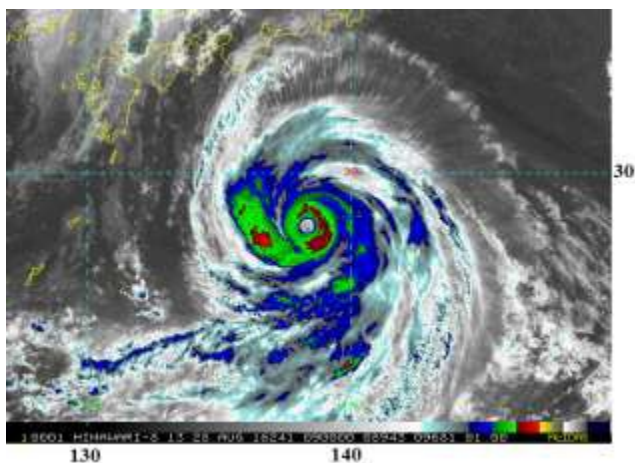


Рис.24 Инфракрасное спутниковое изображение облачности тайфуна LIONROCK (1610) с ИСЗ HIMAWARI-8 за 09час. ВСУ 28августа 2016 г.

Далее тайфун LIONROCK пересек северную часть о. Хонсю и в 12час. 30 августа вышел на пролив Цугару в стадии STS с давлением в центре 972гПа, максимальной скоростью ветра 60 порывами 85 узлов. Над Японским морем он быстро трансформировался во внетропический циклон и в 18час. подошел к восточному побережью Приморья с давлением в центре 980гПа, максимальной скоростью ветра 30-50 узлов в радиусе 350 морских миль от центра (Рис.26).

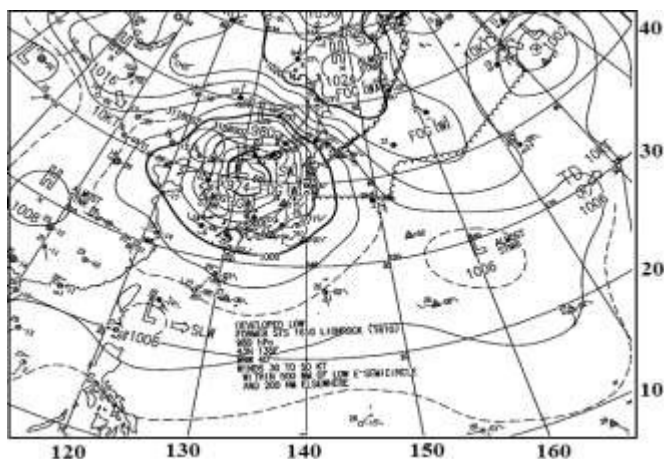


Рис. 26 Фрагмент карты приземного анализа (JMA) за 18 ВСВ 30 августа 2016г

Помимо российского Дальнего Востока тайфун LIONROCK оказал воздействие и на страны юго-восточной Азии: Японию, Корею и Китай. В Северной Корее за сутки 30 августа выпало более 60 мм осадков, а в Южной Корее – до 115 мм.

Больше других от тайфуна LIONROCK пострадала Япония. По сообщениям СМИ на о. Хоккайдо за сутки выпало около 300 мм осадков (более месячной нормы). В префектуре Иватэ и на Хоккайдо произошли прорывы дамб и разливы рек, приведшие к оползням. По состоянию на 3 сентября в префектуре Иватэ погибли 14 человек и два человека на о. Хоккайдо. [11].

По результатам расчетов К.А. Клеванного максимальная скорость ветра достигала 31,5 м/с в 11 ч 30 августа в районе Сангарского пролива. Во Владивостоке пик расчетной скорости ветра составлял 15,3 м/с в 9 ч 29 августа, а по наблюдениям в 15 ч 1 сентября – 17 м/с.

