



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

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Мезомасштабные атмосферные вихри в Японском море»

Исполнитель Алферов Андрей Анатольевич  
(фамилия, имя, отчество)

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

Топтунова Ольга Николаевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«17» февраля 2022 г.

Санкт-Петербург  
2022

## Содержание

Введение	4
Глава 1	8
1.1. Понятие мезоциклонов	11
1.2. Характеристики мезоциклонов	11
1.2.1. Линейные размеры	13
1.2.2. Продолжительность существования	13
1.2.3. Направление и скорость перемещения	14
1.2.4. Давление на уровне моря	14
1.2.5. Погодные условия	15
1.2.6. Ветровое волнение	15
1.3 Классификация мезоциклонов	16
1.4 Теория обоснования механизмов образования мезоциклонов.	17
1.5 Районы формирования	19
1.6 Время формирования	20
Глава 2	21
2.1. Климатическая особенность Японского моря	21
2.2. Анализ предпосылок образования мезоциклонов.	23
2.3. Синоптический анализ условий выхода мезоциклонов в Японское море	28
2.3.1 МЦ Hagupit	28
2.3.2 МЦ Jangmi	36
2.3.3 МЦ Maysak	43
2.3.4 МЦ Haishen	52

2.3.5 МЦ в холодный период за 07.01–08.01.2020г.	60
Заключение	69
Литература	71

## Введение.

Японское море непрерывно подвергается воздействию циклонов, перемещающихся сюда из других регионов или зарождающихся здесь же. Чаще всего это циклоны внетропических широт, но вклад также вносят и тайфуны, выходящие в умеренные и высокие широты в период максимального прогрева — с июля по сентябрь [1,2]. Реакция моря на интенсивное воздействие таких циклонов достаточно хорошо изучена и проявляется во множестве разнообразных процессов, таких как увеличение в несколько раз характеристик энерго- и массообмена на границе вода–воздух [3, 4], изменение гидрологических [5], биооптических [6, 7] и динамических характеристик верхнего слоя океана (ВСО) [8, 9] и др. В то же время еще малоисследованной остается реакция дальневосточных морей на отдельно выделяемую группу циклонов — так называемые мезомасштабные циклоны (МЦ). Мезомасштабные циклоны — это атмосферные вихри размерами до нескольких сот километров. Особенность МЦ — быстрый, взрывной характер появления, относительно короткое время существования — от нескольких часов до трех суток — и при этом достаточно большие скорости ветра, нередко достигающие до штормовых значений [10, 11]. Мезомасштабные циклоны в Японском море могут быть как полярными, так и тропическими. В этом заключается особенность и большой интерес исследователей к Японскому морю. В зимнее время, главным образом с полярными циклонами, могут быть связаны опасные явления, такие как обледенение судов. С обзором исследований мезомасштабных циклонов, проводимых со второй половины XX века до наших дней отечественными и зарубежными учеными, можно ознакомиться в работах [11,12,14]. Отмечается, что за возникновение МЦ отвечает целый спектр механизмов, в большинстве случаев действующих одновременно и связанных с различными синоптическими ситуациями, что делает сложным составление окончательной классификации мезомасштабных циклонов и установление общих для всех МЦ причин появления [11, 12]. Среди основных называются бароклинная и баротропная неустойчивость, термическая конвекция, условная

неустойчивость второго рода (что относится также к тропическим циклонам), а также орографические факторы [10, 11].

В настоящее время уже имеются статистические данные по частоте появления таких циклонов над различными районами Мирового океана, по параметрам и интенсивности МЦ [10, 12-14]. Также активно исследуется их структура по содержанию водяного пара, вертикальному распределению облачности, значениям температуры и т. д. [15]. Важным направлением в изучении МЦ является численное моделирование МЦ и разработка методов прогноза, который из-за их малых размеров, быстрого развития и быстрого заполнения затруднен [16]. Над дальневосточными морями в холодное полугодие формируется от 150 до 250 мезоциклонов [15]. На районы Японского моря приходится меньшая часть МЦ Дальнего Востока, однако это количество доходит до 87 МЦ в год [13]. Размеры МЦ здесь составляют в среднем 200–400 км, скорость ветра — 12 м/с и более [15]. В работах, посвященных климатологии МЦ, встречаются оценки некоторых характеристик энерго-массообмена на границе вода–воздух и некоторых метеорологических характеристик, таких как приводная скорость ветра и вертикальное распределение температуры воздуха [11,12,15,14,17], чаще рассматривающихся с точки зрения изучения процессов формирования МЦ. Существует мнение [10], что МЦ в силу своей относительно слабой по сравнению с циклонами внетропических широт и тайфунами и кратковременности существования не успевают оказать значительного влияния на верхний слой моря. В случае полярных МЦ такие исследования затрудняются наличием ледяного покрова, закрывающим большую часть северных морей в зимнее полугодие.

В теплое полугодие на Японское море выходят тропические циклоны.

Тропический циклон — тип циклона, или погодной системы низкого давления, которая возникает над тёплой морской поверхностью и сопровождается мощными грозами, выпадением ливневых осадков и ветрами штормовой силы. Тропические циклоны получают энергию от поднятия влажного воздуха вверх, конденсации водяных паров в виде дождей и

опускания более сухого воздуха, что получается в этом процессе, вниз. Этот механизм принципиально отличается от механизма внетропических и полярных циклонов, в отличие от которых тропические циклоны классифицируются как «циклоны с тёплым ядром».

Термин «тропический» означает как географический район, где в подавляющем большинстве случаев возникают подобные циклоны, то есть тропические широты, так и формирование этих циклонов в тропических воздушных массах.

На Дальнем Востоке и в Юго-Восточной Азии тропические циклоны называются тайфунами, а в Северной и Южной Америке — ураганами. Принято считать, согласно шкале Бофорта, что шторм переходит в ураган при скорости ветра более 117 км/ч (или 30 м/с).

Тропические циклоны способны вызвать не только чрезвычайной силы ливни, но и большие волны на поверхности моря, штормовые приливы и смерчи. Тропические циклоны могут возникать и поддерживать свою силу только над поверхностью крупных водоёмов, тогда как над сушей они быстро теряют силу. Именно поэтому прибрежные районы и острова в наибольшей степени страдают от вызванных ими разрушений, тогда как районы в глубине материков находятся в относительной безопасности. Однако вызванные тропическими циклонами ливневые дожди могут вызвать наводнения значительных масштабов несколько дальше от побережья, на расстоянии до 40 км. Хотя эффект тропических циклонов на человека часто бывает очень негативным, значительные количества воды могут прекращать засухи. Тропические циклоны переносят большое количество энергии от тропических широт в направлении умеренных, что делает их важной составляющей глобальных процессов циркуляции атмосферы. Благодаря им разница в температуре на различных участках поверхности Земли уменьшается, что позволяет существование более умеренного климата на всей поверхности планеты [18].

*Целью* данной работы является анализ пространственно-временного распределения мезоциклонов (МЦ) над Японским морем за 2020 г. для выявления общих закономерностей и тенденций развития МЦ, анализ предпосылок появления МЦ для возможности дальнейшего прогнозирования, а также сравнительный анализ МЦ теплого периода с мезоциклонами Японского моря в зимнее время.

*Актуальность работы* – получение актуальных данных о частоте МЦ в исследуемом регионе и выявление предпосылок появления для снижения эффекта «внезапности».

*Задачи:*

1. Анализ существующих исследований, посвященных МЦ;
2. Обработка и анализ синоптических карт
3. Обработка данных реанализа для получения полной картины распределения метеорологических характеристик в зоне появления МЦ

*Исходные данные:*

1. Спутниковые снимки ([www.jma.go.jp](http://www.jma.go.jp), [www.worldview](http://www.worldview))
2. Синоптические карты
3. Реанализ Era 5 (разрешение  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ )

## Глава 1.

### 1.1. Понятие мезоциклонов.

Существуют два основных вида циклонов, которые указывают на место формирования вихревых возмущений. Внетропические образуются в полярных и умеренных широтах и имеют значительные размеры. Их энергия колоссальна.

Самые большие возникают на южной границе умеренных широт и перемещаются к северу и северо-востоку. Размер тропических циклонов уступает внетропическим, образуются они в тропических широтах, но их отличает высокая скорость перемещения и значительный барический градиент. У такой разновидности циклонов часто наблюдают своеобразный глаз бури – область в центре с размерами порядка двадцати-тридцати километров, где погода всегда ясная и безветренная, но на их границе скорость ветра может достигать до тридцати метров в секунду при порывах до ста.

Циклогенез - это развитие или усиление циклонической циркуляции в атмосфере. Циклогенез - это общий термин для нескольких различных процессов, каждый из которых приводит к развитию своего рода циклона. Это может происходить в различных масштабах, от микромасштаба до синоптического масштаба. Внетропические циклоны начинаются как волны вдоль погодных фронтов, а затем перекрываются на более поздних этапах своего жизненного цикла как системы с холодным ядром. Однако некоторые интенсивные внетропические циклоны могут стать системами теплого ядра, когда происходит тепловое уединение. Тропические циклоны образуются в результате значительной конвективной активности и являются теплым ядром. Мезоциклоны образуются как циклоны с теплым ядром над сушей и могут привести к образованию торнадо. Водяные смерчи также могут образовываться из мезоциклонов, но чаще возникают в средах с высокой нестабильностью и низким вертикальным сдвигом ветра [18].

Поверхностный минимум может образовываться разными способами. Топография может создать низкую поверхность. Мезомасштабные конвективные системы могут порождать поверхностные впадины, которые изначально являются теплыми. Возмущение может перерасти в волнообразное образование вдоль фронта, а низина расположена на гребне. В районе минимума течение становится циклоническим. Этот вращательный поток перемещает полярный воздух к экватору на западной стороне низины, в то время как теплый воздух движется к полюсу на восточной стороне. На западной стороне появляется холодный фронт, а на восточной - теплый. Обычно холодный фронт движется быстрее, чем теплый фронт, и «догоняет» его из-за медленной эрозии воздушной массы более высокой плотности впереди циклона. Кроме того, воздушная масса с более высокой плотностью, распространяющаяся за циклоном, усиливает более высокое давление и более плотную массу холодного воздуха. Холодный фронт заменяет теплый фронт и уменьшает длину теплового фронта. В этот момент образуется закрытый фронт, где масса теплого воздуха выталкивается вверх в желоб с теплым воздухом, который также известен как тровал. Тропический циклогенез - это развитие и усиление тропического циклона. Механизмы, с помощью которых происходит тропический циклогенез, отчетливо отличаются от механизмов, вызывающих циклоны на средних широтах. Тропический циклогенез, развитие циклона с теплым ядром, начинается со значительной конвекции в благоприятной атмосферной среде. Существует шесть основных требований к тропическому циклогенезу: достаточно теплая температура поверхности моря, атмосферная неустойчивость, высокая влажность на нижнем и среднем уровнях тропосферы достаточно силы Кориолиса, чтобы развить центр низкого давления ранее существовавший низкоуровневый фокус или беспокойство низкий вертикальный сдвиг ветра. Ежегодно во всем мире формируется в среднем 86 тропических циклонов с интенсивностью тропических штормов, из которых 47 достигают силы ураганов / тайфунов, а 20 становятся интенсивными тропическими циклонами (по крайней мере, интенсивность категории 3 по

шкале ураганов Саффира – Симпсона).

Полярная депрессия – мелкосерийная, недолговечная атмосферная система низкого давления, которая находится над океаном в районах к полюсу основного полярного фронта как в северном и южном полушариях. Полярные минимумы были впервые идентифицированы на метеорологических спутниковых снимках, которые стали доступны в 1960-х годах, которые выявили множество мелкомасштабных облачных вихрей в высоких широтах. Над Южным океаном можно встретить сильные полярные депрессии. Зимой, когда минимумы холодного ядра с температурами на средних уровнях тропосферы достигают  $-45^{\circ}\text{C}$  ( $-49^{\circ}\text{F}$ ), перемещаются над открытыми водами, образуется глубокая конвекция, которая делает возможным развитие полярной депрессии. Системы обычно имеют горизонтальный масштаб менее 1000 километров (620 миль) и существуют не более пары дней. Они являются частью более крупного класса мезомасштабных погодных систем. Полярные минимумы могут быть трудными для обнаружения с помощью обычных метеорологических сводок, и они представляют опасность для операций в высоких широтах, таких как судоходство и нефтегазовые платформы. Полярные депрессии называются многими другими терминами, такими как полярный мезомасштабный вихрь, арктический ураган, арктический минимум и депрессия холодного воздуха.

В зависимости от местоположения и силы тропические циклоны называют другими названиями, такими как ураган, тайфун, тропический шторм, циклонический шторм, тропическая депрессия или просто циклон. Хотя тропические циклоны могут вызывать чрезвычайно сильные ветры и проливные дожди, они также могут вызывать высокие волны и разрушительный штормовой нагон. Их ветры увеличивают размер волны, и при этом они втягивают в свою систему больше тепла и влаги, тем самым увеличивая свою силу. Они развиваются на больших водоемах с теплой водой и, следовательно, теряют свою силу, если перемещаются по суше. По этой причине прибрежные районы могут получить значительный ущерб от тропического циклона, в то

время как внутренние районы относительно защищены от сильных ветров. Однако сильные дожди могут вызвать значительные наводнения внутри страны. Штормовые нагоны - это подъемы уровня моря, вызванные пониженным давлением в ядре, которое фактически «засасывает» воду вверх, и ветрами, которые, по сути, «накапливают» воду. Штормовые нагоны могут вызвать обширные прибрежные наводнения на расстоянии до 40 километров (25 миль) от береговой линии. Хотя их воздействие на человеческое население может быть разрушительным, тропические циклоны также могут облегчить условия засухи. Они также переносят тепло и энергию из тропиков в умеренные широты, что делает их важной частью механизма глобальной атмосферной циркуляции. В результате тропические циклоны помогают поддерживать равновесие в тропосфере Земли. Многие тропические циклоны развиваются, когда атмосферные условия вокруг слабого возмущения в атмосфере являются благоприятными. Другие образуются, когда другие типы циклонов приобретают тропические характеристики. Затем тропические системы перемещаются рулевыми ветрами в тропосфере; если условия остаются благоприятными, тропические волнения усиливаются и даже могут развиваться глаза. На другом конце спектра, если условия вокруг системы ухудшаются или тропический циклон обрушивается на сушу, система ослабевает и в конечном итоге рассеивается. Тропический циклон может стать внетропическим по мере продвижения к более высоким широтам, если его источник энергии изменится с тепла, выделяемого при конденсации, на разницу температур между воздушными массами. Тропический циклон обычно не считается субтропическим во время своего внетропического перехода [19].

## 1.2. Характеристики мезоциклонов.

### 1.2.1. Линейные размеры.

Понятие о пространственном масштабе мезовихрей в основном связывают с их линейными размерами (то есть с диаметром) его мезовихря. Размер этой небольшой области с низким давлением на уровне моря не часто возможно найти из-за недостатка данных метеонаблюдений в арктических частях морей. Горизонтальные размеры спиралевидных облачных мезовихрей чаще всего обнаруживаются с помощью масштаба наружной облачной спирали (рисунок 1.1).

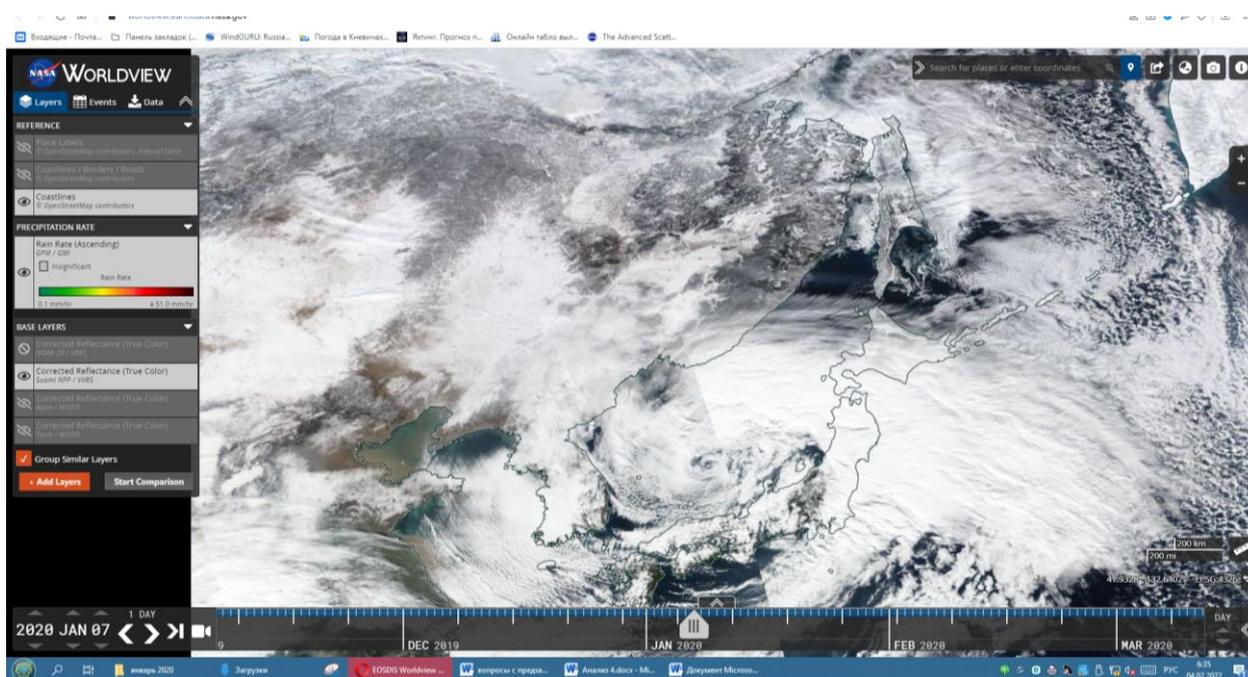


Рисунок 1.1 - Спутниковые изображения ПМЦ в форме спирали 08 января 2020г.

Обычный размер вихря в форме спирали приблизительно равен 283 км. Размеры мезоциклона в форме запятой определяются по горизонтальной

протяженности облачности. Следует отметить, что размеры МЦ не всегда можно точно определить, из-за плохо выраженной формы и не совсем четких очертаний по спутниковым снимкам. По существующим данным запытообразных циклонов намного больше, чем спиралевидных. Средний размер мезоциклона в виде запятой – 176 км в диаметре, в виде спирали – 283 км. Циклоны в форме запятой являются меньшими по диаметру, нежели спиралевидные [20].

### 1.2.2. Продолжительность существования.

Классическая черта вихря – очень маленький период жизни, если его сравнивать с крупномасштабными циклонами. Средний период жизни мезоциклона около суток.

Быстрое разрушение мезовихря наступает при его перемещении над ледяной поверхностью или по мере приближения к суше, так как при этом отсекается главный источник энергии, но, если МЦ почти не подвижен и остается над водой, вихрь может простоять вполне долгий срок – больше 2 дней. Так же, циклон может немного продвинуться на сушу, если на суше присутствуют водоемы, чтобы подпитываться теплой водной поверхностью, таким образом, жизнь циклона немного продлится.

### 1.2.3. Направление и скорость перемещения.

МЦ над Японским морем чаще всего формируются в юго-западном потоке. Из-за небольшого вертикального развития МЦ главный поток, в основном, располагается на уровнях 850–700 гПа – то есть ниже главного формирующегося переноса. Во многих случаях, мезовихри перемещаются к северу, достигая Охотского моря.

Зарегистрированная наибольшая протяженность перемещения мезовихрей примерно 2800 км. [21]. Скорость перемещения вихрей можно определить из уже готовой синоптической ситуацией, но обычно есть определенные значения от 10 до 30 км/ч. (представлено в практической части работы).

#### 1.2.4. Давление на уровне моря.

Узнать давление на уровне моря (в центре вихря) почти всегда является трудновыполнимой задачей, так как не хватает данных с метеорологических наблюдений, в связи с этим мы не можем дать истинных статистических характеристик этого параметра. В основном, экстремальные значения давления в интенсивных вихрях менее выражены, чем в хорошо развитых внетропических циклонах. МЦ маленьких размеров (до 100 км в диаметре) очень часто не отображаются в поле давления. Иногда это свойственно и интенсивным МЦ.

#### 1.2.5. Погодные условия.

Тропические циклоны – одна из серьезных угроз для жизни уже на стадии формирования. Они сопряжены со множеством опасностей, таких как наводнения, штормовые нагоны, экстремально сильные ветры, смерчи и торнадо. В совокупности эти опасности взаимодействуют друг с другом и представляют угрозу для имущества и жизни [22].

Тропические циклоны способны вызвать не только чрезвычайной силы ливни, но и большие волны на поверхности моря, штормовые приливы и смерчи. Тропические циклоны могут возникать и поддерживать свою силу только над поверхностью крупных водоёмов, тогда как над сушей они быстро теряют силу. Именно поэтому прибрежные районы и острова в наибольшей

степени страдают от вызванных ими разрушений, тогда как районы в глубине материков находятся в относительной безопасности. Однако вызванные тропическими циклонами ливневые дожди могут вызвать наводнения значительных масштабов несколько дальше от побережья, на расстоянии до 40 км. Хотя эффект тропических циклонов на человека часто бывает очень негативным, значительные количества воды могут прекращать засухи. Тропические циклоны переносят большое количество энергии от тропических широт в направлении умеренных, что делает их важной составляющей глобальных процессов циркуляции атмосферы. Благодаря им разница в температуре на различных участках поверхности Земли уменьшается, что позволяет существование более умеренного климата на всей поверхности планеты.

Для мезовихрей характерны также очень сильные снегопады с экстремальным ухудшением видимости.

#### 1.2.6. Ветровое волнение.

Относительно маленькие размеры и маленький период существования мезовихрей уменьшают возможность генерации экстремальных высот волн. Сильное волнение может развиваться при совпадении направления ветра с направлением движения ПМЦ. В таких случаях мезовихрь сопровождается локальной областью волнения с острым фронтом и зоной роста высоты волн (рисунок 1.2)

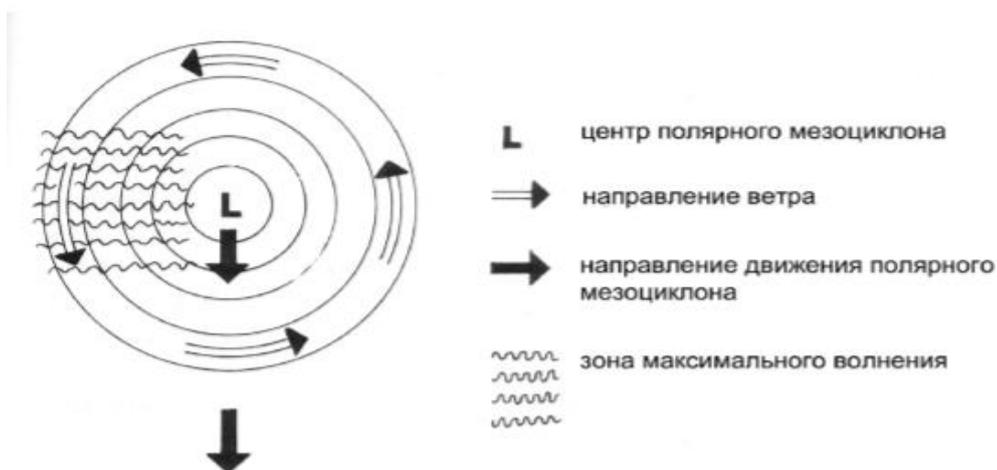


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема развития волнения в области мезоциклона

Ветровое волнение скоро уменьшается при замедлении движения или разрушении МЦ. При почти неподвижном вихре даже в случаях экстремальных значений скорости ветра волнение не достигает предельных значений. Зафиксирован случай, когда при скорости ветра 35 м/с в почти неподвижном МЦ высота волнения составила всего лишь 5,5 м [23].

Из приведенных выше данных о погодных условиях следует, что интенсивные мезовихри являются большим препятствием в хозяйственной деятельности, но нет оснований преувеличивать исходящую от них штормовую угрозу. Экстремальные погодные условия в полярно-фронтальных циклонах бывают более суровыми и длительными.

### 1.3 Классификация мезоциклонов.

Существуют несколько классификаций:

1. Классификация по морфометрическим параметрам. Это является самой главной классификацией. В основном, выделяют два типа облачных вихрей полярных циклонов: запятая и спираль, но могут встречаться и другие более

сложные структуры. Так же, возможна трансформация из одного типа в другой. В редких случаях, МЦ в виде спирали имеют подобно тропическим циклонам-«глаз», но ни один из них не отличается такими экстремальными значениями давления и скорости ветра, как это свойственно тайфунам.

2. Синоптическая классификация. МЦ в Японском море классифицируются по шкале Японского метеорологического агентства [24]. Существуют четыре разновидности для классификации тропических циклонов в зависимости от постоянного ветра за 10-минутный период. Самая низкая категория – тропическая депрессия (скорость ветра до 17 м/с), далее следует тропический шторм (24 м/с), сильный тропический шторм (33 м/с) и тайфун (более 33 м/с).

Положение ПМЦ, выходящих на Японское море, в этой классификации выражается относительно крупномасштабных синоптических систем. Полярные циклоны развиваются в вытянутой ложбине в тыловой части основного циклона.

3. Классификация по интенсивности мезоциклонов. МЦ делятся на слабые и интенсивные. Степень интенсивности зависит от размеров, скорости ветра в МЦ, и самое главное от длительности существования. Самыми мощными считаются циклоны, чья длительность существования достигает 2-3 дней, а ветры достигают больших штормовых значений. Самые слабые полярные циклоны «живут» примерно 12 ч [21].

#### 1.4. Теория обоснования механизмов образования мезоциклонов.

Ниже приводится разбор описание главных механизмов образования МЦ над морской поверхностью.

Во всех районах мира, где существует активность тропических циклонов, она достигает максимума в конце лета, когда разница температуры между

океанской поверхностью и глубинными слоями океана наибольшая. Однако сезонные картины несколько отличаются в зависимости от бассейна. В мировом масштабе май является наименее активным месяцем, сентябрь наиболее активным, а ноябрь является единственным месяцем, когда одновременно активны все бассейны [25].

Образование зон схождения пассатов, что приводит к нестабильности атмосферы и способствует образованию тропических циклонов.

Процесс формирования тропических циклонов все ещё не до конца понятен и является предметом интенсивных исследований. Обычно можно выделить шесть факторов, необходимых для образования тропических циклонов, хотя в отдельных случаях циклон может образоваться и без некоторых из них.

В большинстве случаев, условием для формирования тропического циклона являются температура приповерхностного слоя океанской воды не менее  $26,5^{\circ}\text{C}$  при глубине не менее 50 м. Это минимально достаточная температура приповерхностной воды, которая способна вызвать нестабильность в атмосфере над ней и поддерживать существование грозовой системы [25,26].

Другим необходимым фактором является быстрое охлаждение воздуха с высотой, что делает возможным высвобождение энергии конденсации, главного источника энергии тропического циклона.

Также для образования тропического циклона необходима высокая влажность воздуха в нижних и средних слоях тропосферы. Наличие большого количества влаги в воздухе создаёт более благоприятные условия для дестабилизации тропосферы.

Ещё одно благоприятствующее условие — низкий вертикальный градиент ветра, поскольку большой градиент ветра разрывает циркуляционную систему циклона.

Тропические циклоны обычно возникают на расстоянии не менее 5 градусов широты (на Земле — 550 км) от экватора, — на этой широте сила Кориолиса достаточно сильна для отклонения ветра и закручивания атмосферного вихря.

И наконец, для образования тропического циклона обычно нужна уже существующая зона низкого атмосферного давления или нестабильной погоды, хотя и без циркуляционного поведения, характерного для зрелого тропического циклона. Такие условия могут быть созданы низкоуровневыми и низкоширотными вспышками, которые ассоциируются с осцилляцией Маддена-Джулиана [25,26].

### 1.5 Районы формирования

Большинство тропических циклонов в мире формируются в пределах экваториального пояса (межтропического фронта) или его продолжения под действием муссонов — муссонной зоны низкого давления. Районы, благоприятные для формирования тропических циклонов, также возникают в пределах тропических волн, где возникает около 85 % интенсивных циклонов Атлантического океана и большинство тропических циклонов на востоке Тихого океана [25,26].

подавляющее большинство тропических циклонов формируется между 10 и 30 градусами широты обоих полушарий, причём 87 % всех тропических циклонов — не далее 20 градусов широты от экватора[39][40]. Из-за отсутствия силы Кориолиса в экваториальной зоне, тропические циклоны очень редко формируются ближе 5 градусов от экватора[39], однако это все же случается, например с тропическим штормом Вамэй 2001 года и циклоном Агни 2004 года.

## 1.6. Время формирования

Сезон тропических циклонов на севере Атлантического океана длится с 1 июня по 30 ноября, достигая пика в конце августа и в сентябре. По статистике, большинство тропических циклонов образовались здесь в районе 10 сентября. На северо-востоке Тихого океана этот сезон длится дольше, но с максимумом в те же времена. На северо-западе Тихого океана тропические циклоны образуются в течение всего года, с минимумом в феврале-марте и с максимумом в начале сентября. На севере Индийского океана тропические циклоны возникают чаще всего с апреля по декабрь, с двумя пиками – в мае и в ноябре. В Южном полушарии сезон тропических циклонов длится с 1 ноября до конца апреля, с пиком с середины февраля до начала марта [18].

## 2.1 Физико-географические характеристики Японского моря

Японское море расположено в северо-западной части Тихого океана между материковым берегом Азии, Японскими островами и островом Сахалин в географических координатах  $34^{\circ}26'$ - $51^{\circ}41'$  с.ш.,  $127^{\circ}20'$ - $142^{\circ}15'$  в.д. (рисунок 2.1).

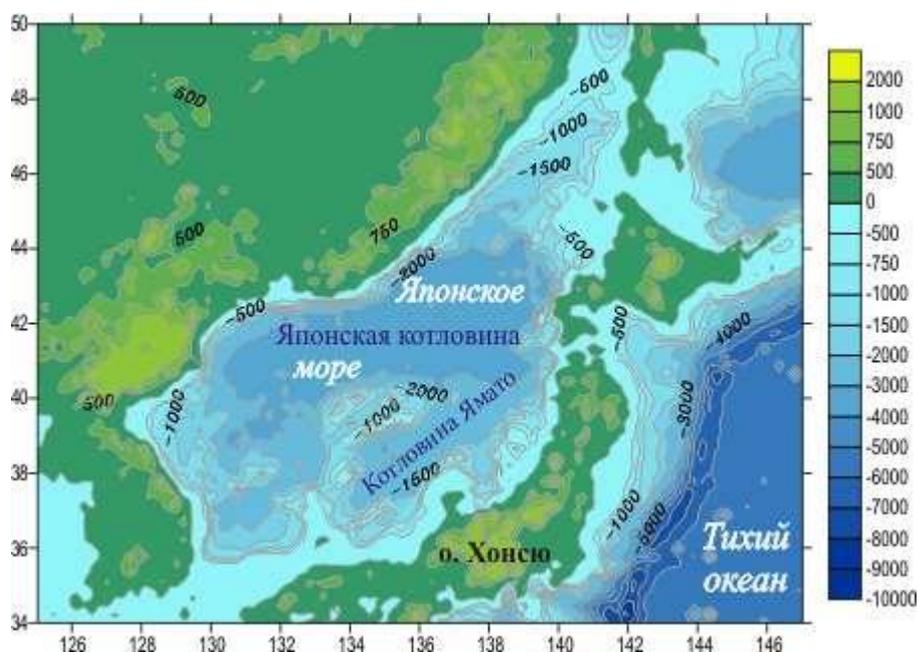


Рисунок 2.1 — Физико-географическое положение Японского моря

По своему физико-географическому положению оно относится к окраинным океаническим морям и отгорожено от смежных бассейнов мелководными барьерами. На севере и северо-востоке Японское море соединяется с Охотским морем проливами Невельского и Лаперуза (Соя), на востоке — с Тихим океаном Сангарским (Цугару) проливом, на юге — с Восточно-Китайским морем Корейским (Цусимским) проливом.

Японское море располагается в двух климатических зонах: субтропической и умеренной. В пределах этих зон выделяются два сектора с отличающимися климатическими и гидрологическими условиями: суровый холодный северный (зимой частично покрытый льдом) и мягкий, теплый, прилегающий к Японии и берегам Кореи. Основным фактором, формирующим климат моря, является муссонная циркуляция атмосферы.

У материкового побережья в холодное время года преобладают сильные ветры северо-западного направления со скоростями 12-15 м/с. Повторяемость этих ветров в период с ноября по февраль составляет 60-70%. В январе и феврале повторяемость преобладающих ветров в отдельных пунктах побережья достигает до 75-90%. С севера на юг скорости ветра постепенно убывают от 8 м/с до 2,5 м/с. Вдоль островного восточного побережья ветры холодного сезона не так отчетливо выражены по направлению, как у материкового берега. Скорости ветра здесь меньше, но также в среднем убывают с севера на юг. Ежегодно в конце лета и в начале осени на Японское море выходят тропические циклоны (тайфуны), сопровождающиеся ураганскими ветрами. В течение холодного сезона повторяемость штормовых, вызываемых глубокими циклонами ветров, резко возрастает. В теплый период года над морем преобладают южные и юго-восточные ветры. Повторяемость их составляет 40-60 %, а скорости, как и зимой, в среднем убывают с севера на юг. В целом, скорость ветра в теплое время года значительно меньше, чем зимой. В переходные сезоны (весной и осенью) направления и скорости ветра претерпевают значительные изменения.

Для открытых участков северо-западных районов моря зимой преобладающими являются ветры северо-западных и северных направлений. В направлении на юго-запад происходит разворот ветров от северо-западных к западным, а в районах, прилегающих к южному Сахалину и Хоккайдо, от северо-западных к северным и даже к северо-восточным. В теплый сезон такой закономерной картины общего строения поля ветра установить для всего моря

не удастся. Однако обнаруживается, что в северных районах моря преобладают ветры восточных и северо-восточных, а в южных – южных направлений.

В Японском море температура воздуха закономерно изменяется как с севера на юг, так и с запада на восток. В северной, более суровой климатической зоне, среднегодовая температура составляет  $2^{\circ}$ , а на юге, в области субтропиков –  $+15^{\circ}$ . В сезонном ходе температуры воздуха минимум имеет место в зимние месяцы (январь – февраль), а максимум – в августе. На севере средняя месячная температура января около  $-19^{\circ}$ , а абсолютный минимум равен  $-32^{\circ}$ . На юге среднемесячная температура в январе составляет  $5^{\circ}$ , а абсолютный минимум  $-10^{\circ}$ . В августе на севере средняя температура равняется  $15^{\circ}$ , а абсолютный максимум –  $+24^{\circ}$ ; на юге, соответственно,  $25^{\circ}$  и  $39^{\circ}$ . Изменения температуры с запада на восток имеют меньшую амплитуду. Западное побережье в течение всего года холоднее чем восточное, причем различия температур увеличиваются с юга на север. Зимой они больше, чем летом, и в среднем составляют  $2^{\circ}$ , но на некоторых широтах могут достигать  $4-5^{\circ}$ . Число холодных дней (со средней температурой ниже  $0^{\circ}$ ) резко уменьшается с севера на юг [27].

## 2.2 Анализ предпосылок образования мезоциклонов.

Взяв за основу работу [28] выясняем, что для исследования причин возникновения вихря нужно разобрать уравнение локального изменения вертикальной скорости в следующем виде:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\frac{l}{T} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - v \frac{\partial l}{\partial y} - \left( u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right) - (\Omega + l) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - w \frac{\partial \Omega}{\partial z}. \quad (2.1)$$

При записи уравнения (2.1) не принимались во внимание второстепенные члены, учитывающие неравномерное распределение в пространстве вертикальной составляющей скорости движения воздушной массы и влияние

турбулентного трения. Уравнение (2.1) показывает, что преобразование вертикальной составляющей вихря в любой точке может случиться под воздействием следующих основных факторов:

- 1) Геострофической адвекции тепла или холода, т.е. бароклинный эффект- первое слагаемое в правой части уравнения (1);
- 2) Меридионального движения воздушной массы (второе слагаемое);
- 3) Горизонтального переноса вихря из других областей (третье слагаемое);
- 4) Горизонтальной дивергенции скорости ветра (четвертое слагаемое);
- 5) Перенос вихря по вертикали (пятое слагаемое). [28]

Если проанализировать каждое слагаемое, то первое отражает бароклинный эффект в циклогенезе, это величина адвекции, взятое с обратным знаком.

Если  $\left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)$  адв.  $g < 0$  и  $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)$  адв.  $> 0$ -это значит, что при адвекции холода будет увеличиваться циклонический вихрь и наоборот, при адвекции тепла он будет уменьшаться.

Второй член  $-(v \frac{\partial l}{\partial y})$  показывает эффект меридионального переноса. Так как с увеличением широты величина возрастает, то в воздушной массе, которая движется к югу, при прочих равных условиях циклонический вихрь увеличивается.

Из анализа третьего слагаемого  $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)$  вихр.  $= -(u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y})$  понятно, что изменение значения вихря в тыловой и передней частях приводит к его перемещению по потоку.

Четвертое слагаемое  $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{\text{див.}} - (\Omega + l) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$  учитывает воздействие скорости ветра на изменение вихря и называется дивергентной составляющей уравнения вихря. Это дивергентное слагаемое можно записать следующим

образом

$$\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{\text{див.}} = -l \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = lD, \quad (2.2)$$

где  $D = \text{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$  обозначает дивергенцию вектора скорости. Под дивергенцией вектора скорости можно понимать такое явление, при котором распределение ветра в пространстве обуславливает отток или приток воздуха в данной точке пространства. При расходимости вектора скорости, когда  $D > 0$ , происходит отток воздуха от данной точки. При сходимости линий тока дивергенция скорости ветра может быть и положительной, и отрицательной. Дивергенция скорости ветра складывается из дивергенции величины (модуля) скорости и дивергенции направления. При сходимости линий тока дивергенция модуля скорости положительная (величина скорости возрастает в направлении потока), а дивергенция направления отрицательная. При расходимости линий тока справедливо обратное действие.

Формула (2.2) показывает, что положительная дивергенция скорости ветра ( $D > 0$ ) связана с возникновением и усилением антициклонических вихрей  $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{\text{див.}} < 0$ , а отрицательная дивергенция (конвергенция,  $D < 0$ ) связана с возникновением и усилением обратных, циклонических вихрей  $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial t}\right)_{\text{див.}} > 0$ .

Исследования показали, что во многих случаях знак дивергенции скорости ветра идентичен знаку дивергенции модуля. Таким образом, при сходимости линий тока (изогипс) дивергенция скорости ветра в большинстве случаев положительна ( $D > 0$ ), а при расходимости отрицательна ( $D < 0$ ). Согласно (2.2) это означает, что при сходимости изогипс в большинстве случаев усиливается антициклонический вихрь (давление растет), а при расходимости – циклонический вихрь (давление падает). Поскольку дивергенция геострофического ветра равна нулю, то одним из главных факторов, влияющих на изменение давления (а значит на возникновение и эволюцию барических

образований), является отклонение ветра от градиентного. Когда направление и скорость ветра не соответствуют градиентному, происходит увеличение или уменьшение массы воздуха, а следовательно, и давления. В районах, где градиент давления вдоль воздушных течений уменьшается (увеличивается), наблюдается расходимость (сходимость) воздушных течений. Отклонение ветра от градиентного тем значительнее, чем больше кривизна потоков движущегося воздуха.

Вклад описанных выше слагаемых особенно велик в районах с большими градиентами температуры и давления, а также в регионах с большими скоростями ветра. Такими регионами и являются зоны возникновения МЦ (рис. 2.2)

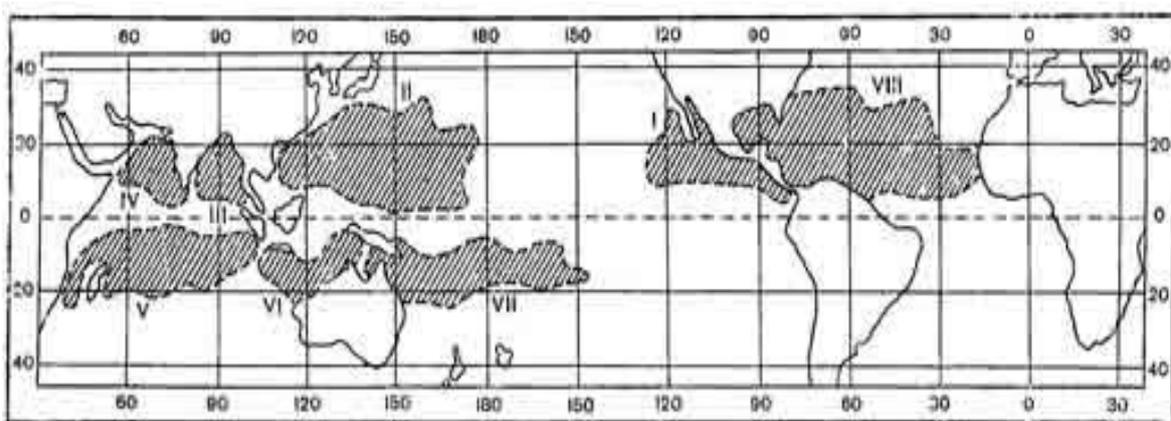


Рисунок 2.2 – Зоны зарождения ТЦ

Что касается динамики по годам, то наибольшее количество образования МЦ было зафиксировано в 2013 и 2018-2019 годах (Табл. 2.1).

Таблица 2.1

Year/Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
11	0	0	0	0	2	3	4	3	7	1	0	1	<b>21</b>
12	0	0	1	0	1	4	4	5	3	5	1	1	<b>25</b>
13	1	1	0	0	0	4	3	6	8	6	2	0	<b>31</b>
14	2	1	0	2	0	2	5	1	5	2	1	2	<b>23</b>
15	1	1	2	1	2	2	3	4	5	4	1	1	<b>27</b>
16	0	0	0	0	0	0	4	7	7	4	3	1	<b>26</b>
17	0	0	0	1	0	1	8	6	3	3	3	2	<b>27</b>
18	1	1	1	0	0	4	5	9	4	1	3	0	<b>29</b>
19	1	1	0	0	0	1	4	5	6	4	6	1	<b>29</b>
2020	0	0	0	0	1	1	0	8	3	6	3	1	<b>23</b>

Как видно из таблицы 2.1, наибольшая повторяемость тропических циклонов наблюдается в северо-западной части Тихого океана (около половины всех тропических циклонов) (<https://collectedpapers.com.ua/ru/typhoons/rayonizirozhennya-tropichnih-tsikloniv>).

Таблица 2.2

Повторяемость тропических циклонов и сезоны их возникновения			
Район возникновения	Сезон	Число циклонов за год (сезон)	
		по Ридю	по Ливинцу и Холманскому
Северная часть Атлантического океана	Июнь— ноябрь	7.3	7.9
Северная часть Тихого океана от берегов Мексики до 170° в. д.	Июнь— октябрь	5.7	5.7
Северная часть Тихого океана от 170° в. д. до берегов Азии	Январь— декабрь	21.1	28.0
Северная часть Индийского океана, Бенгальский залив	Май— июнь, октябрь— ноябрь	6.0	4.8
Северная часть Индийского океана, Аравийское море	Май— июнь, октябрь— ноябрь	1.5	1.1
Южная часть Индийского океана от 90° в. д. до о. Мадагаскар	Ноябрь— май	6.1	5.3
Южная часть Индийского океана, северо-западнее Австралии	Ноябрь— апрель	0.9	2.1
Южная часть Тихого океана от 140° з. д. до берегов Австралии	Ноябрь— май		6.7

## 2.3 Синоптический анализ типичных условий возникновения тропических мезоциклонов.

### 2.3.1 МЦ Haguripit

В работе исследованы случаи тропических циклонов (тайфунов), вышедших на Японское море, за 2020 год. Всего наблюдалось 4 МЦ – с 31 июля по 03 сентября. Для анализа привлекался архив приземных карт, а также реанализ Era 5 с разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  [29] Выявлены наиболее часто встречающиеся синоптические условия формирования тропического мезовихря.

Для поиска спутниковых снимков использовался сайт Японского метеоагентства [24]. Каждый МЦ, который был определен с помощью спутника, обрабатывался на картах. Отмечалось давление, его образование, адвекция, струйные течения и т.д.

Рассмотрим случай возникновения МЦ за 31.07–05.08.2020 г (18с.ш.,125в.д.). Снимки со спутника представлены ниже (Рисунок 2.3)

А



Б

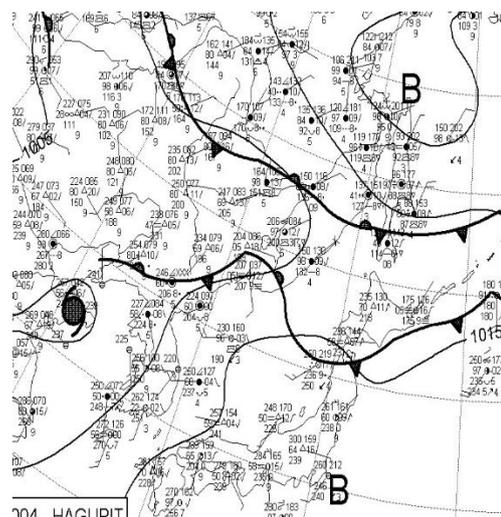


Рисунок 2.3 – МЦ Haguripit в Японском море

(А – спутниковый снимок, Б – приземный анализ за 12всв 06.08.2020)

Рассмотрим день, когда МЦ начал проходить в Японском море. Чтобы посмотреть, какая синоптическая ситуация способствовала развитию МЦ, проведем синоптический обзор и анализ приземных карт за срок его образования.

Визуализировав данные реанализа и просмотрев спутниковые снимки, видим, что депрессия зародилась 31.07.2020 года в Филиппинском море при благоприятных условиях низкого давления, вертикального сдвига ветра и температуры поверхности моря  $31^{\circ}$  С, а заполнилась 5 августа 2020 года. Продолжительность циклона составила 5 суток. В полдень того же дня депрессия переросла в тропический шторм, а 2 августа – в сильный тропический шторм. Покинув Филиппинское море, 3 августа Хагупит был повышен до статуса тайфуна и позже его интенсивность достигла пика с давлением 975 гПа. Примерно в 19:30 UTC Хагупит вышел на берег в Вэньчжоу, Китай, с ветром 85 миль в час и давлением 975 гПа. После выхода на сушу Хагупит постепенно ослабел над Китаем, и к началу 4 августа JTWC превратился в тропический шторм. Около полудня того же дня Хагупит понизился до уровня тропической депрессии. Позже система претерпела внетропический переход, который завершился 6 августа, когда он вышел на Японское море (Рисунок 2.4).