Гидрометеорологическая конъюнктура по расчетам на 0 ч и на 15 ч 30 августа показана на Рис.27. В 0 ч тайфун с давлением в центре 965гПа еще находился над Тихим океаном, скорость ветра достигала 35 м/с. В 15 ч тайфун находился над Японским морем, давление в его центре увеличилось до 972гПа.

Согласно [17] в течение всего периода расчетов в части Японского моря, которая непосредственно прилегает к заливу Петра Великого, поток воды

был направлен на запад, а затем, следуя вдоль береговой линии, поворачивал на юго-запад, таким образом создав штормовой нагон с тах для центральной и южной частей Японского моря подъемом воды в Амурском заливе (до 60см) и в районе залива Посъета (до 70см) (Рис.28). Абсолютный максимум уровня получен в проливе Невельского – 170 см.

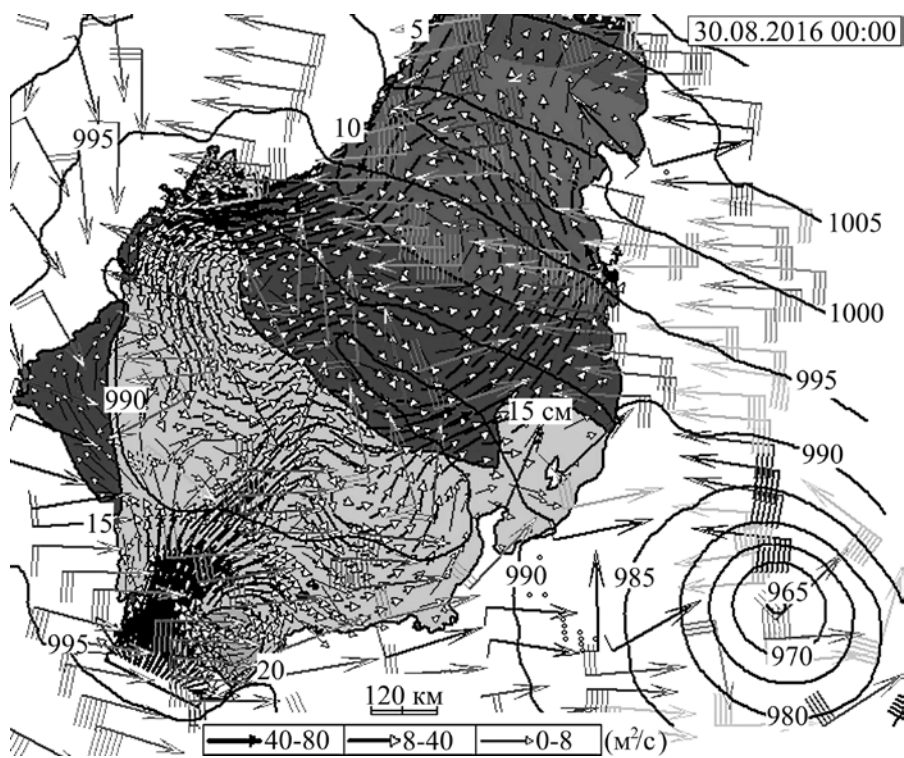
На Рис.29 сопоставлены расчетные характеристики временного хода уровня во Владивостоке, в Находке, заливе Посъет, Сосуново, Хамаде и Тояме и данные, полученные при наблюдении. Статистические характеристики этого сравнения приведены в Таб.5.

Название пункта	Рассеяние, см	Средняя абсолютная ошибка, см	Коэффициент корреляции	Расчетная/измеренная дисперсия, см
Владивосток	14	11	0.85	19/26
Находка	12	9	0.85	21/21
Посъет	10	8	0.89	22/21
Сосуново	15	11	0.76	10/22
Хамада	8	7	0.81	14/13
Тояма	8	7	0.56	9/9

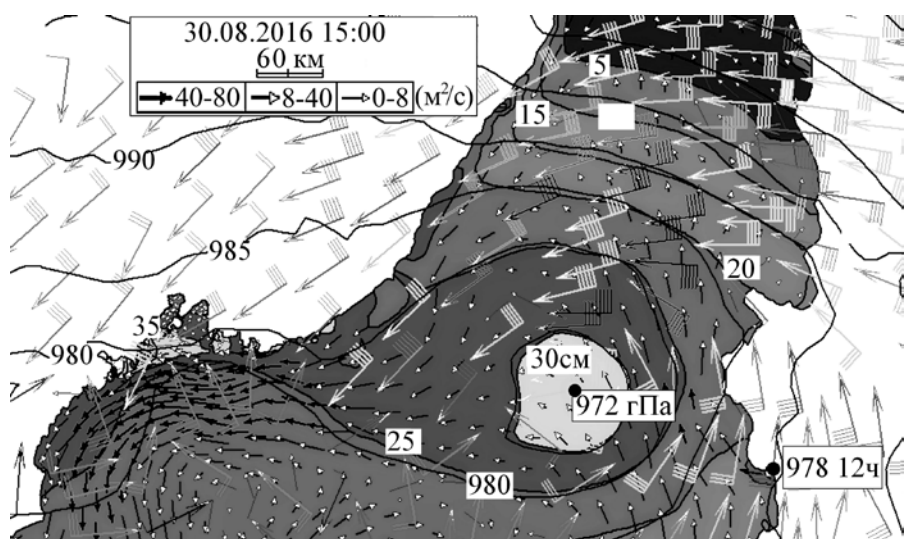
Таб.5.Статистические характеристики сопоставления расчетного и наблюдаемого временного хода уровня 29.08-03.09.2016 [17]

На Рис.30 показано влияние ветра и градиентов атмосферного давления на подъем уровня во Владивостоке, который по данным наблюдений составил 110 см. Амплитуда приливных колебаний лежит в границах 30см, при этом расчетные значения, полученные без учета ветра и давления, вполне согласуются с данными.

При воздействии выбранного тайфуна в результате была получена структура течений в Японском море. А за весь период расчета в акватории, прилегающей к заливам Петра Великого и Посъета, изолинии уровня в открытой части моря повторяли изобары, то есть поток был направлен на юго-запад, что привело к значительному подъему уровня (штормовому нагону). у берегов. Также при следовании ТЦ на акваторию было получено поднятие уровня в открытой части моря, практически соответствующее закону “обратного барометра” [17].



а)



б)

Рис.27. Изобары (гПа), векторы ветра на 10м перьями, изолинии уровня (см) и векторы удельных расходов (m^2/c) в 0 ч (а) и в 15 ч (б) 30.08.2016 г.