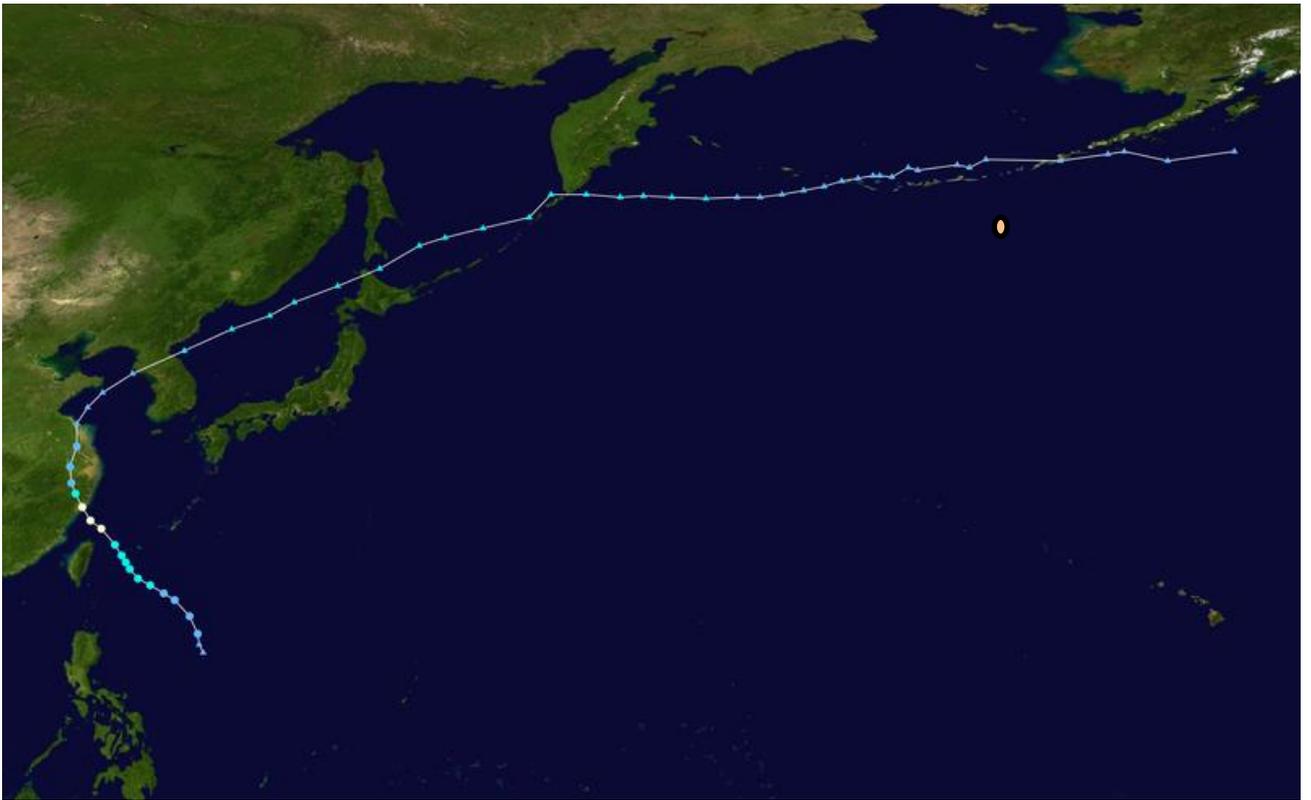


Рисунок 2.4 – Траектория смещения ТЦ Haguripit

В таблице 2.3 показаны трассы всех тропических циклонов в сезоне тихоокеанских тайфунов 2020 года. Точки показывают местоположение каждого шторма с интервалом в 6 часов. Цвет представляет максимальную устойчивую скорость ветра шторма, классифицированную по шкале ураганов Саффира-Симпсона, а форма точек данных отражает тип шторма [24].

## Summary

Description	English: This map shows the tracks of all tropical cyclones in the 2020 Pacific typhoon season. The points show the location of each storm at 6-hour intervals. The colour represents the storm's maximum sustained wind speeds as classified in the Saffir-Simpson Hurricane Scale (see below), and the shape of the data points represent the type of the storm. Map generation parameters: --res 4000 --extra 1 --dots 0.2 --lines 0.04 --xmin 100 --xmax 180 --ymin 0 --ymax 60										
	<b>Saffir-Simpson scale</b> <table border="0"> <tr> <td><span style="color:blue">■</span> Tropical depression (≤38 mph, ≤62 km/h)</td> <td><span style="color:orange">■</span> Category 3 (111–129 mph, 178–208 km/h)</td> </tr> <tr> <td><span style="color:cyan">■</span> Tropical storm (39–73 mph, 63–118 km/h)</td> <td><span style="color:red">■</span> Category 4 (130–156 mph, 209–251 km/h)</td> </tr> <tr> <td><span style="color:yellow">■</span> Category 1 (74–95 mph, 119–153 km/h)</td> <td><span style="color:gray">■</span> Category 5 (≥157 mph, ≥252 km/h)</td> </tr> <tr> <td><span style="color:lightyellow">■</span> Category 2 (96–110 mph, 154–177 km/h)</td> <td><span style="color:gray">■</span> Unknown</td> </tr> </table>		<span style="color:blue">■</span> Tropical depression (≤38 mph, ≤62 km/h)	<span style="color:orange">■</span> Category 3 (111–129 mph, 178–208 km/h)	<span style="color:cyan">■</span> Tropical storm (39–73 mph, 63–118 km/h)	<span style="color:red">■</span> Category 4 (130–156 mph, 209–251 km/h)	<span style="color:yellow">■</span> Category 1 (74–95 mph, 119–153 km/h)	<span style="color:gray">■</span> Category 5 (≥157 mph, ≥252 km/h)	<span style="color:lightyellow">■</span> Category 2 (96–110 mph, 154–177 km/h)	<span style="color:gray">■</span> Unknown	<b>Storm type</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color:black">●</span> Tropical cyclone</li> <li><span style="color:black">■</span> Subtropical cyclone</li> <li><span style="color:black">▲</span> Extratropical cyclone / Remnant low / Tropical disturbance / Monsoon depression</li> </ul>
<span style="color:blue">■</span> Tropical depression (≤38 mph, ≤62 km/h)	<span style="color:orange">■</span> Category 3 (111–129 mph, 178–208 km/h)										
<span style="color:cyan">■</span> Tropical storm (39–73 mph, 63–118 km/h)	<span style="color:red">■</span> Category 4 (130–156 mph, 209–251 km/h)										
<span style="color:yellow">■</span> Category 1 (74–95 mph, 119–153 km/h)	<span style="color:gray">■</span> Category 5 (≥157 mph, ≥252 km/h)										
<span style="color:lightyellow">■</span> Category 2 (96–110 mph, 154–177 km/h)	<span style="color:gray">■</span> Unknown										
Source	Created using WikiProject Tropical cyclones/Tracks. The background image is from NASA[1] . The tracking data is from the Joint Typhoon Warning Center's best track database										
Author	Meow										

Обратимся к визуализированным полям давления из данных реанализа в момент прохождения в Японском море МЦ в 00 и 12 часов (Рисунок 2.5). Видно, что давление действительно начало падать (от 1005 до 999 гПа).

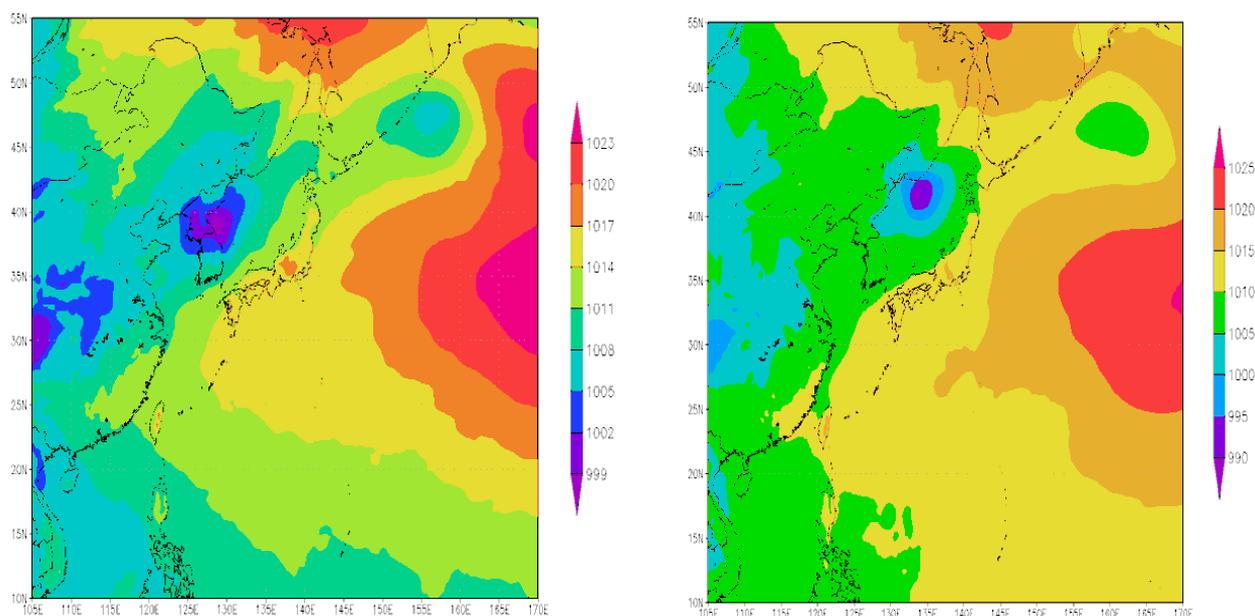
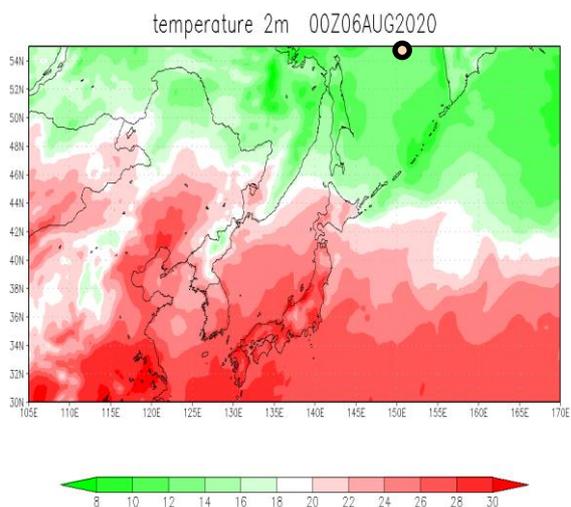


Рисунок 2.5 - Реанализ приземного давления за 06.08.2020 г.

При анализе температуры воздуха на высоте 2м (Рис. 2.6, 2.7) обнаружено, что заток холода в тыловой части МЦ (-3°C за 12 часов) в нижней тропосфере способствовал его развитию.

А



Б

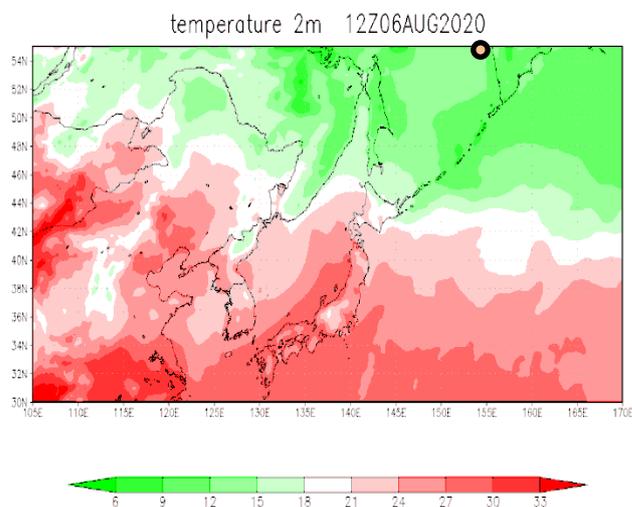


Рисунок 2.6 - Поле температуры воздуха за 06.08.2020 г.

Далее рассмотрим циклоническую завихренность к моменту прохождения МЦ по Японскому морю. Данный МЦ проходил по 41 широте северного полушария. В передней части значение вихря положительно, в тыловой – отрицательно. Здесь перенос вихря играет роль при дальнейшем развитии циклона. Барическое образование глубокое, максимум вихря наблюдается до высоты 4 км. На 12 UTC 6 августа циклон углубляется до высоты 6 км (Рисунок 9).

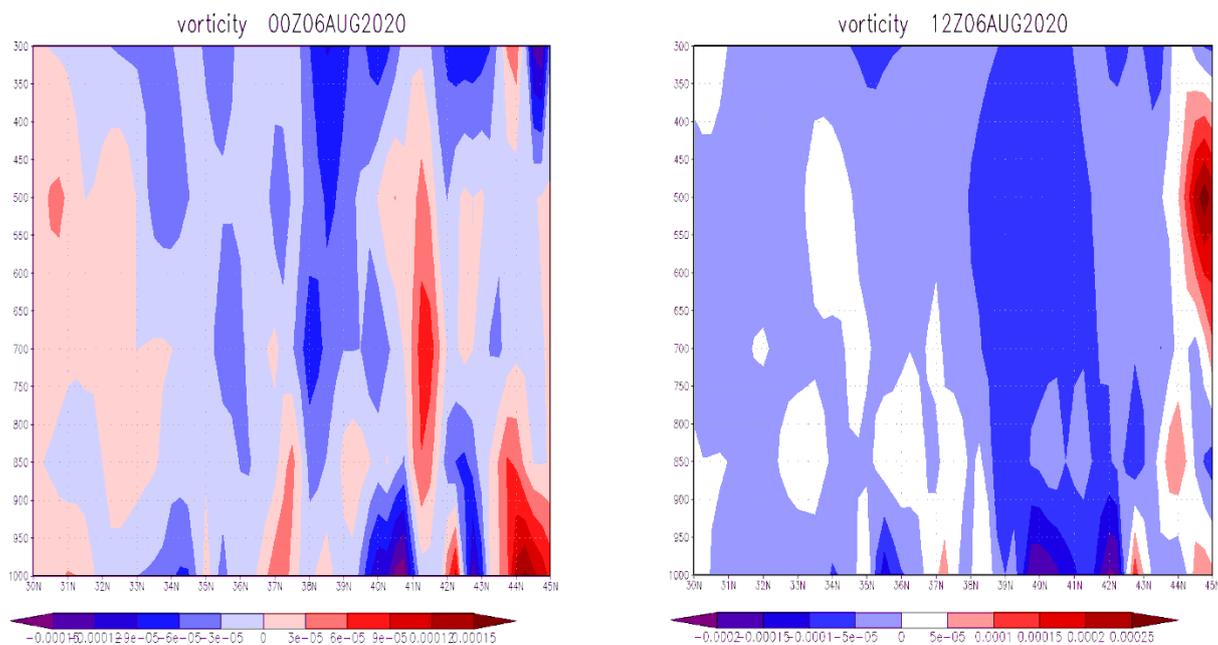
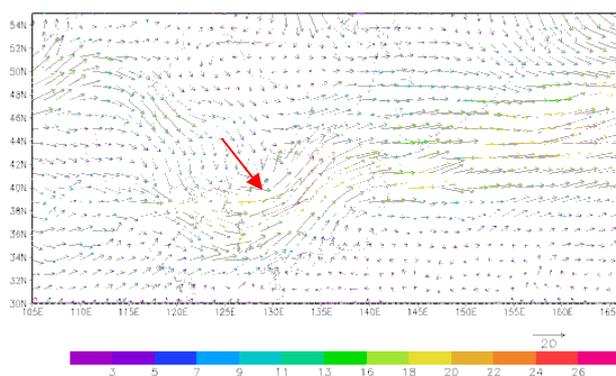


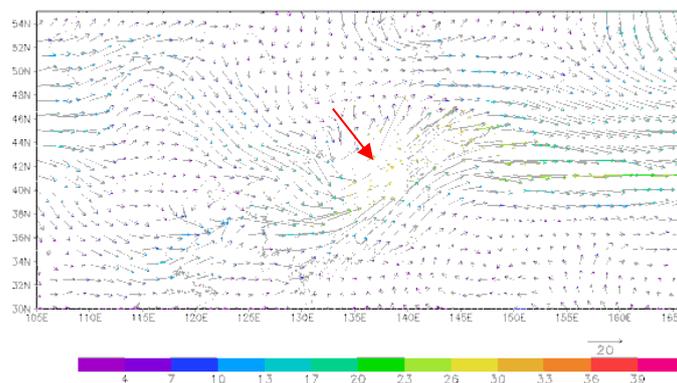
Рисунок 2.7 – Вертикальный разрез поля вихря за 06.08.2020 г.

Над областью возникновения МЦ наблюдается струйное течение. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим визуализированные поля средней тропосферы за 00 и 12 часов (Рисунок 2.8). Скорости ветра на высотах превышают 30 м/с.

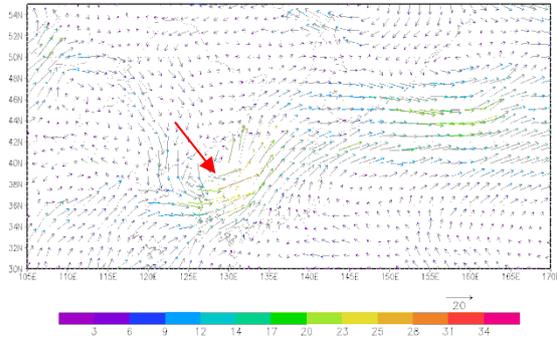
А



Б

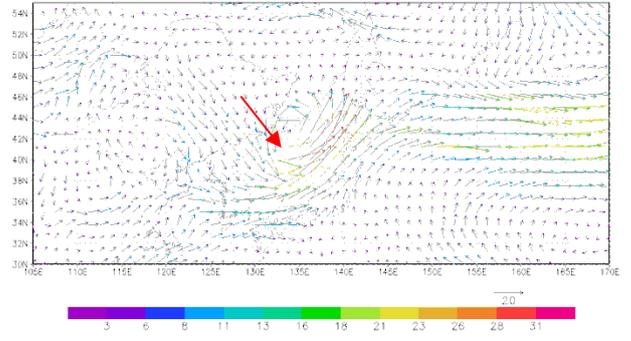


**В**



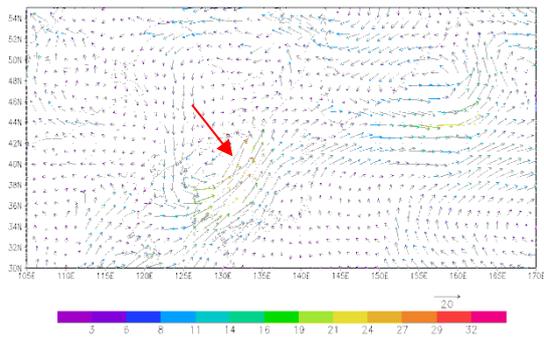
QADS: COLA/RES

**Г**



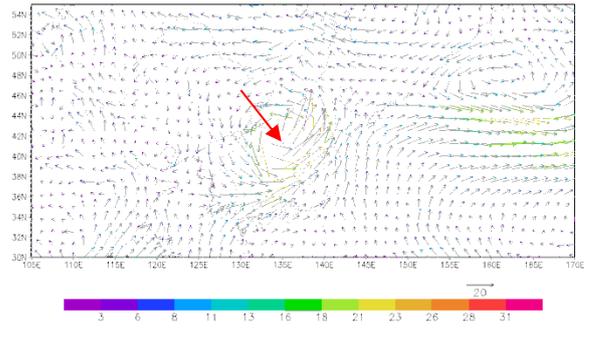
QADS: COLA/RES

**Д**



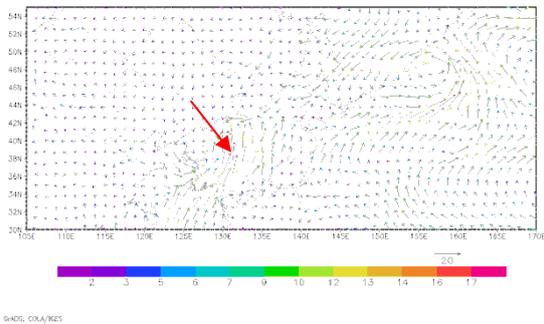
QADS: COLA/RES

**Е**



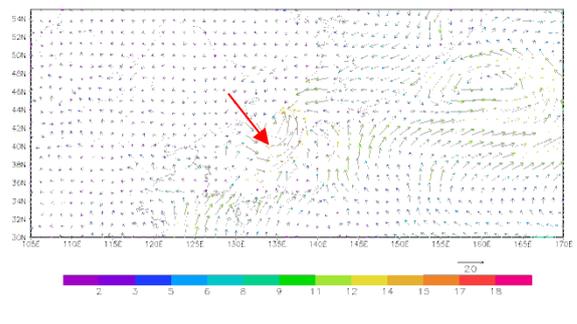
QADS: COLA/RES

**Ж**



QADS: COLA/RES

**З**

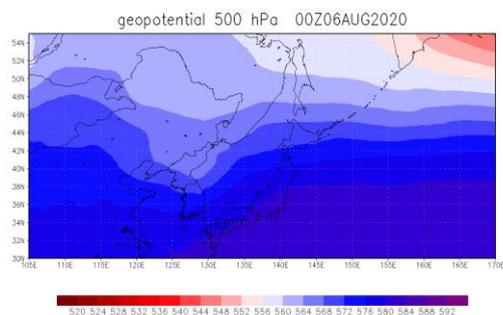


QADS: COLA/RES

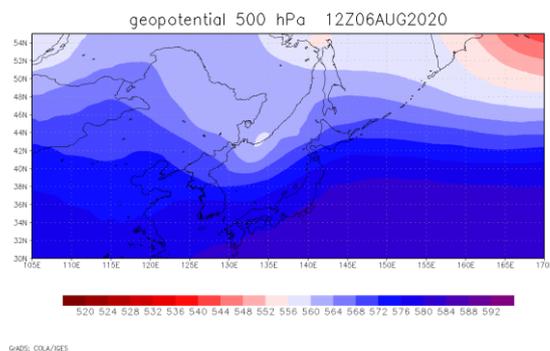
Рисунок 2.8 - Реанализ поля ветра за 06.08.2020  
(А,Б – 500гПа, В,Г – 700гПа, Д,Е – 850гПа, Ж,З – 1000 гПа)

Изучая поля геопотенциала, видно, что прохождению МЦ по Японскому морю способствовало его падение в передней части циклона – от 4гПа/12ч на 5 км до 8гПа/12ч на более низких высотах (Рисунок 2.9).

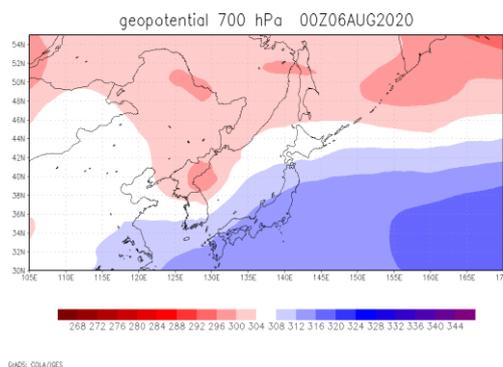
А



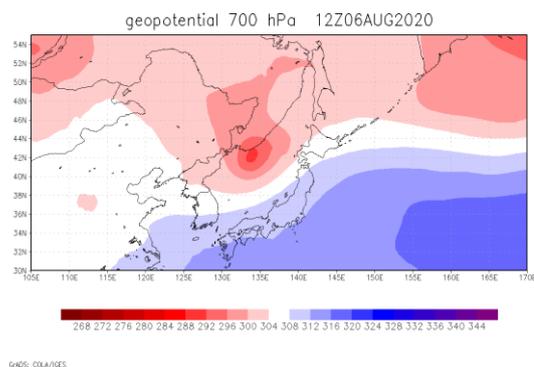
Б



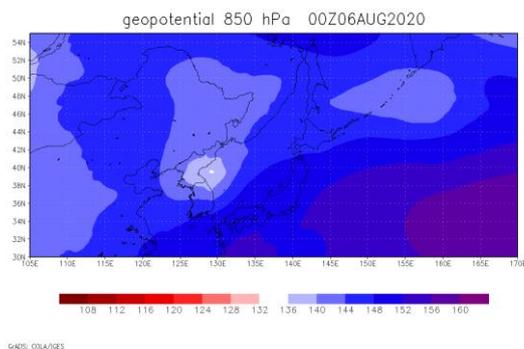
В



Г



Д



Е

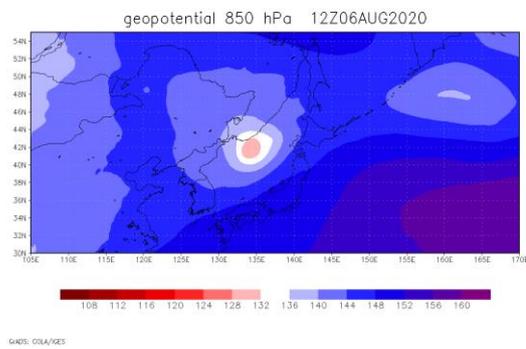
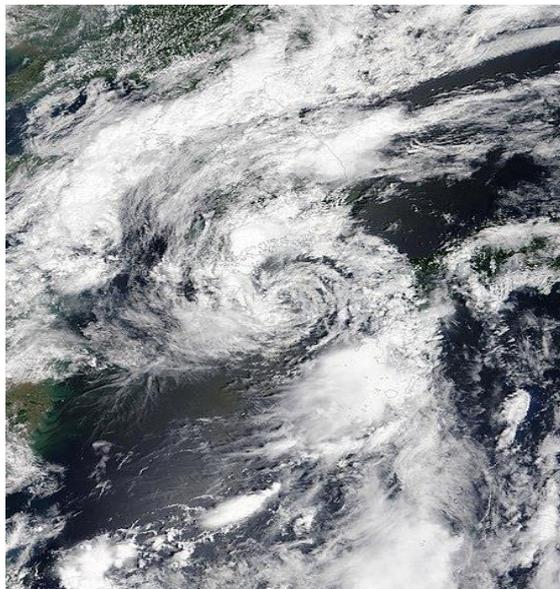


Рисунок 2.9 - Поле геопотенциала за 06.08.2020

### 2.3.2 МЦ Jangmi

Рассмотрим случай возникновения МЦ Jangmi за 06.08–11.08.2020г. (18с.ш.,125в.д.). Снимки со спутника представлены ниже (Рисунок 2.10).

А



Б

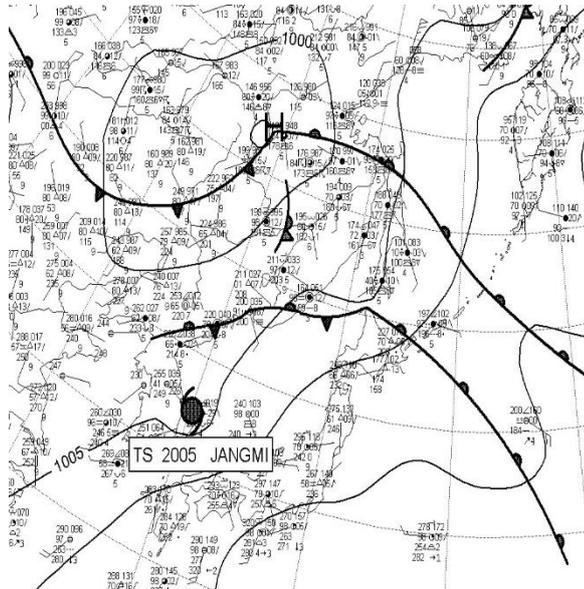


Рисунок 2.10 - МЦ Jangmi в Японском море

(А – спутниковый снимок, Б – приземный анализ за 12 ВСУ 10.08.2020)

Шестого августа область низкого давления развивалась к востоку от филиппинского острова Катандуанес. На следующий день эта зона углубилась до слабой тропической депрессии, далее 9 августа перешло в тропический шторм, получив название Jangmi. Несмотря на благоприятные условия низкого вертикального сдвига и температуры поверхности моря 29–30°C, он двигался на север с небольшой скоростью 23 узла. Около 05:50 по всемирному координированному времени 10 августа Jangmi, достигнув максимальной скорости 45 узлов (50 миль / ч; 85 км / ч), вышел на южной оконечности о. Кочжедо в Южной Корее и далее двинулся на северо-восток по Японскому морю (Рисунок 2.11).

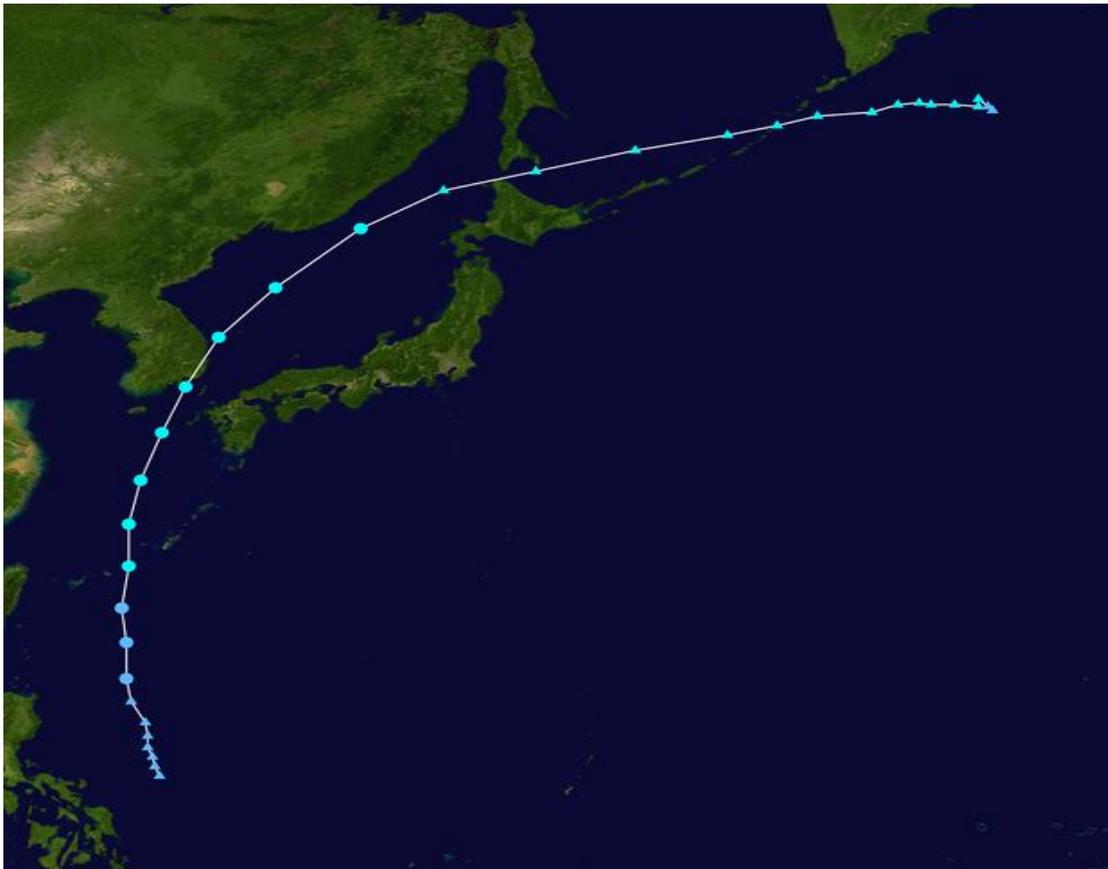


Рисунок 2.11 – Траектория смещения ТЦ Jangmi

Проведение синоптического обзора и анализа приземных карт за срок образования МЦ позволило посмотреть синоптическую ситуацию, способствовавшую его развитию при прохождении в Японском море.

Исследуем реанализ давления в момент прохождения в Японском море МЦ 10.08.2020г. в 00 и 12 часов (Рисунок 2.12). Видно, что давление действительно начало падать (от 1005 до 999 гПа).

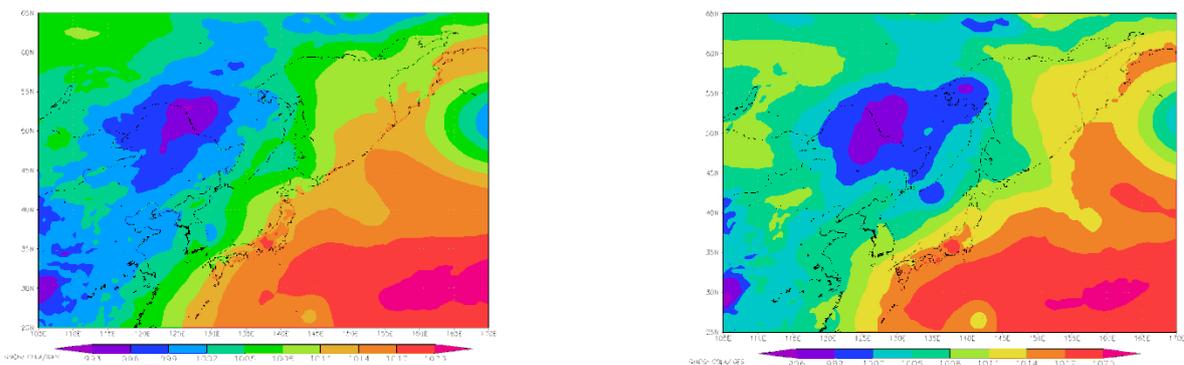
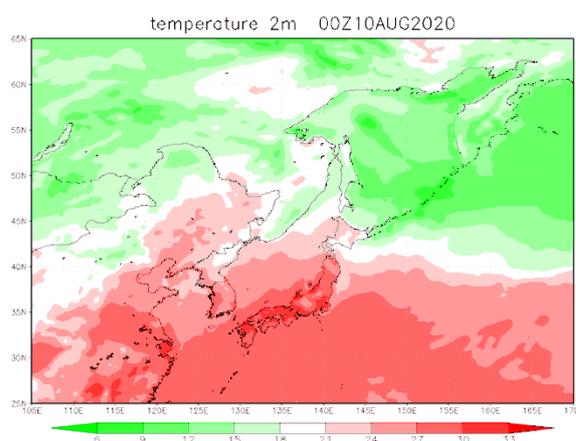


Рисунок 2.12 - Реанализ приземного давления за 10.08.2020 г. (12 ВСВ)  
и 11.08.2020 г. (00 ВСВ)

Падение температуры воздуха в тыловой части МЦ ( $-3^{\circ}\text{C}$ ) в нижней тропосфере (на высоте 2 м) способствовал его развитию: температура воздуха в южной части Японского моря составляла в 00всв 10 августа  $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$ , а в 12всв –  $21\text{--}24^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 2.13).

А



Б

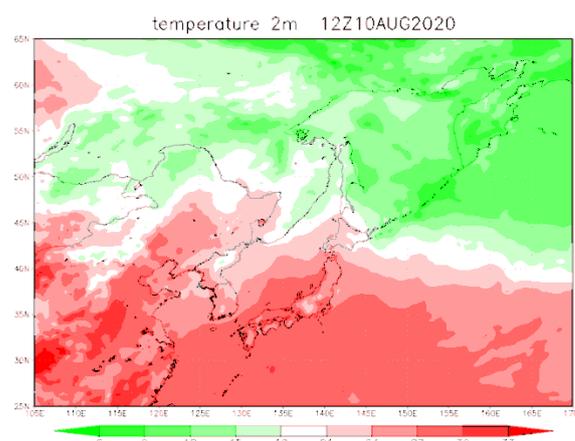
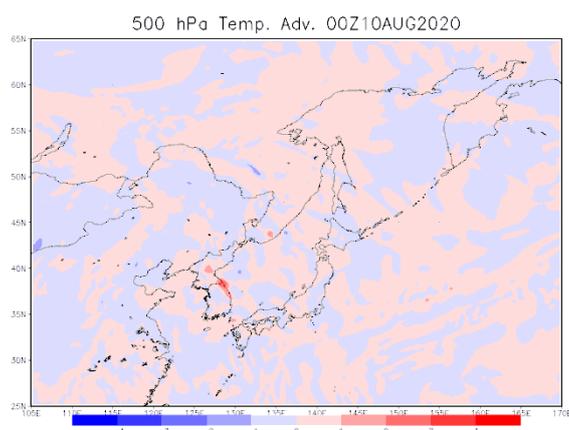


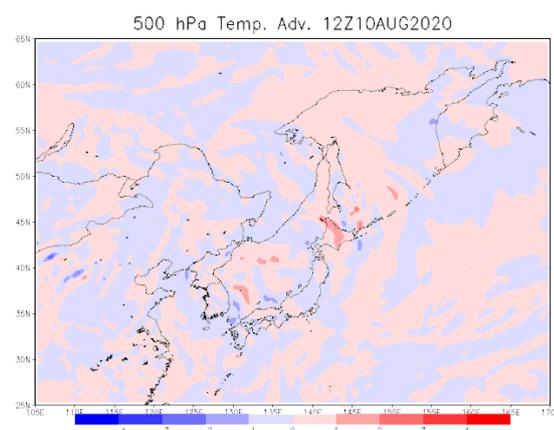
Рисунок 2.13 – Поле температуры на 2 м за 10.08.2020 г.

Адвекция тепла в нижней тропосфере на высотах от 1 до 5 км в передней части МЦ составила  $+1\text{--}3^{\circ}\text{C}$  за 12 часов, холода в тыловой –  $-1\text{--}2^{\circ}\text{C}$  за 12 часов (Рисунок 2.14).

А



Б



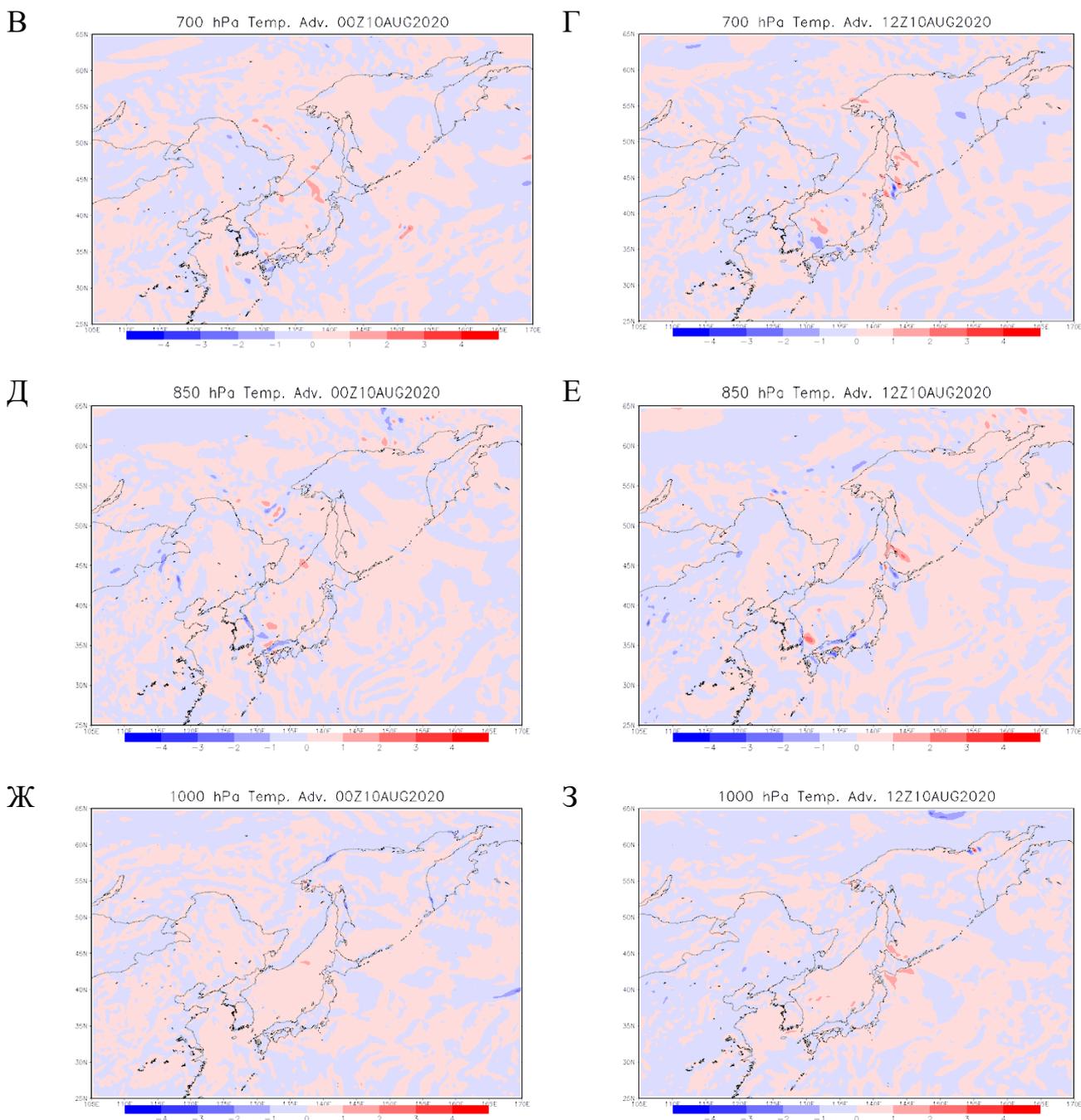


Рисунок 2.15 – Поля адвекции температуры воздуха за 10.08.2020 г.

Далее рассмотрим циклоническую завихренность к моменту прохождения МЦ по Японскому морю. Данный МЦ проходил по 35 широте северного полушария. В передней части значение вихря положительно, в тыловой – отрицательно. Здесь перенос вихря играет роль при дальнейшем развитии циклона. Барическое образование неглубокое, максимум вихря наблюдается до

высоты 1 км. На 12 UTC 10 августа циклон проходит без развития (Рисунок 2.16).

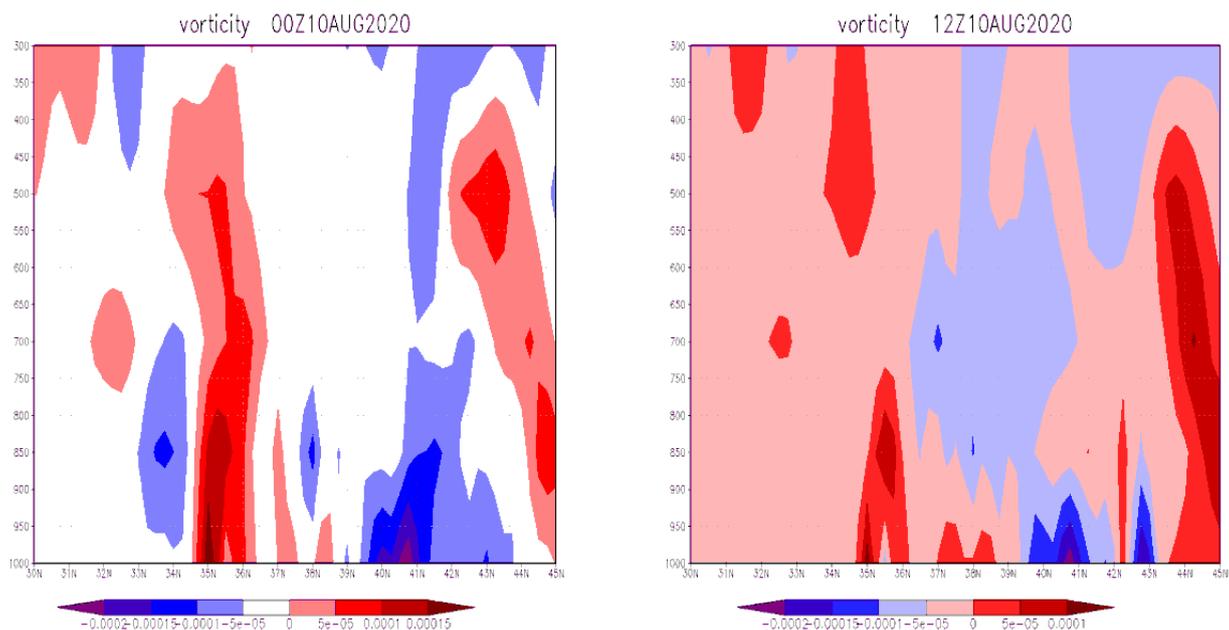
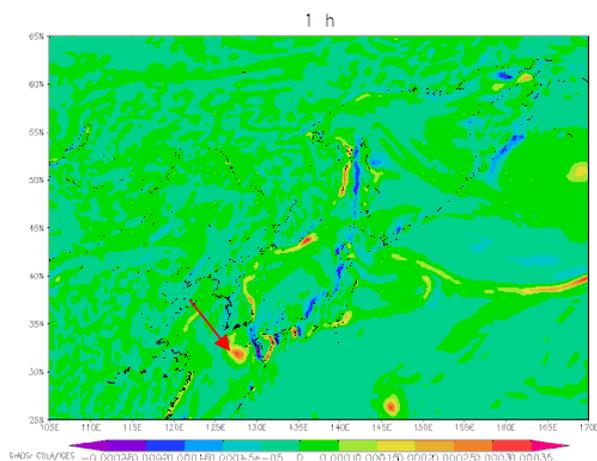


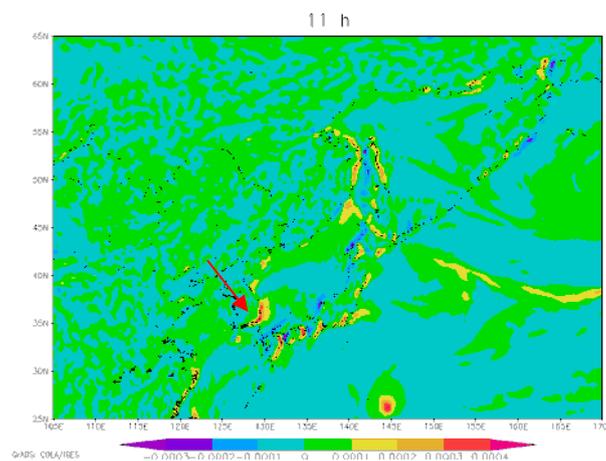
Рисунок 2.16 – Вертикальный разрез поля вихря за 10.08.2020 г.

Однако дальше на 12 ВСВ заток холодного воздуха с континента и Охотского моря с ветрами северных направлений на относительно теплую акваторию приводит к углублению МЦ (Рисунок 2.17). Первичный максимум завихренности пришелся на 11 ВСВ 10 августа (Б), снижение – на 14-22 ВСВ, а вторичный максимум – на 24 ВСВ (В), продлившийся до 04 ВСВ 11 августа (Г).

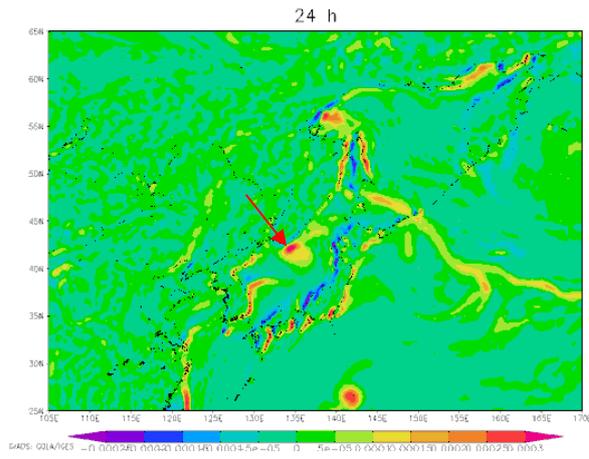
А



Б



В



Г

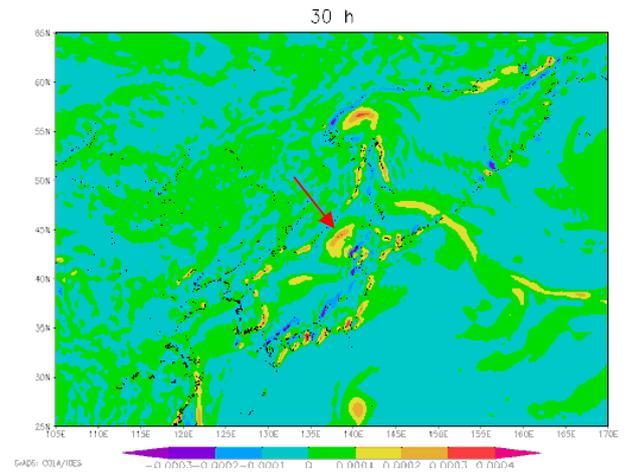
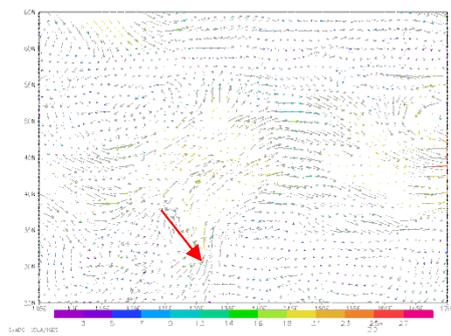


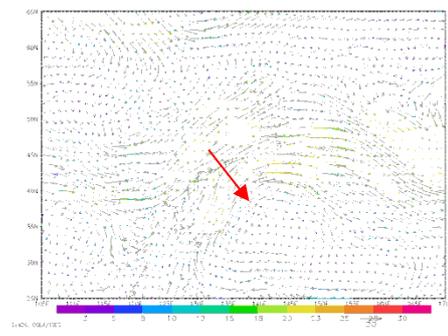
Рисунок 2.17 - Поле вихря за 10.08.2020 г.

Рассматривая поле ветра средней тропосферы за 00 и 12 часов (Рисунок 2.18), видим, что струйное течение также имеется над областью возникновения МЦ. Скорости ветра на высотах превышают 30 м/с, однако, только до высоты 3 км.