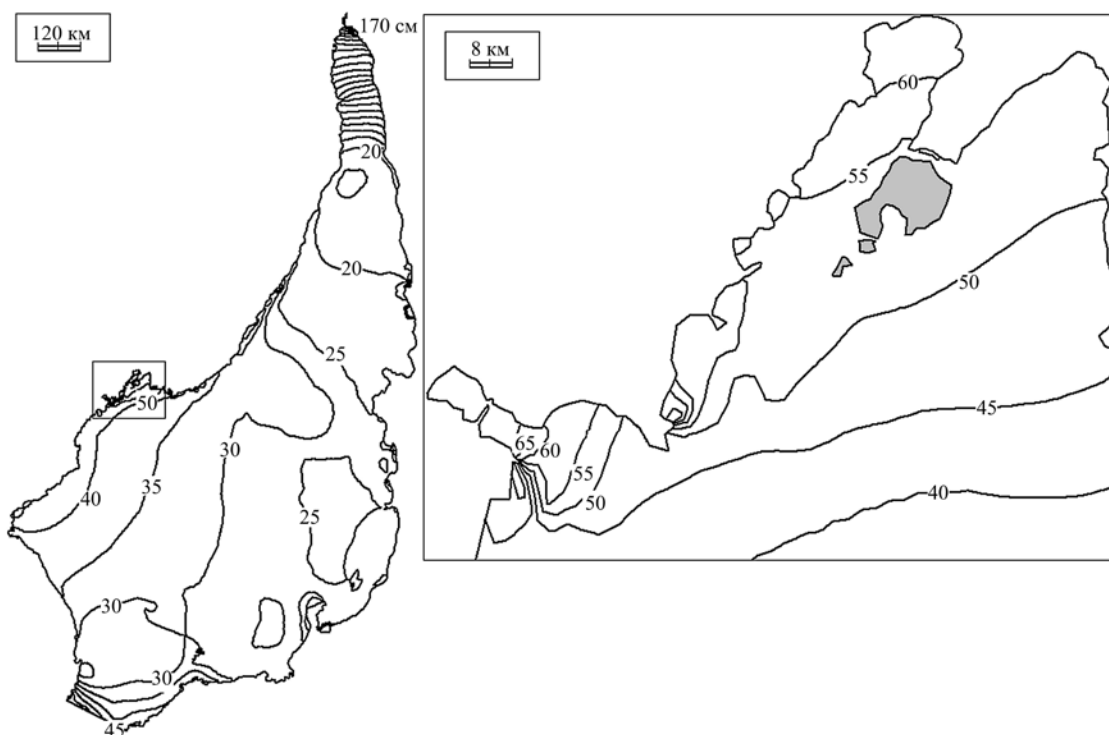
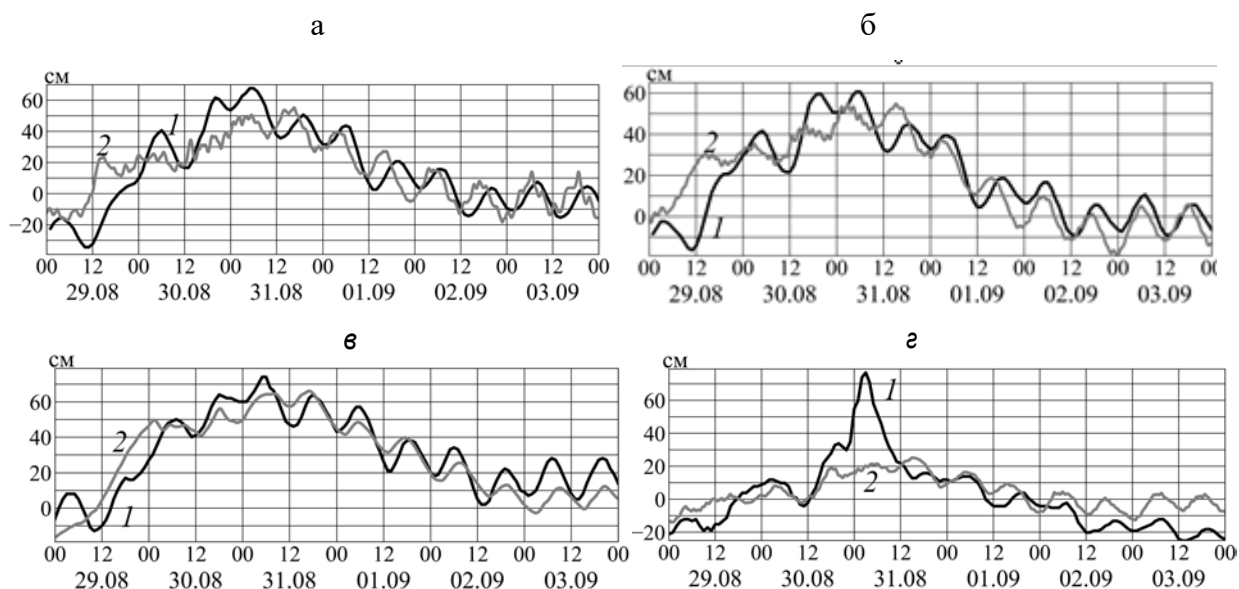


Рис.28. Расчетные максимальные значения уровня (см) за 27.08- 04.09.2016.