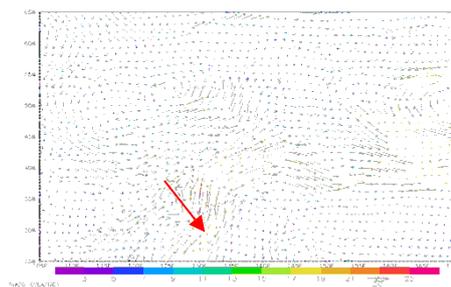
А



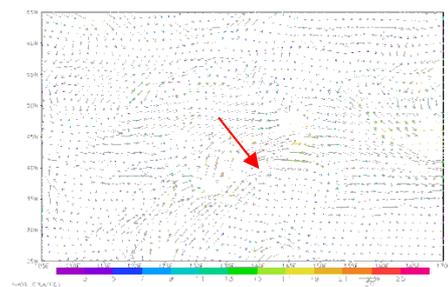
Б



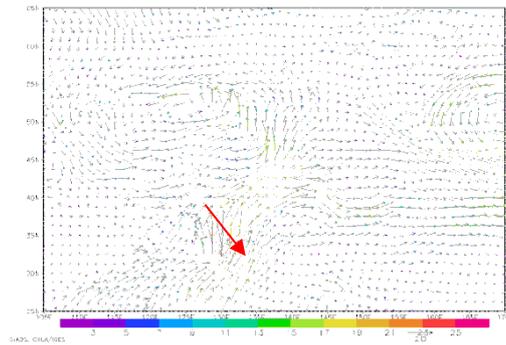
В



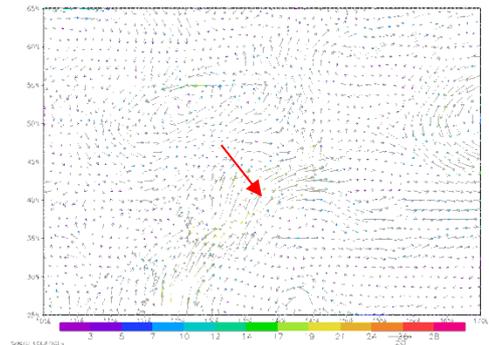
Г



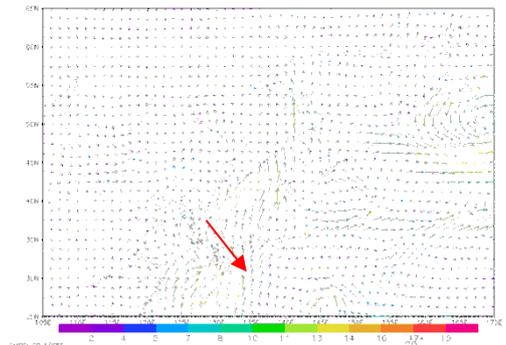
Д



Е



Ж



З

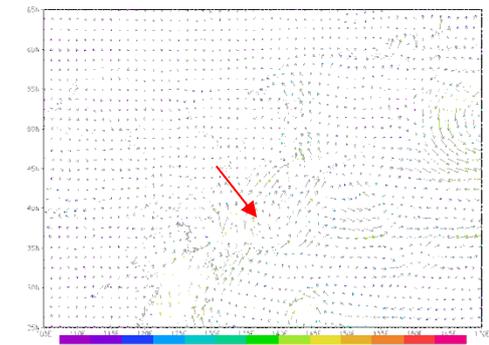
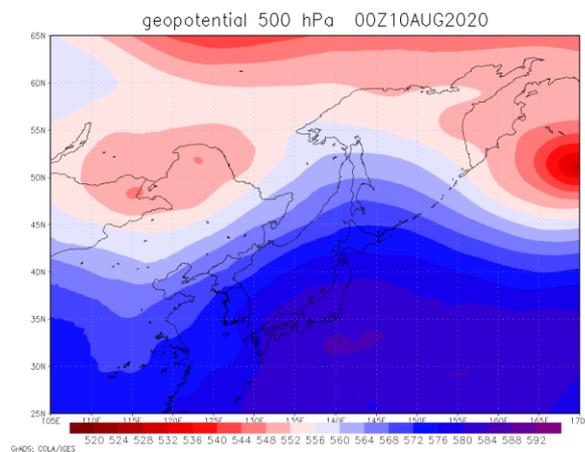


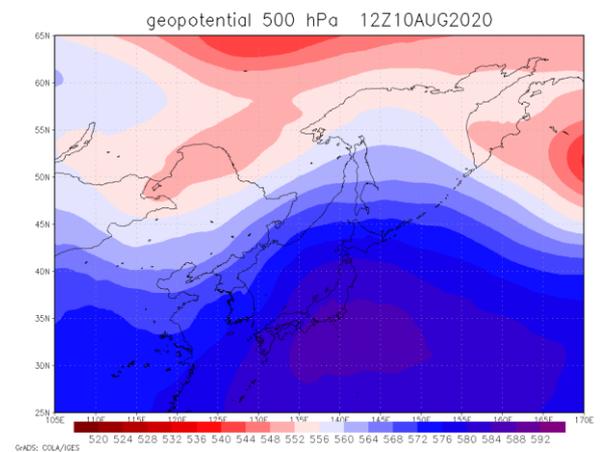
Рисунок 2.18 - Реанализ поля ветра за 10.08.2020  
(А,Б – 500 гПа, В,Г – 700 гПа, Д,Е – 850 гПа, Ж,З – 1000 гПа)

Падение геопотенциала в передней части циклона – от 4гПа/12ч на 5 км до 8гПа/12ч на более низких высотах сопровождало передвижение МЦ по Японскому морю (Рисунок 2.19).

А



Б



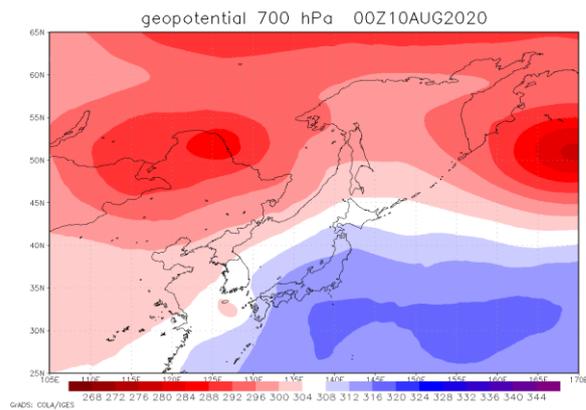
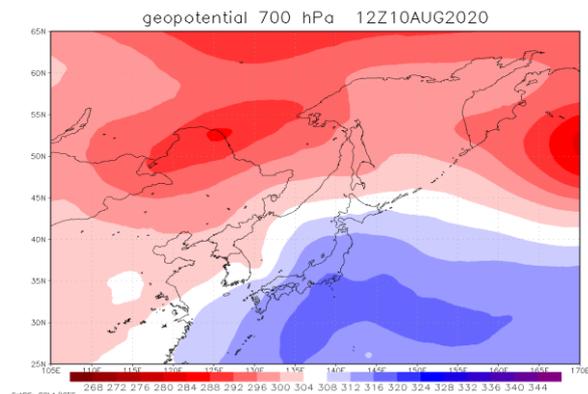
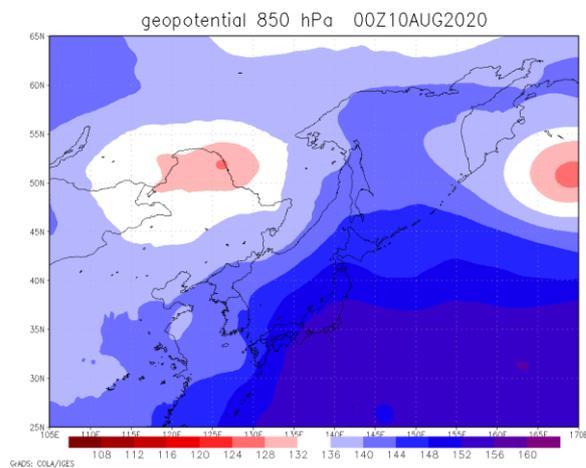
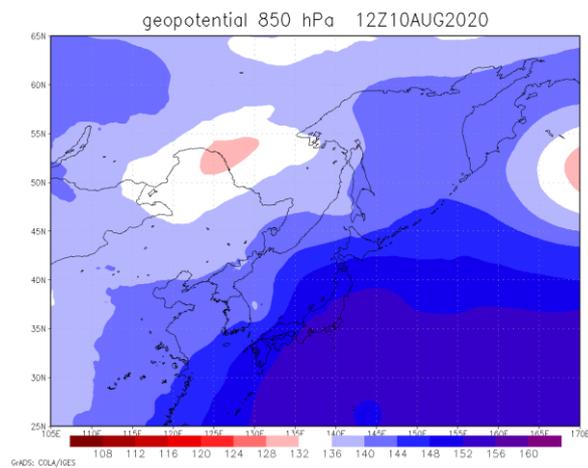
**В****Г****Д****Е**

Рисунок 2.19 - Поля геопотенциала за 06.08.2020

### 2.3.3 МЦ Maysak

Рассмотрим случай возникновения МЦ Maysak за 26.08–03.09.2020г. (18с.ш.,125в.д.). Снимки со спутника представлены ниже (Рисунок 2.20).

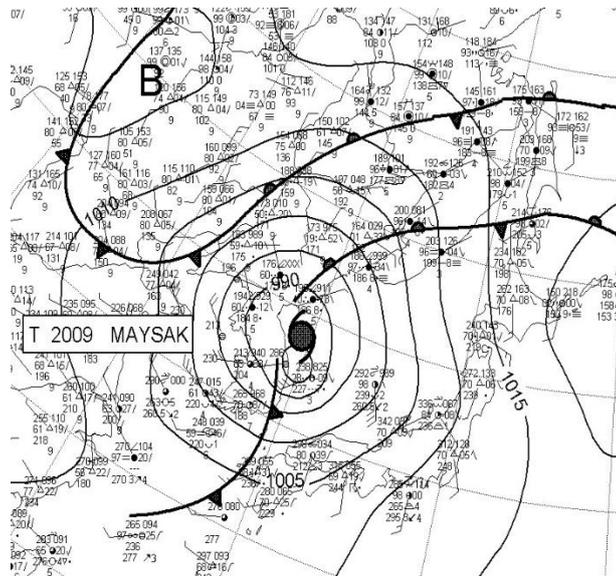
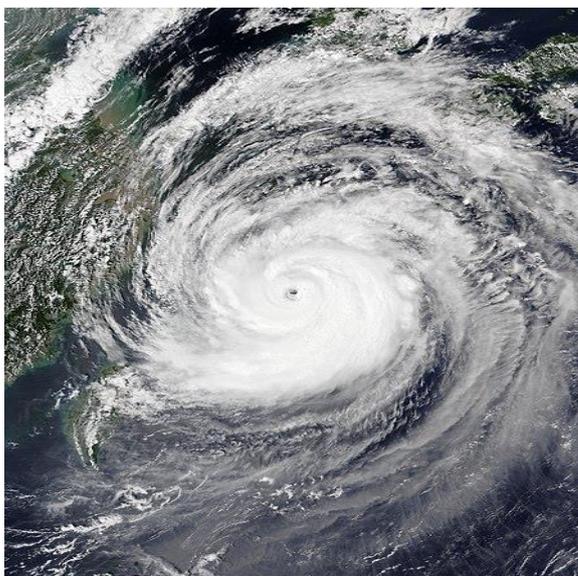


Рисунок 2.20 - МЦ Мaysak в Японском море

(А – спутниковый снимок, Б – приземный анализ за 00всв 03.09.2020)

27 августа область низкого давления к востоку от Филиппин консолидировалась в тропическую депрессию, преобразовалось в тропический шторм, и ему было присвоено международное название Maysak. В 19:00 ВСВ 29 августа система была модернизирована до тайфуна. К следующему дню Майсак усилился еще больше и стал крупным тайфуном. Вскоре Майсак начал постепенно ослабевать, проходя через Восточно-Китайское море. Тайфун Майсак затем обрушился на берег около Пусана. Южная Корея в 17:20 ВСВ 2 сентября, с максимальным устойчивым ветром со скоростью 155 км / ч и центральным давлением 950 гПа. После этого он пересек Японское море и попал в Северную Корею в Цзилинь, Маньчжурию в Китае. Вскоре после этого тайфун Майсак превратился во внетропический минимум на северо-востоке Китая (Рисунок 2.21).

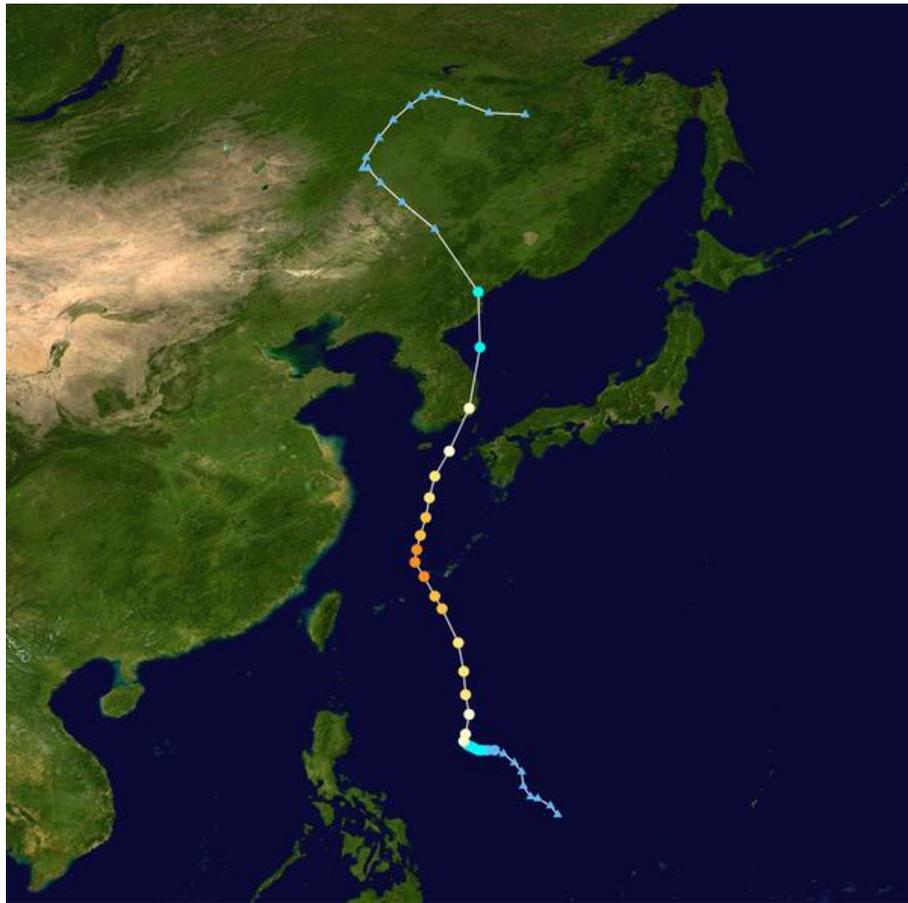


Рисунок 2.21 – Траектория смещения ТЦ Maysak

Исследуем поле давления в момент прохождения в Японском море МЦ в 00 и 12 часов (Рисунок 2.22). Видно, что давление действительно начало падать (от 1000 до 975 гПа).

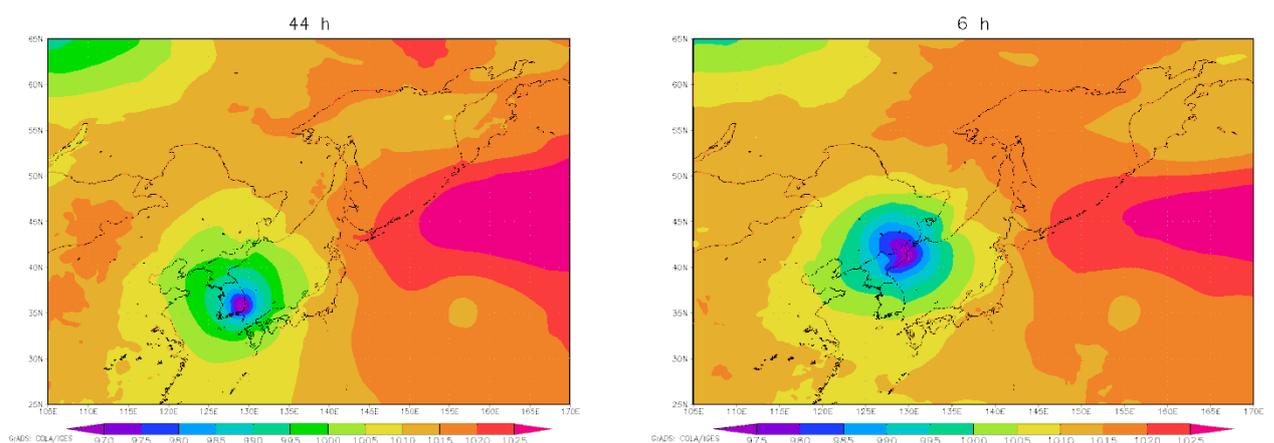


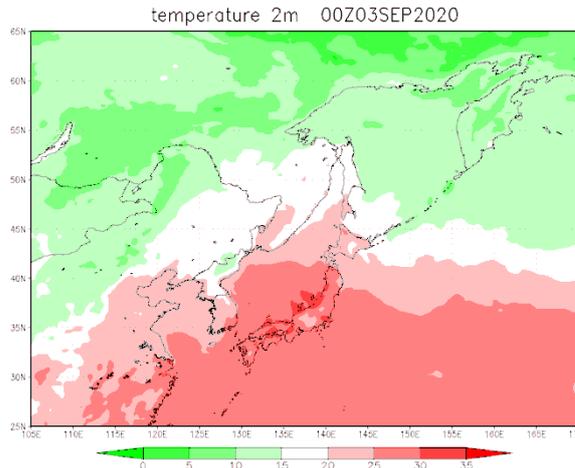
Рисунок 2.22 – Поле приземного давления за 02.09.2020 г. (20 ВСВ)

и 03.09.2020 г. (06 ВСВ)

Более холодный воздух в тыловой части МЦ ( $-3^{\circ}\text{C}$ ) в приземном слое (на

высоте 2 м) способствовал его развитию: температура воздуха в южной части Японского моря составляла в 00 ВСВ 03 сентября 20-25°C, а в 12 ВСВ – 18-20°C (Рисунок 2.23).

А



Б

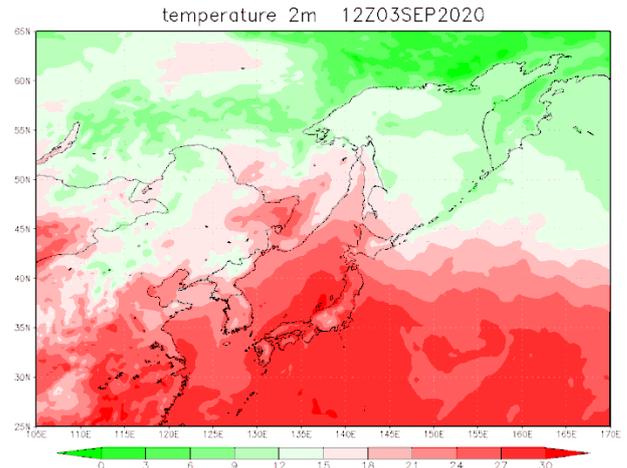
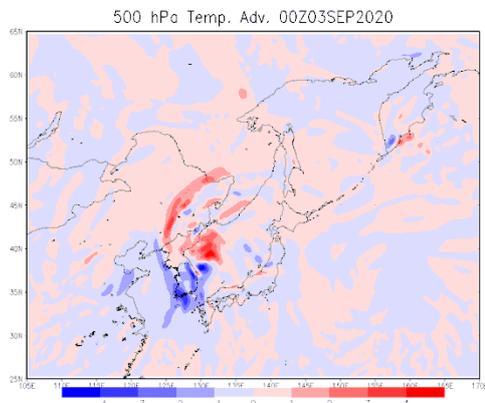


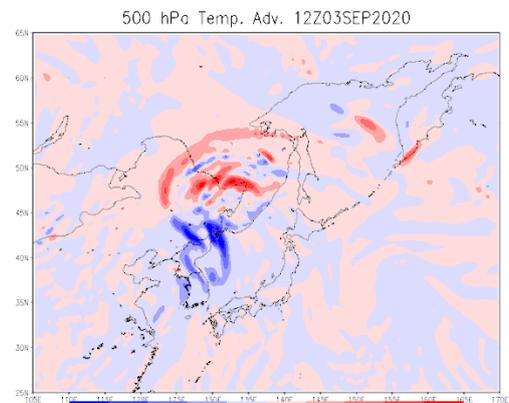
Рисунок 2.23 - Реанализ поля температуры воздуха на высоте 2 м за 03.09.2020 г.

Адвекция тепла на высоте от 1 до 5 км в передней части МЦ составила + 4°C за 12 часов, холода в тыловой – -4°C за 12 часов на всех высотах, кроме 1000 гПа, где она была +1 за 12 часов и -2°C за 12 часов соответственно (Рисунок 2.24).

А



Б



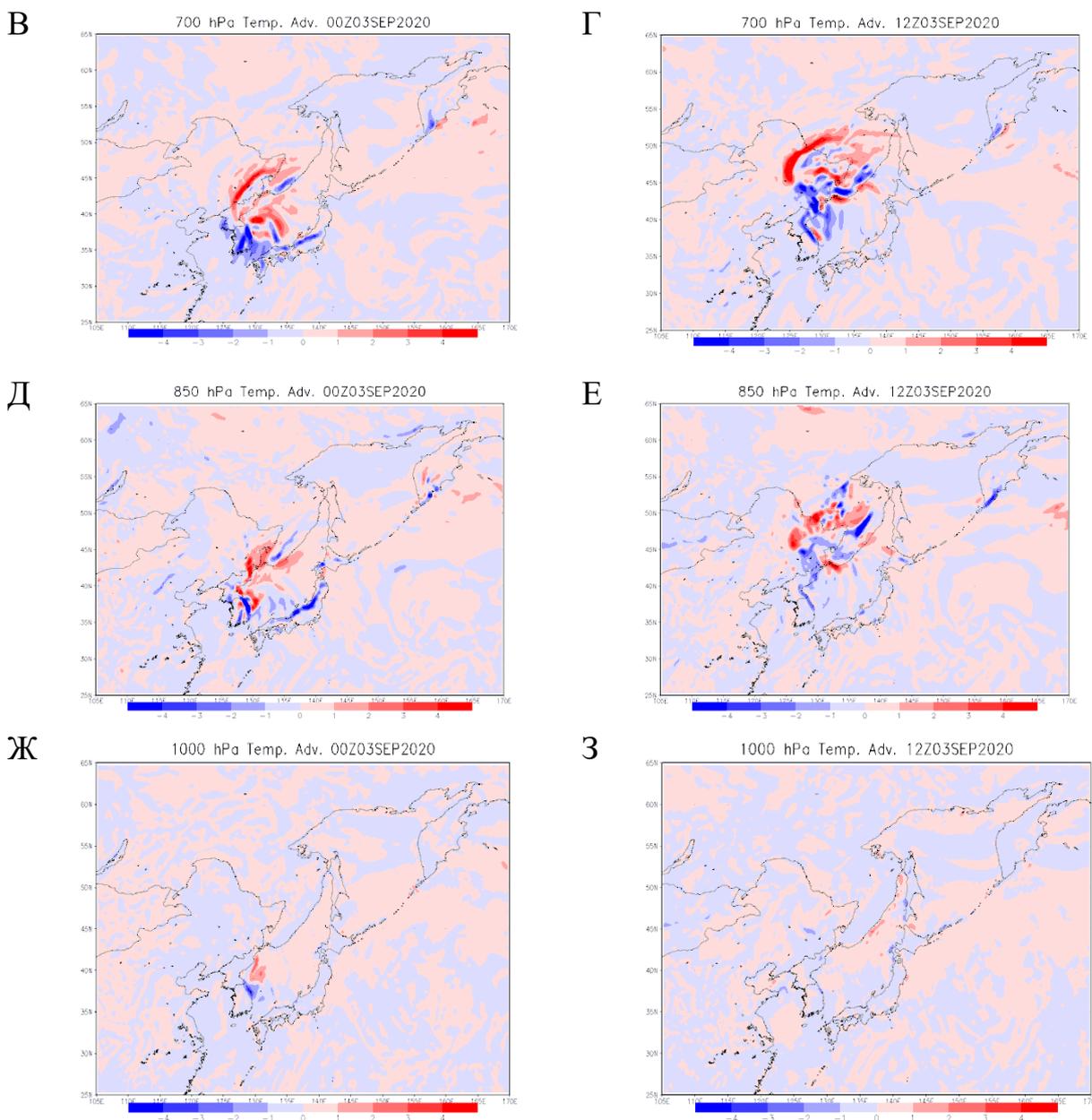


Рисунок 2.24 - Адвекция температуры воздуха на высотах за 03.09.2020 г.

Далее рассмотрим циклоническую завихренность к моменту прохождения МЦ по Японскому морю. МЦ проходил с 35° до 40° широты вдоль 130° в.д. северного полушария. На рисунках ниже представлен разрез профиля вихря по 140° в.д. В передней части значение вихря положительно, в тыловой — отрицательно. Здесь перенос вихря играет роль при дальнейшем развитии циклона. Барическое образование глубокое, максимум вихря наблюдается до высоты 3 км. На 12 UTC 03 сентября отрицательные значения завихренности

увеличиваются с 1 км до 3,5 км (Рисунок 2.25).

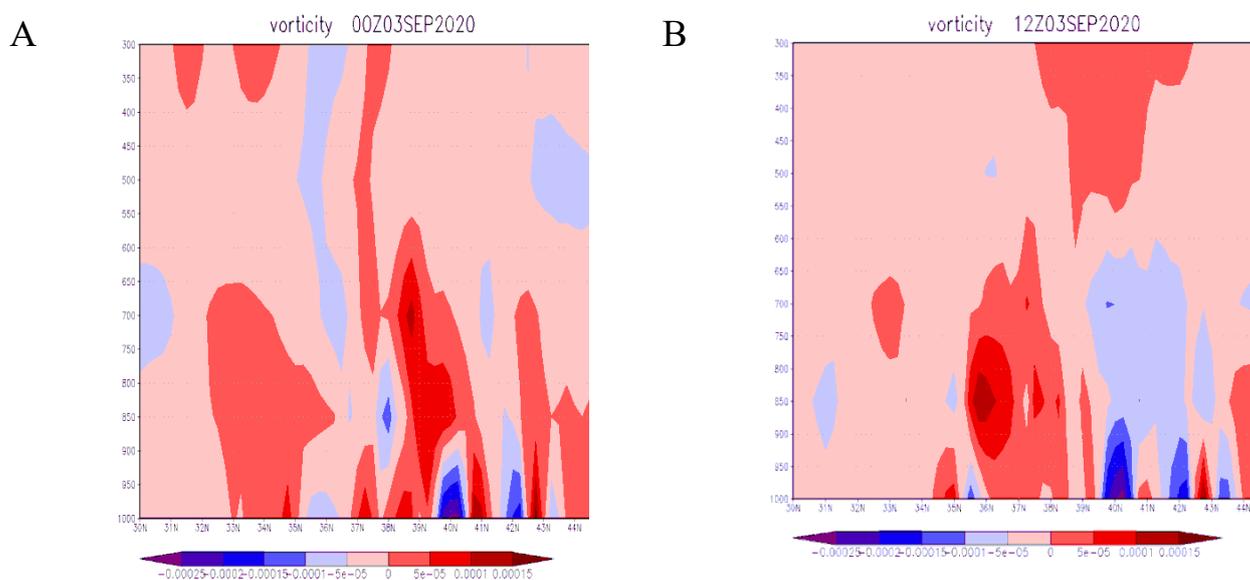
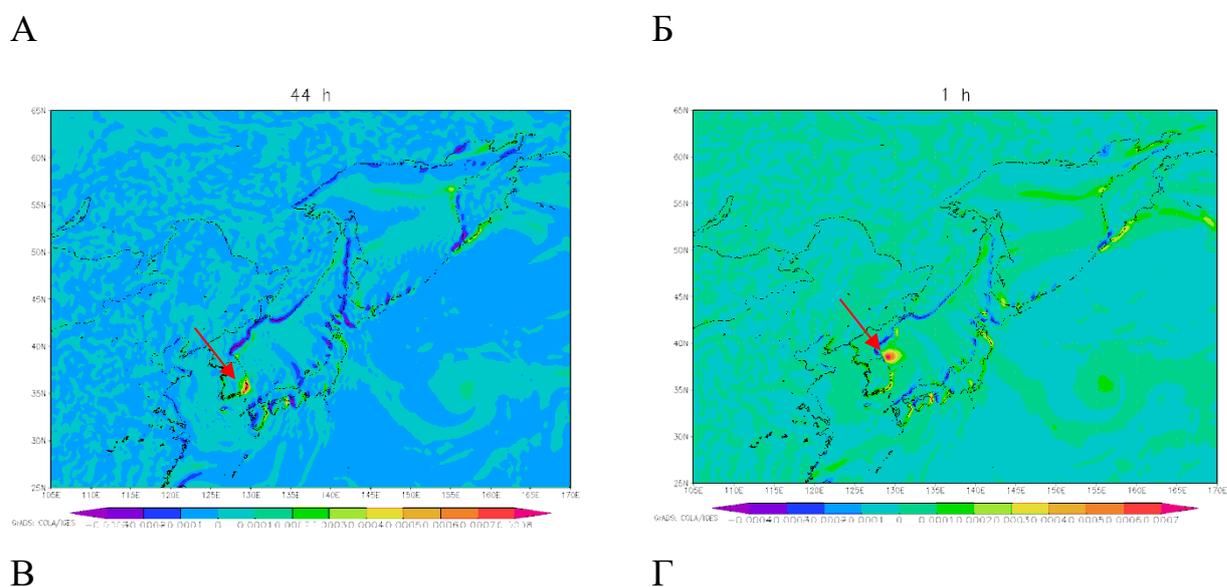


Рисунок 2.25 - Реанализ профиля вихря за 03.09.2020 г.

Однако дальше на 12 ВСВ заток холодного воздуха с Корейского полуострова с ветрами северных направлений на относительно теплую акваторию приводит к углублению МЦ (Рисунок 2.26). Максимум положительной и отрицательной завихренности пришелся на 22всв 02 сентября (А), снижение – на 06всв 03 сентября (В), а минимум – на 12всв (Г).



В

Г

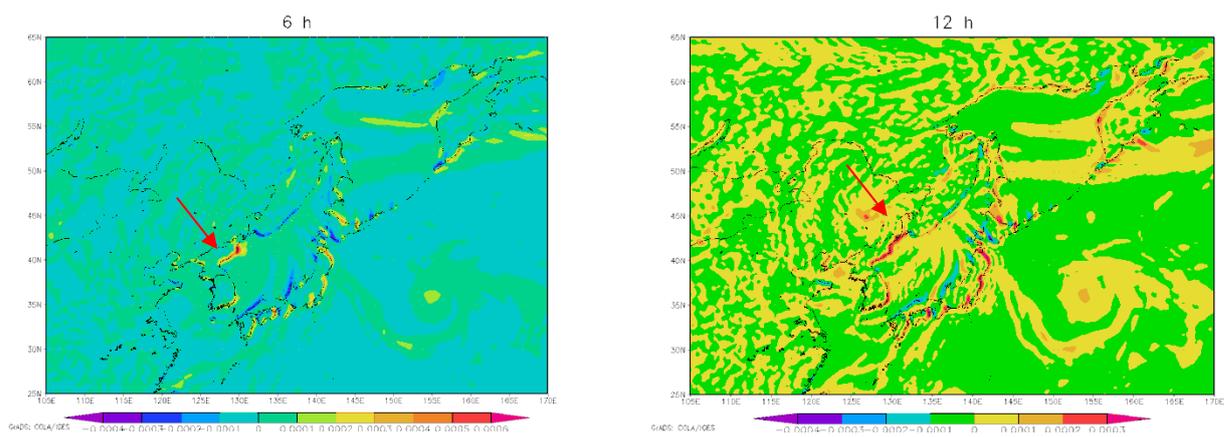
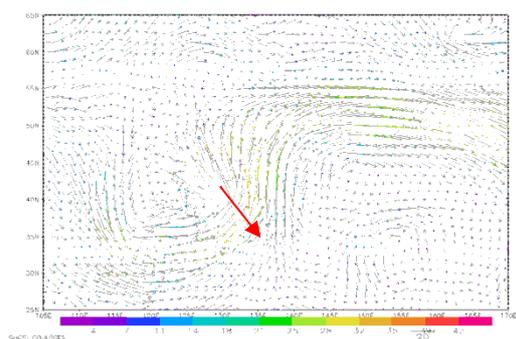


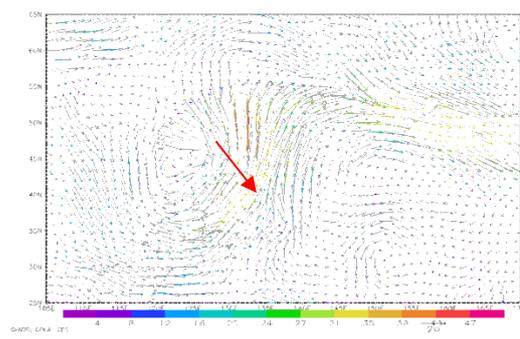
Рисунок 2.26 - Реанализ вихря за 03.09.2020 г.

Также над областью возникновения МЦ проходит струйное течение (Рисунок 2.27). Скорости ветра на высотах превышают 30 м/с от высоты 1,5 км до 3 км.

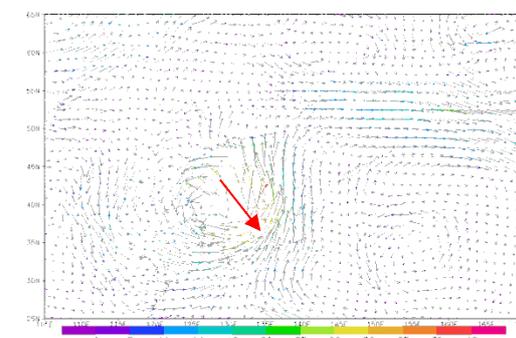
А 00 ВСВ



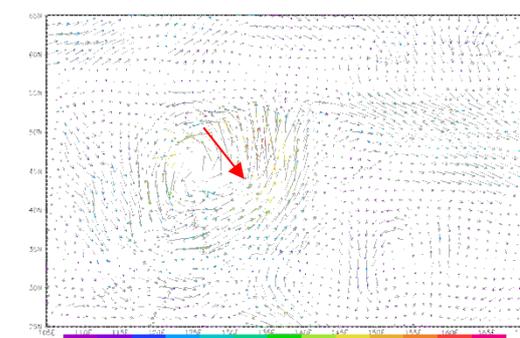
Б 12 ВСВ



В 00 ВСВ

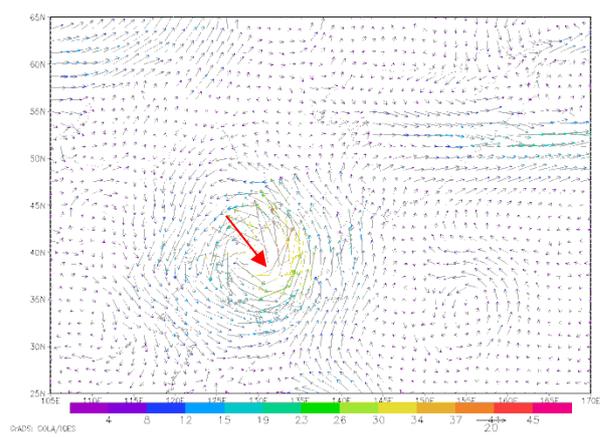


Г 12 ВСВ

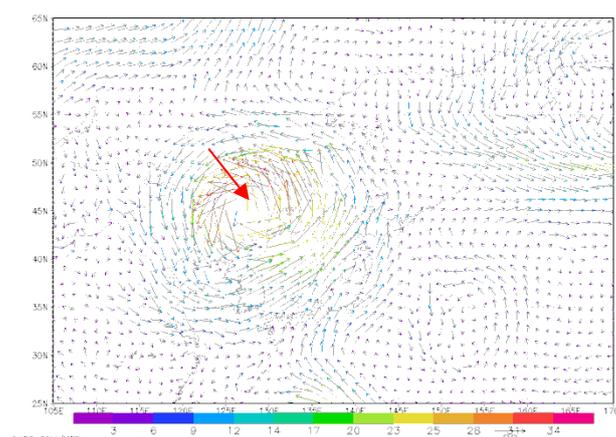


Д 00 ВСВ

Е 12 ВСВ



**Ж** 00 ВСВ



**З** 12 ВСВ

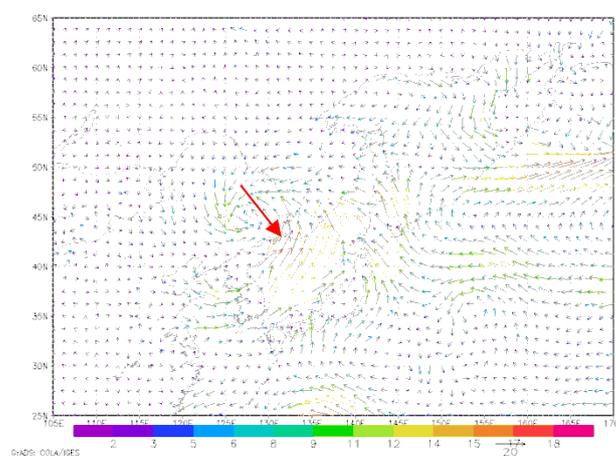
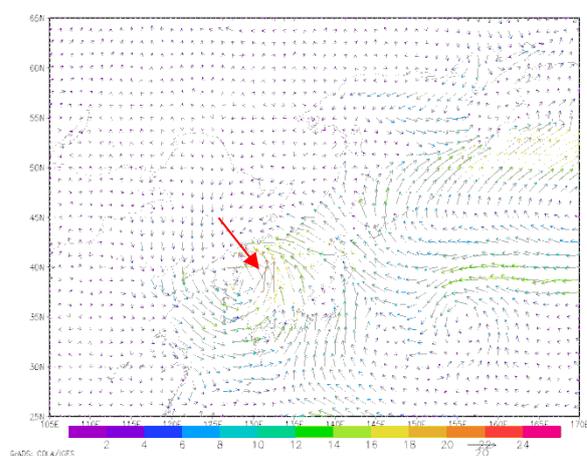
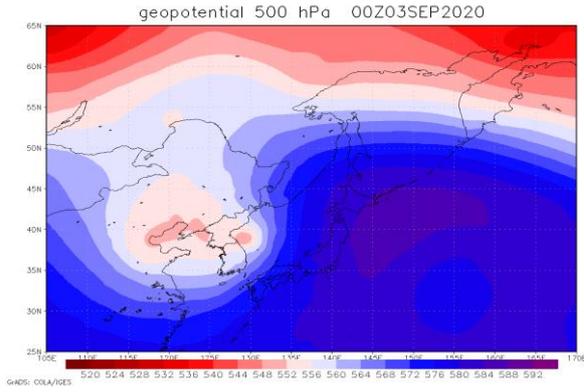


Рисунок 2.27 - Поля ветра за 03.09.2020

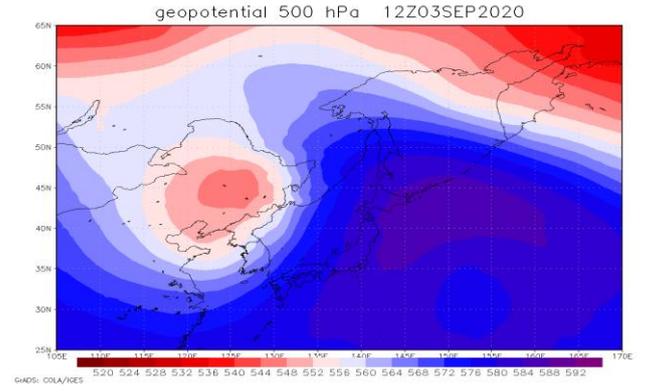
(А,Б – 500 гПа, В,Г – 700 гПа, Д,Е – 850 гПа, Ж,З – 1000 гПа)

Падение геопотенциала в передней части циклона – на 4гПа/12ч на высоте от 3 до 5 км на более низких высотах сопровождало передвижение МЦ по Японскому морю. И только на высоте 1,5 км наблюдался небольшой рост геопотенциала при выходе МЦ на континент, что говорит о начавшейся стадии заполнения (Рисунок 2.28).

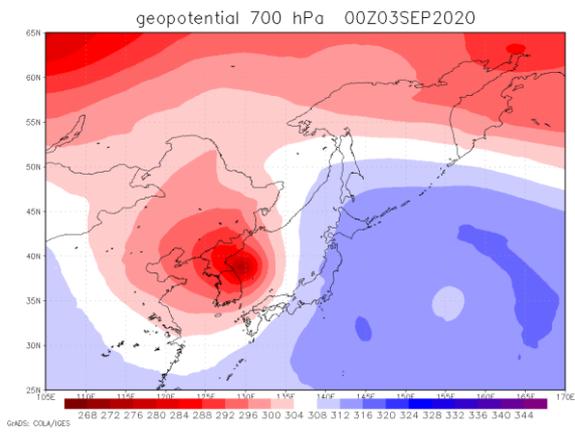
А



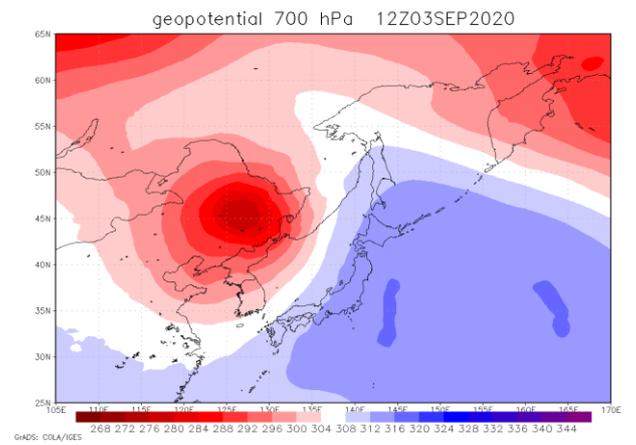
Б



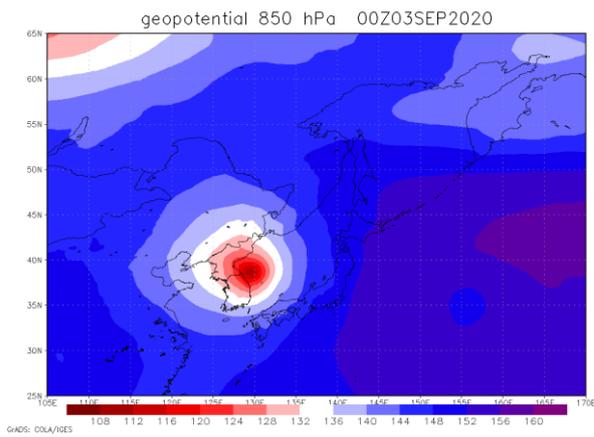
В



Г



Д



Е

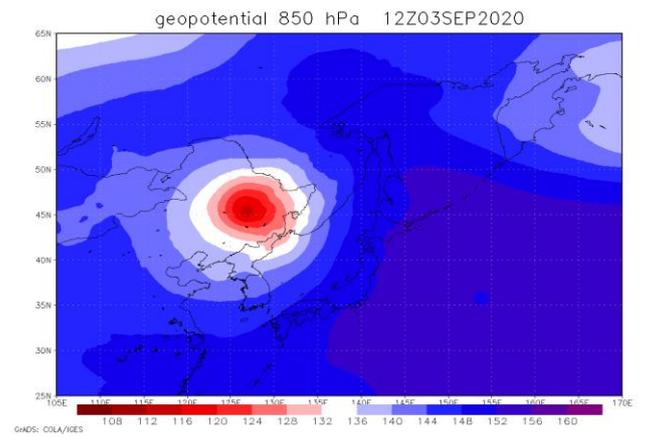


Рисунок 2.28 - Поля геопотенциала за 03.09.2020

### 2.3.4 МЦ Haishen

Рассмотрим случай возникновения МЦ Haishen за 31.08–09.09.2020г. (14°с.ш.,140°в.д.). Снимки со спутника представлены ниже (Рисунок 2.29).

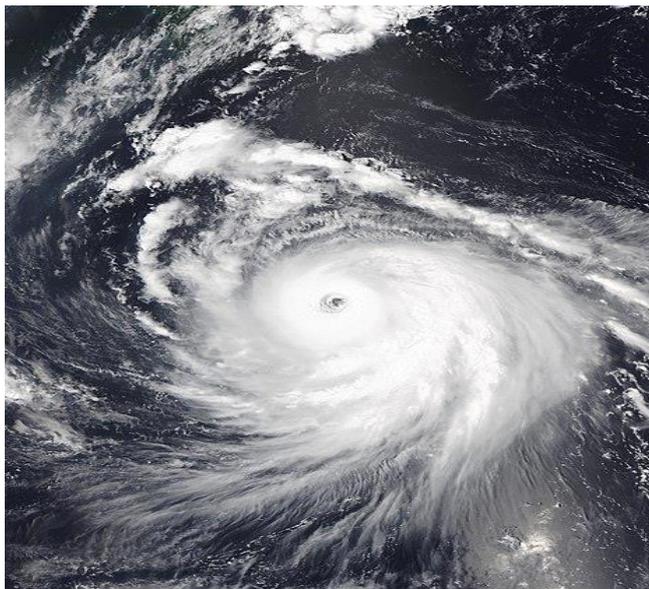


Рисунок 2.29 МЦ Haishen в Японском море

29 августа началось тропическая депрессия, расположенная на расстоянии 200 миль к северо-востоку от Гуама, которое на следующий день сформировалось в тропический и далее усилилась до сурового тропического шторма. Он направился на юго-запад в Филиппинское море. Интенсификация с формированием глаза произошла 3 сентября в начале дня, тайфуна получил название Haishen. Ранним утром 4 сентября Haishen стал супертайфуном с устойчивой скоростью ветра 135 узлов (155 миль в час; 250 км / ч), с четким симметричным глазом, видимым на спутниковых снимках. 5 сентября, при выходе на более северные широты с большим теплосодержанием океана в этом районе, было разрушено ядро системы и произошло ослабление МЦ и его падение ниже статуса супертайфуна. По мере того, как система продолжала двигаться на север к Японскому архипелагу, она продолжала ослабевать.

Haishen вышел на берег в Ульсане, Южная Корея примерно в 00:00 в св 7 сентября с 10-минутным максимальным устойчивым ветром со скоростью 140 км / ч (85 миль в час) и центральным давлением 955 гПа (Рисунок 2.30).

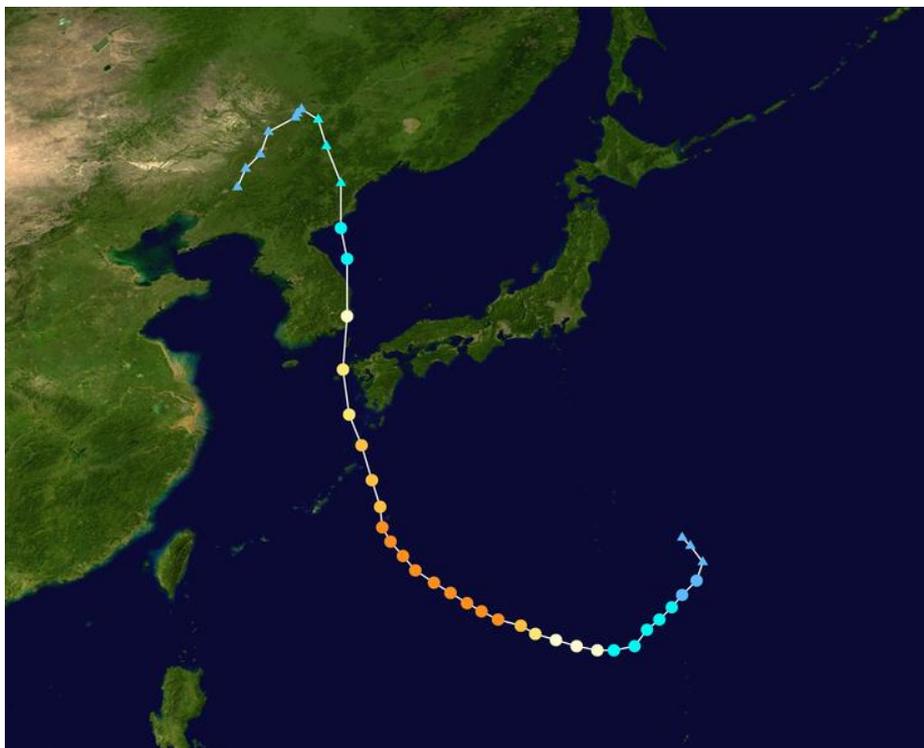


Рисунок 2.30 – Траектория смещения ТЦ Haishen

Проведение синоптического обзора и анализа приземных карт за срок образования МЦ позволило посмотреть синоптическую ситуацию, способствовавшую его развитию при прохождении в Японском море.