В результатах расчетов неверно смоделированными оказались подъемы уровня во Владивостоке и в Сосуново, на которые оказывали влияние ветер и аномальный сток дождевых вод. В то время как в модели ветер, давление и сток рек не учитывались.



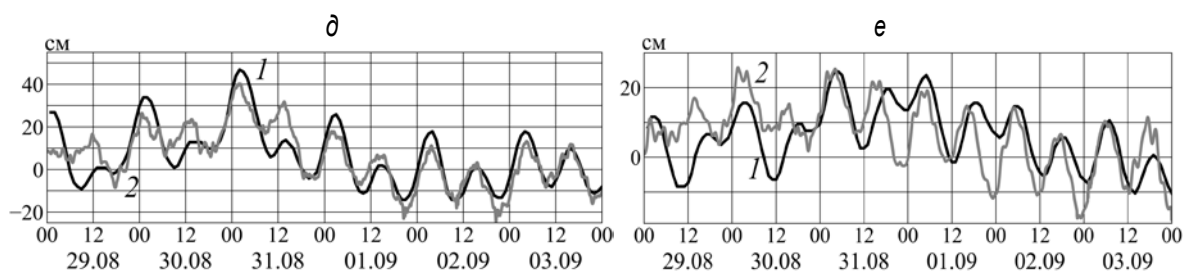


Рис.29. Наблюдаемый (1) и расчетный (2) ходы уровня во Владивостоке (а), в Находке (б), в заливе Посыет (в), в пунктах Сосуново (г), Хамада (д) и Тояма (е) за 29.08-03.09.2016

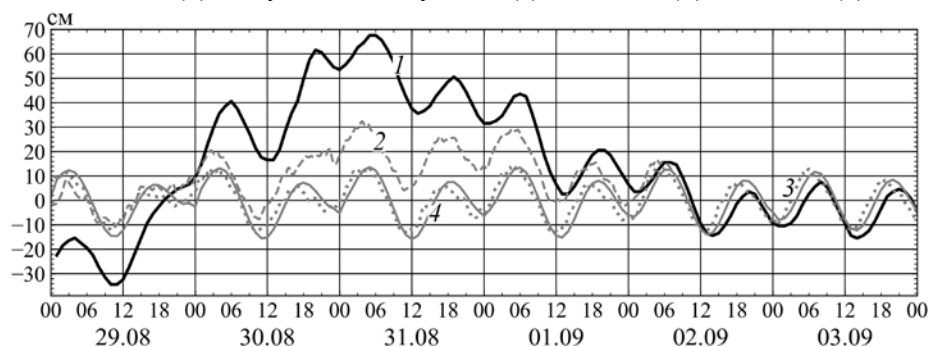


Рис.30. Временной ход уровня во Владивостоке 29.08-03.09.2016: 1-наблюдения, 2-расчет без учета ветра, 3-расчет без учета ветра и атмосферного давления, 4-расчет приливных колебаний по программе ТРХО7.2

Заключение

Тайфуны или мощные тропические циклоны являются опаснейшими гидрометеорологическими явлениями. Наиболее подвержена разрушительным воздействиям тайфунов Север-Западная часть Тихого океана. Изучение механизмов зарождения и эволюции тайфунов, а также моделирование этих процессов является важной научной и практической задачей.

С помощью информации из бюллетеней ДВНИГМИ и других источников были проанализированы траектории и эволюции наиболее мощных тайфунов, в западной части Тихого океана в период 2015-2021;

Как наиболее мощные тайфуны были выбраны 8 супер-тайфунов и выделены в классы по акваториям следования и выхода на сушу. Берегов Дальнего Востока РФ и Японии достигли 3 из них: SOUDELOR, LAN, KONG-REY.