Исследуем поле давления в момент прохождения в Японском море МЦ в 00 и 12 часов (Рисунок 2.31). Приземное атмосферное давление сначала падало (970 гПа), а по мере продвижения тайфуна на север Японского моря оно выросло на 10 гПа.

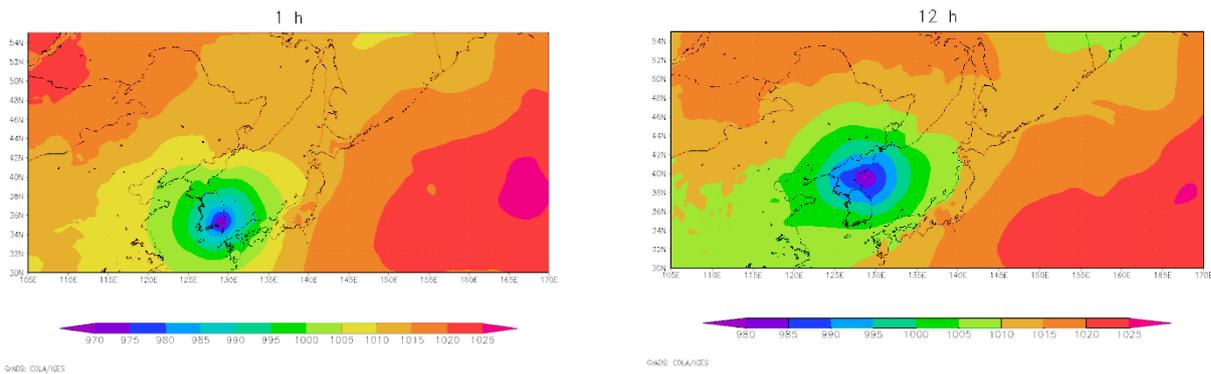


Рисунок 2.32 – Поле приземного давления за 07.09.2020 г. (00 ВСВ) и 07.09.2020 г. (12 ВСВ)

Температура воздуха в южной части Японского моря составляла в 00 ВСВ 07 сентября 24–30°C, а в 12 ВСВ– 21–24°C (Рисунок 2.33). В тыловой части МЦ так же наблюдался небольшой контраст температуры (-3°C). Однако это не привело к углублению тайфуна: давление в центре выросло с 970 до 985гПа (рисунки 2.33, 2.34).

А

Б

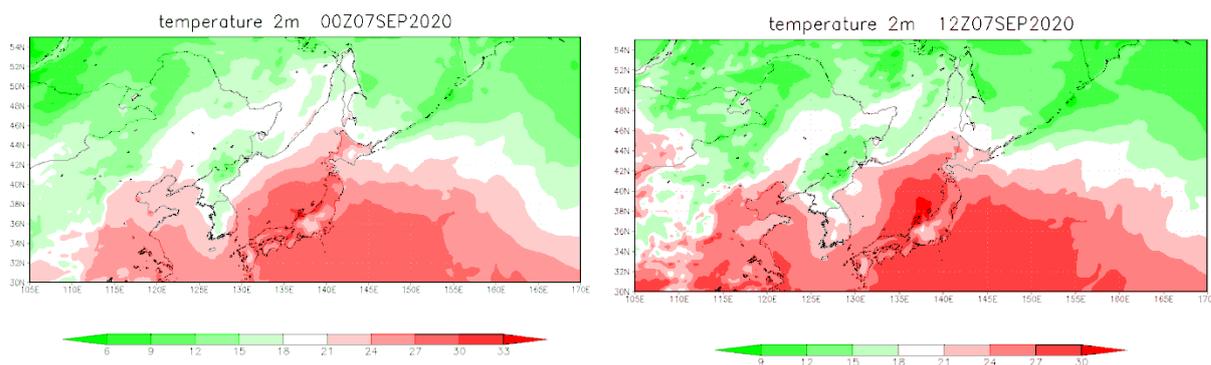


Рисунок 2.33 - Реанализ температуры воздуха за 07.09.2020 г.

А

Б

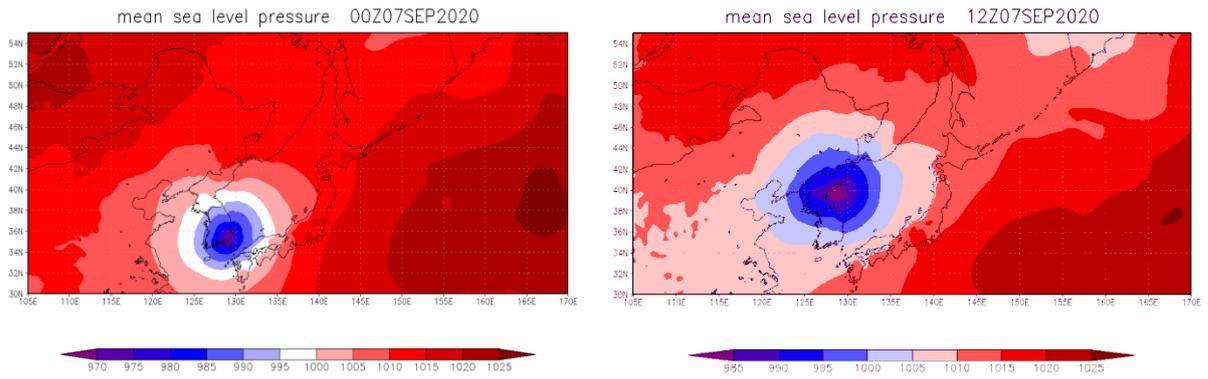
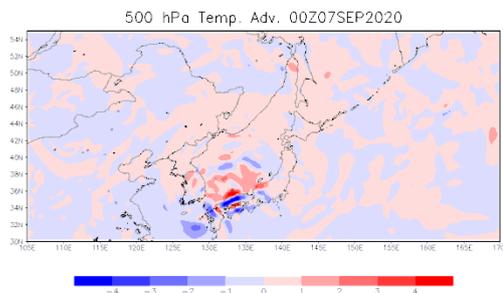


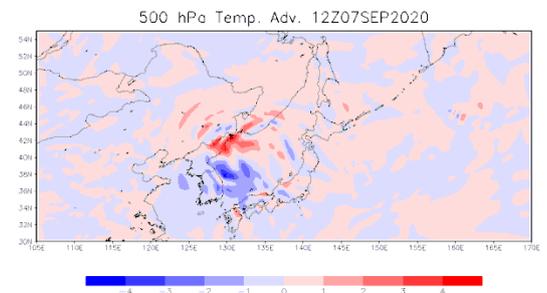
Рисунок 2.34 - Поле приземного давления за 07.09.2020 г.

Адвекция тепла на высоте от 1,5 до 5 км в передней части МЦ составила  $+4^{\circ}\text{C}$  за 12 часов, холода в тыловой –  $-4^{\circ}\text{C}$  за 12 часов (Рисунок 2.35). На высоте 1 км адвекция слабее – в пределах  $1-2^{\circ}\text{C}$  за 12 часов.

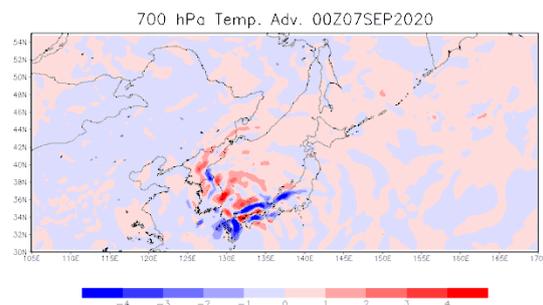
А



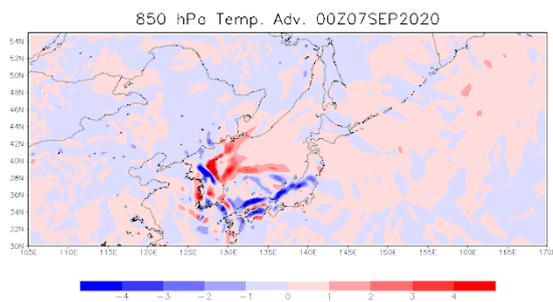
Б



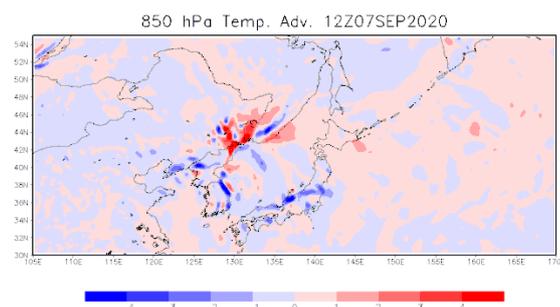
В



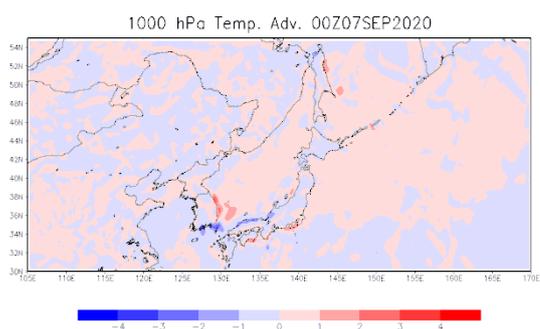
Д



Е



Ж



З

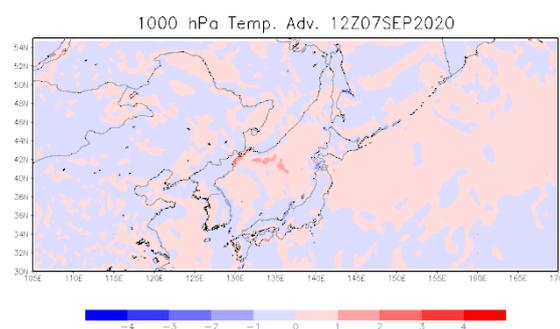
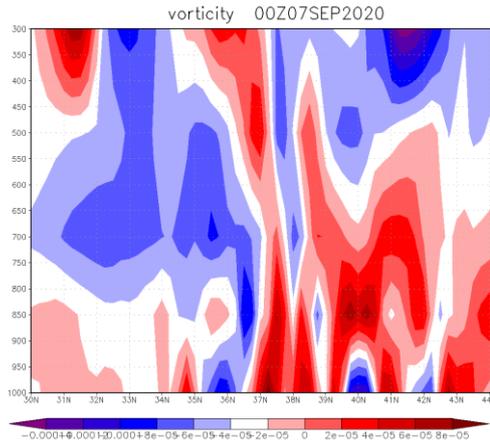


Рисунок 2.35 - Поле адвекции за 07.09.2020 г.

Далее рассмотрим циклоническую завихренность к моменту прохождения МЦ по Японскому морю. Данный МЦ проходил по  $130^\circ$  в. д. с  $35^\circ$  до  $40^\circ$  с.ш. В передней части значение вихря положительно, в тыловой — отрицательно. Барическое образование глубокое, максимум вихря наблюдается до высоты 7 км. На 12 ВСУ 07 сентября МЦ проходил, уменьшаясь по вертикали до 3 км (Рисунок 2.36).

A



B

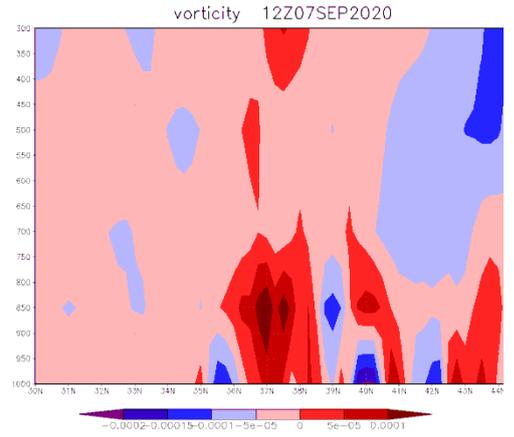
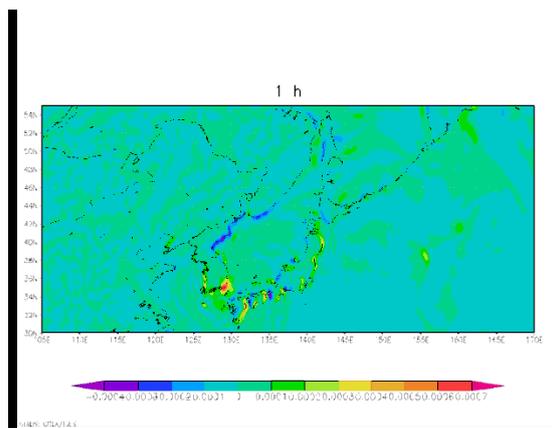


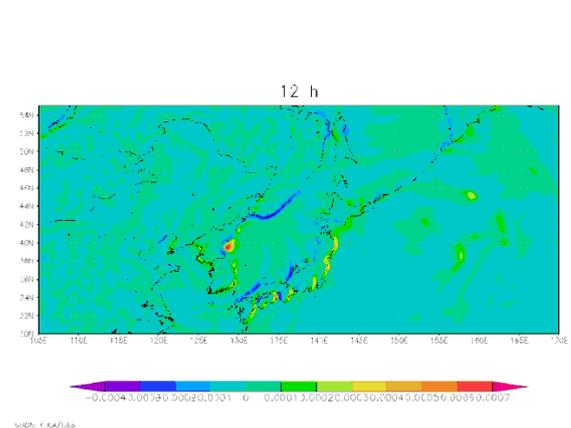
Рисунок 2.36 – Вертикальный разрез поля вихря за 07.09.2020 г.

Максимум положительной завихренности пришелся на 01 ВСВ 07 сентября (Б), снижение – на 24 ВСВ того же дня (В), а далее завихренность сменилась на минимальную (Г) с последующим небольшим ростом при выходе МЦ на континент (Рисунок 2.37).

A

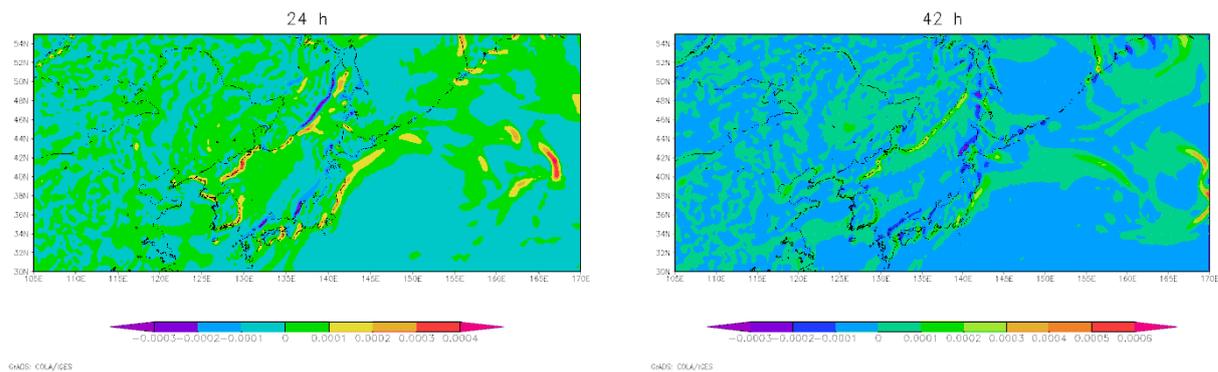


Б



В

Г



Д

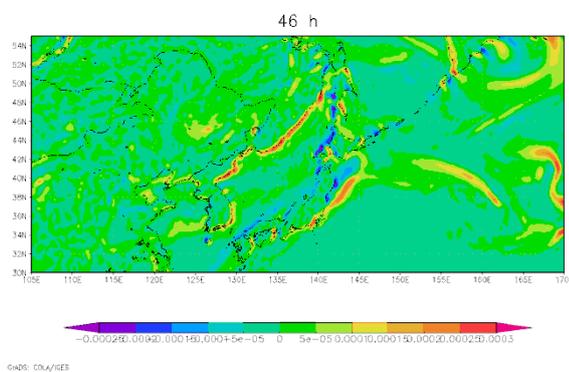
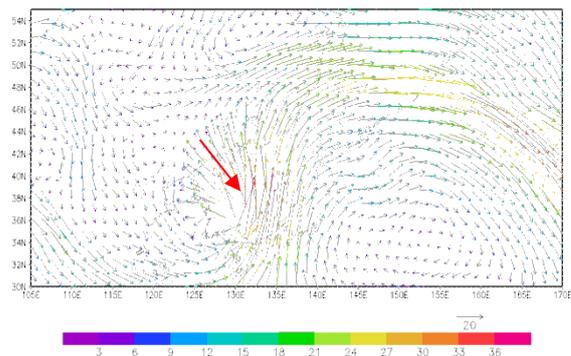


Рисунок 2.37 - Поле вихря за 07.09.2020 г.

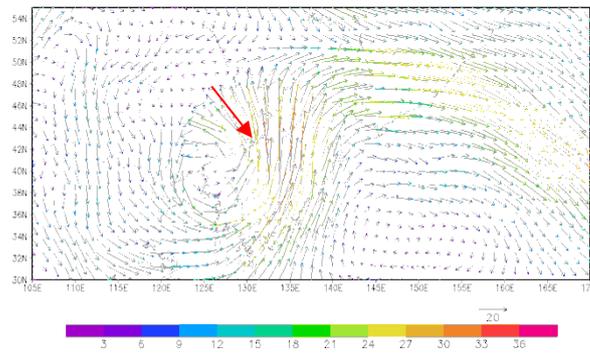
Рассматривая поле ветра средней тропосферы за 00 и 12 часов (Рисунок 2.38), видим, что струйное течение также имеется в передней части МЦ. Скорости ветра на высотах превышают 30 м/с, однако, только до высоты 3 км. Ниже струйное течение отсутствует.

**A** 00 BCB



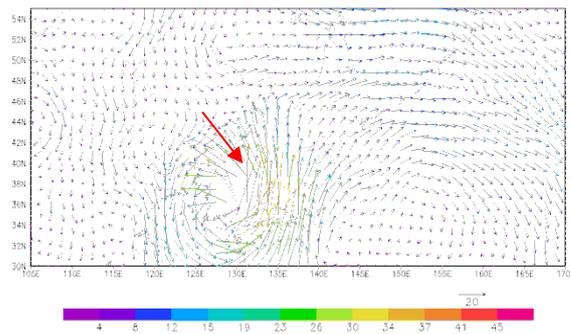
©ADS: COLA/RES

**Б** 12 BCB



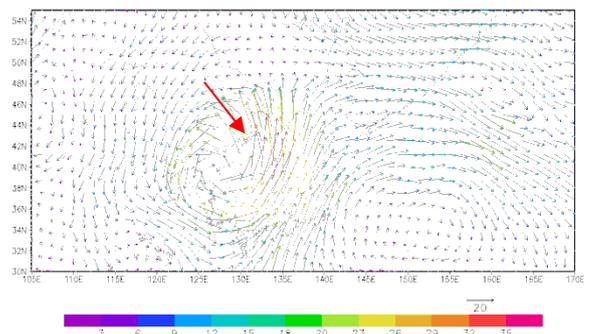
©ADS: COLA/RES

**В** 00 BCB



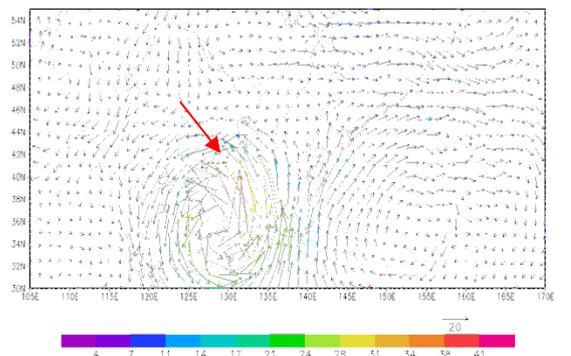
©ADS: COLA/RES

**Г** 12 BCB



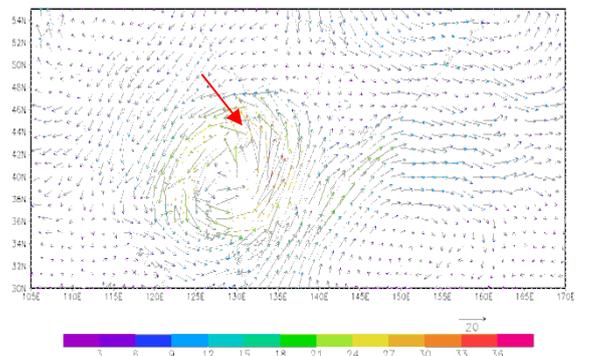
©ADS: COLA/RES

**Д** 00BCB



©ADS: COLA/RES

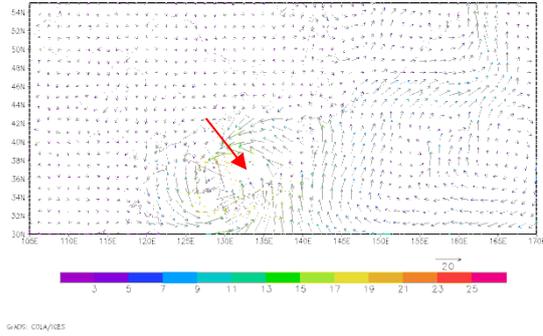
**Е** 12BCB



©ADS: COLA/RES

Ж

00 ВСВ



З

12 ВСВ

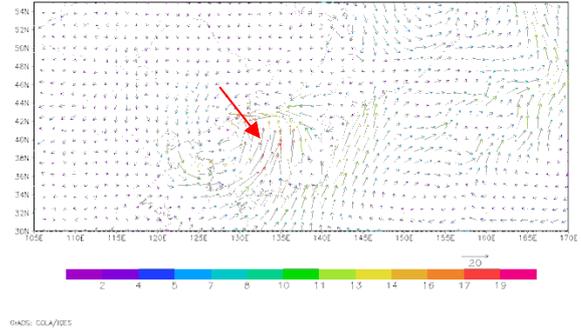
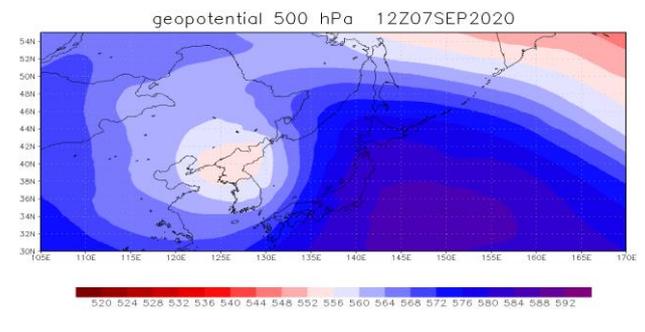
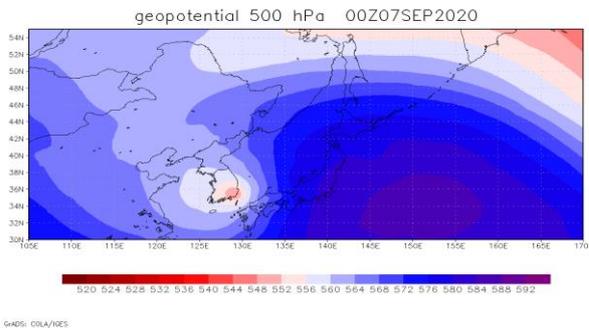


Рисунок 2.38 - Поля ветра за 10.08.2020

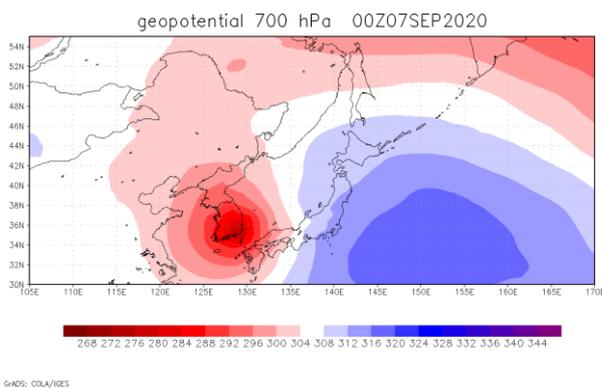
(А,Б – 500 гПа, В,Г – 700 гПа, Д,Е – 850 гПа, Ж,З – 1000 гПа)

В этом случае выявлен рост геопотенциала в МЦ – от 4гПа/12ч на 5 км до 8гПа/12ч на 1,5 км (Рисунок 2.39).