Еще пять тайфунов: HALONG, GONI, SURIGAE, MERANTI и YUTU проследовали по западной части Тихого океана и затронули Филиппины, Китай и Тайвань.

Далее были изучены возможности современных методов моделирования для анализа штормовых нагонов, возникающих в результате действия тайфунов и разобраны результаты моделирования в программном комплексе CARDINAL.

В результате показано, что разработанная модель Японского моря при задании полей давления и ветра по модели WRF–ARW (ДВНИГМИ) в целом правильно описывает ход уровня при прохождении тайфуна Лайонрок.

Представленные в данной работе результаты моделирования относятся к конкретному тайфуну и акваториям, но очевидно, что модели, созданные на базе комплекса CARDINAL, могут быть применимы для аналогичных процессов в других частях океанов и морей.

Список источников и использованной литературы:

1. Э.С. Мамедов, Н.И. Павлов. Тайфуны Гидрометеиздат Ленинград, 1974 г.- 134 с.
2. Павлов Н.И Тайфуны северо-западной части Тихого океана, 1998г 295с.
3. Витвицкий Г.Н. Циркуляция атмосферы в тропиках. Л. Гидрометеиздат, 1971. 144 с.
4. Павлов Н.И. К вопросу об эволюции тайфунов- «Тр. ДВНИГМИ», 1973, вып.38, с. 189—196.
5. Шулейкин В.В. Зависимость между мощностью тропического урагана и температурой подстилающей поверхности океана – «Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана», 1970, т. 6, №12, с. 119—1237.
6. Бондаренко А.Л. Новое в исследованиях закономерностей образования атмосферных вихрей. Режим доступа: http://meteoweb.ru/articles/bondarenko_02_2015.pdf - свободный.
7. Qi, X. (2021) Research on the “No-Typhoon July” in 2020 and Typhoon Frequency Variations in July in Recent 70 Years. Journal of Geoscience and Environment Protection, 9, 75-83.
8. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ». Режим доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2015/obzor/typhoon.pdf – свободный.
9. Особенности строения и развития тропических циклонов. Режим доступа: <https://maglipogoda.ru/stroenie-i-osobennosti-tropicheskikh-c> – свободный.
10. Modeling Study on the Asymmetry of Positive and Negative Storm Surges along the Southeastern Coast of China. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/351067598> - свободный.

11. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2016/obzor/typhoon.pdf – свободный.
12. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2017/obzor/typhoon.pdf – свободный.
13. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2018/obzor/typhoon.pdf – свободный.
14. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2019/obzor/typhoon.pdf – свободный.
15. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2020/obzor/typhoon.pdf – свободный.
16. Информация из ежемесячного гм бюллетеней «ДВНИГМИ».
Режим
доступа: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2021/obzor/typhoon.pdf – свободный.
17. К.А. Клеванный, О.В. Соколов, С.О. Романский. Анализ штормового нагона на побережье Приморского края в августе – сентябре 2016г., вызванного тайфуном Лайонрок, с использованием гидродинамического моделирования, ИВТ СО РАН, 2019– 78 с.
18. NOAA. National Centers for Environmental Information. Grid extract.
Режим доступа: <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client> – свободный.

19. Rossby C.G. «Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action», 1939г, Journal of Marine Research, 2, 38-55.
20. В. П. Дымников, В.Н. Лыкосов. Проблемы моделирования климата и его изменений, ИВМ РАН, 1985г.
21. Павлов Н.И., Лишавский С.С. Моделирование перехода единичного вынужденного вихря в двойную вихревую систему типа циклон - верхнетропосферный антициклон. Экология и безопасность жизнедеятельности. Общие проблемы. Материалы Международной Конференции по экологии и безопасности жизнедеятельности, Владивосток, ДВГТУ, 1994,- С.29-80.
22. Бархатова Е. Параметры и траектории тайфунов в западной части Тихого океана. Обзор за 10 лет и возможность моделирования, ВКР. РГГМУ, 2018г.