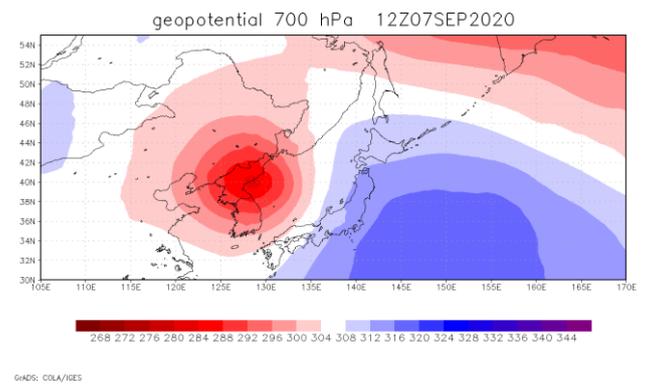
Б



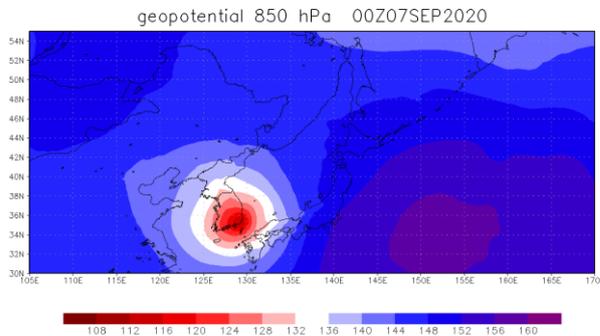
В



Г

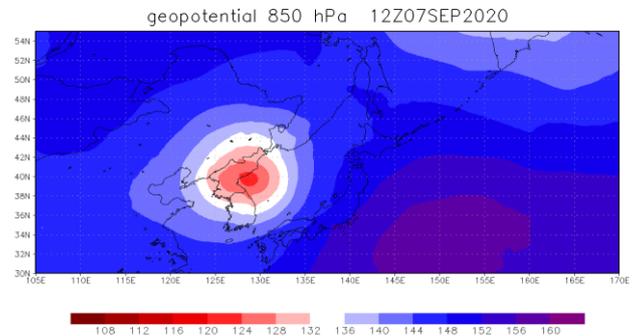


Д



GNDS: COLA/RES

Е



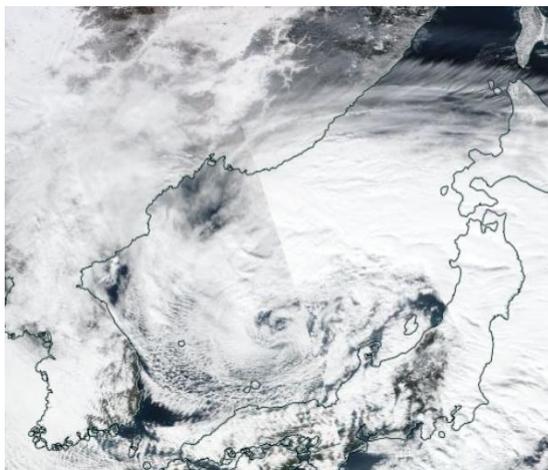
GNDS: COLA/RES

Рисунок 2.39 - Поля геопотенциала за 07.09.2020

### 2.3.5 МЦ в холодное полугодие 07-08.01.2020 г.

Рассмотрим случай возникновения МЦ в холодный период за 07.01–08.01.2020г. (14°с.ш.,140°в.д.). Снимок со спутника и приземный анализ за 08.01.2020всв представлены ниже (Рисунок 2.40).

А



Б

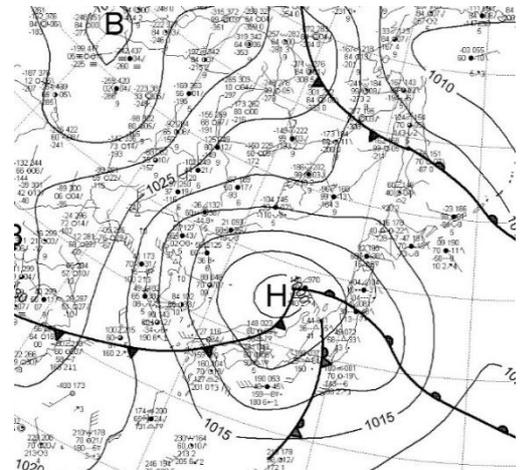


Рисунок 2.40 - МЦ 08.01.2020 в Японском море  
(А – спутниковый снимок, Б – приземный анализ за 00всв 08.01.2020)

Циклон сформировался над Желтым морем 7 января 2020 г., на следующий день вышел на Японское море и углубился до МЦ.

Проведение синоптического обзора и анализа приземных карт за срок образования МЦ позволило посмотреть синоптическую ситуацию, способствовавшую его развитию при прохождении в Японском море.

В момент приближения МЦ к Японскому морю приземное атмосферное давление упало на 10 гПа (с 1020 гПа в 00 до 1010 гПа 12 часов 07.01.2020) (Рисунок 2.41). По мере продвижения циклона на восток произошло его углубление до 990 гПа.

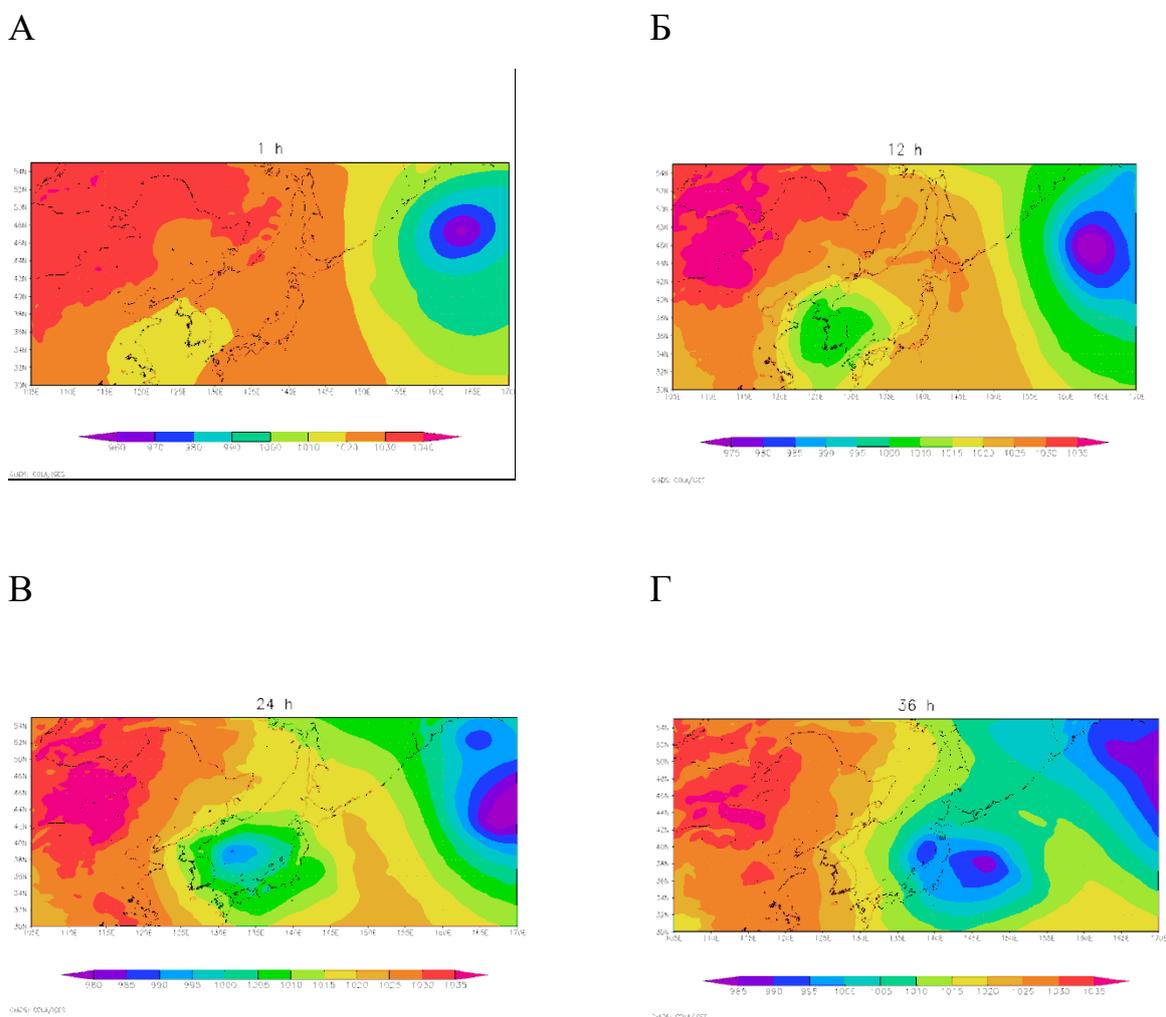


Рисунок 2.41 - Поле приземного давления за 07.09.2020 г. (00 ВСВ) и 08.09.2020 г. (12 ВСВ)

Температура воздуха в юго-западной части Японского моря составляла в 00всв 07 января 10–15°C, а в 12всв – 15–20°C (Рисунок 2.42). В тыловой части МЦ контрастов температуры не наблюдалось.

А

Б

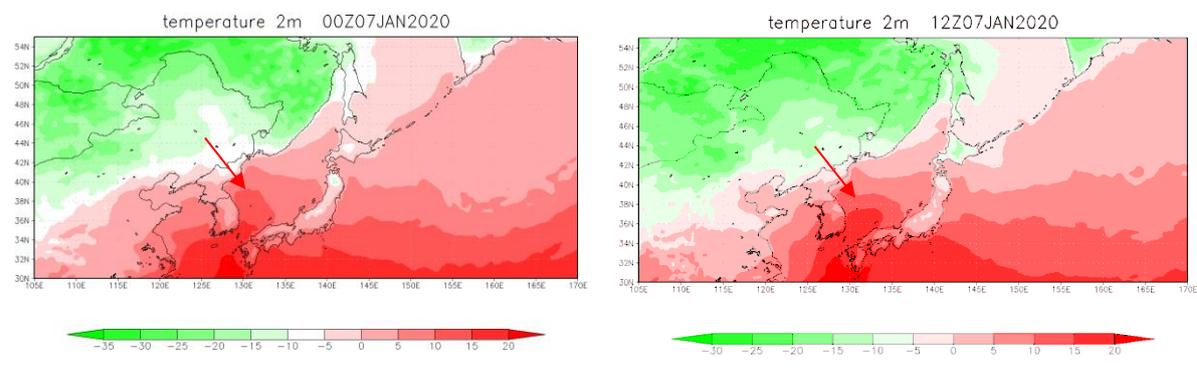


Рисунок 2.42 - Реанализ температуры воздуха за 07.01.2020 г.

Давление в центре циклона упало на 20 гПа за 12 ч (с 1010 до 990гПа) (рисунок 2.43)

А

Б

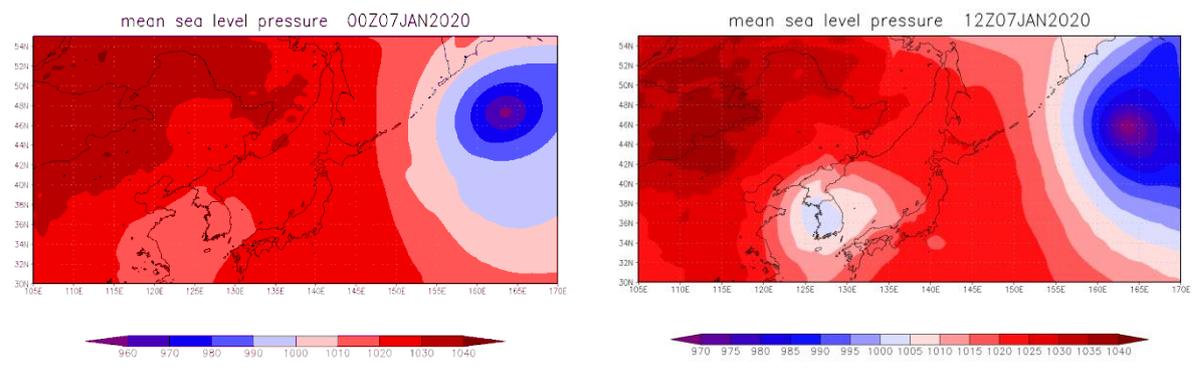
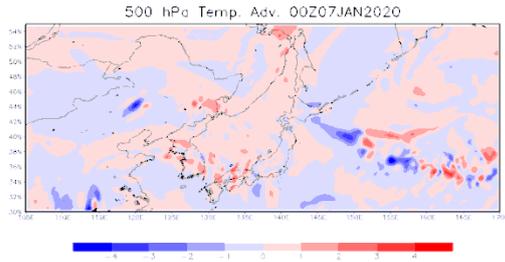


Рисунок 2.43 - Поле приземного давления за 07.01.2020 г.

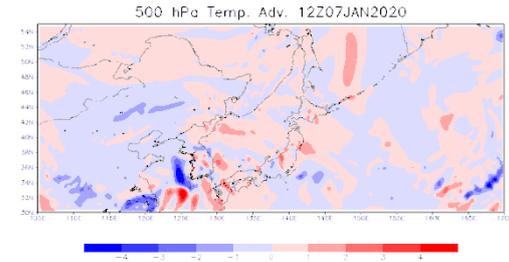
Адвекция тепла на высоте от 1,5 до 5 км в передней части МЦ составила +1-2°C за 12 часов, холода в тыловой – -3-4°C за 12 часов (Рисунок 2.44). На высоте 1 км выявлена только адвекция холода – в пределах 2-3°C за 12 часов.

А

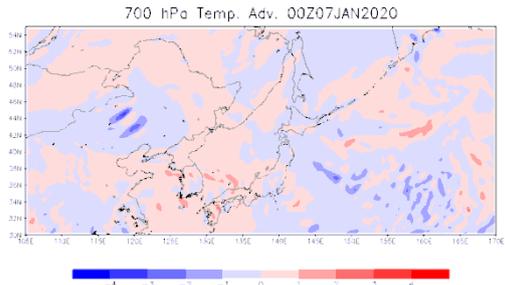
Б



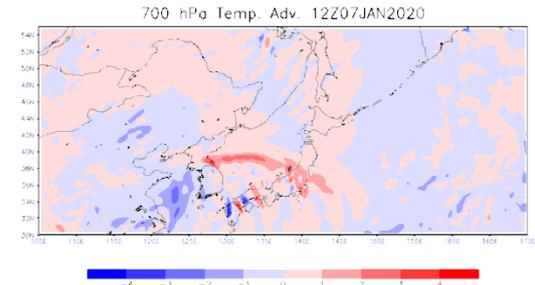
В



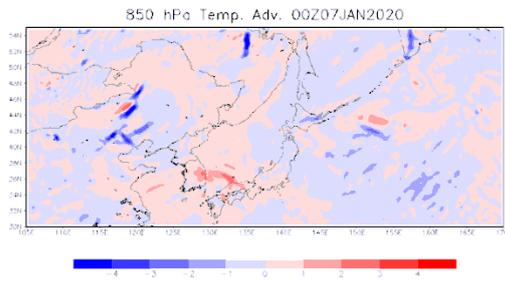
Г



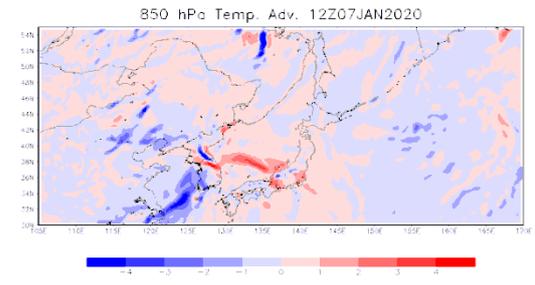
Д



Е



Ж



З

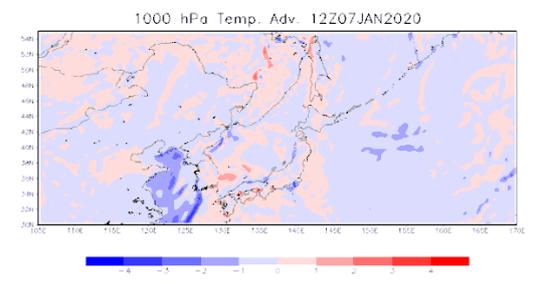
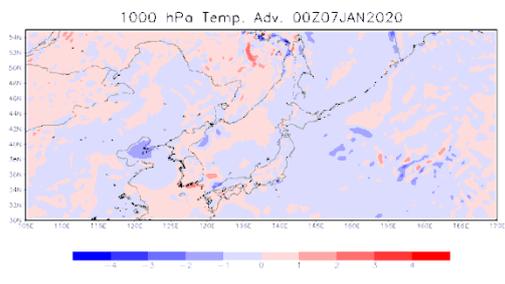
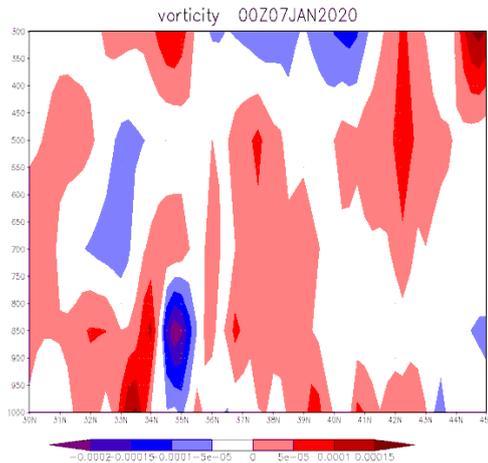


Рисунок 2.44 - Поля адвекции за 07.09.2020 г.

Далее рассмотрим циклоническую завихренность к моменту прохождения МЦ по Японскому морю. Данный МЦ проходил по 36° с.ш. При прохождении

его над Желтым морем видно, что в передней части значение вихря положительно и простирается до высоты более 5 км. На 12 ВСВ 07 января МЦ проходил, уменьшаясь по вертикали до 4 км, а отрицательные значения в тыловой части выросли (Рисунок 2.45).

А



В

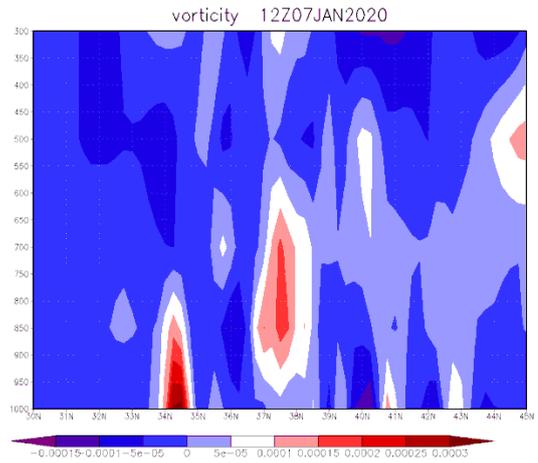
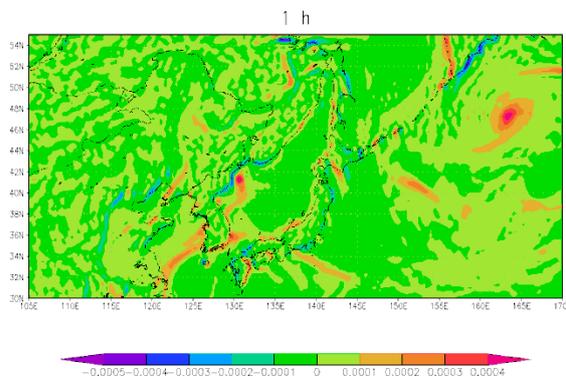


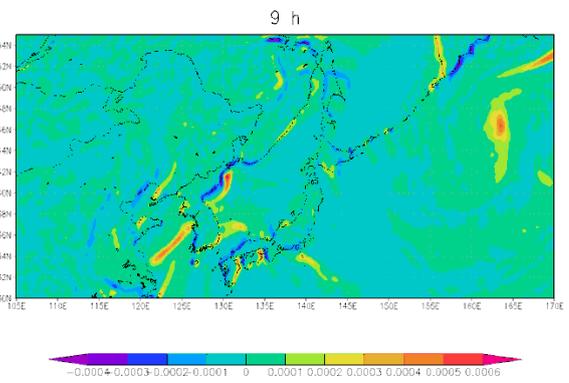
Рисунок 2.45 – Вертикальный разрез поля вихря за 08.01.2020 г.

Максимум положительной завихренности пришелся на 00 ВСВ 08 января (В), отрицательной – на 05 ВСВ того же дня (Г), а далее отрицательная завихренность превзошла положительную по значениям (Д) и МЦ вышел в Тихий океан (Рисунок 2.46).

А

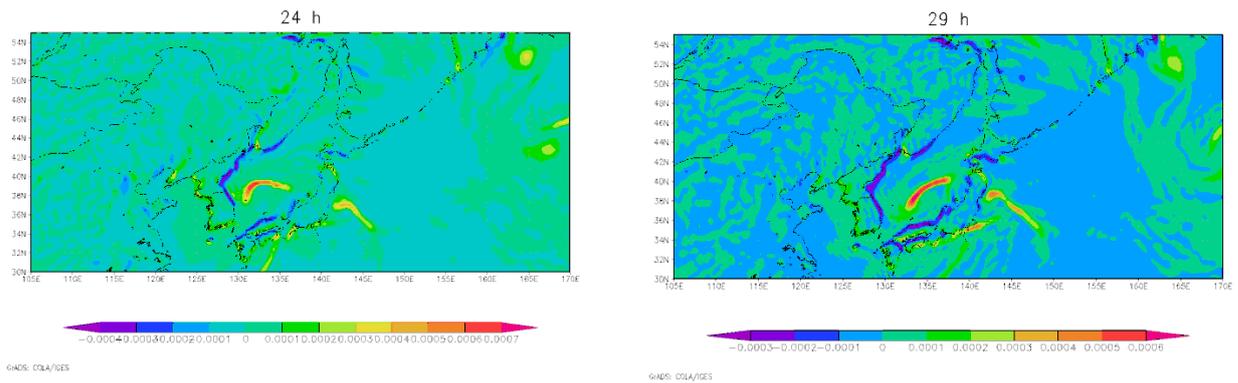


Б



В

Г



Д

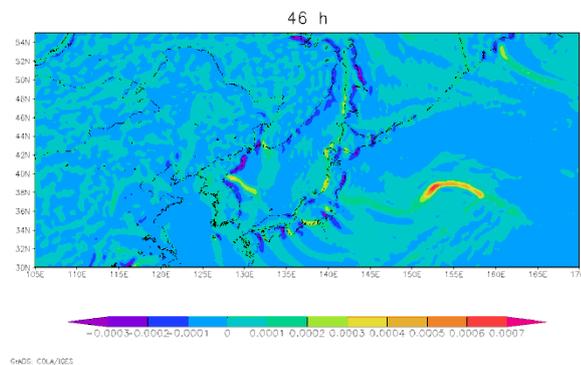


Рисунок 2.46 - Поле вихря за 08.01.2020 г.

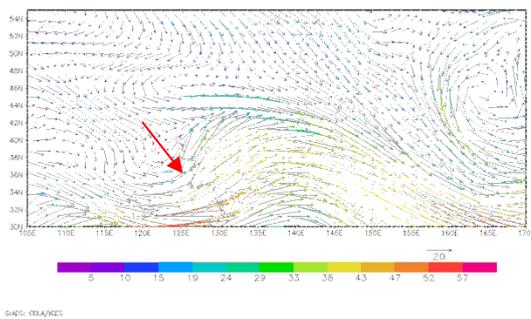
Анализируя скорости ветра в нижней тропосфере за 12 ВСВ 07.01.2020 (Рисунок 2.47), видим, что струйное течение также имеется в передней части МЦ. Скорости ветра на высотах превышают 30 м/с ( $H_{500}=57$  м/с). На уровне 1000 гПа струйное течение отсутствует.

А

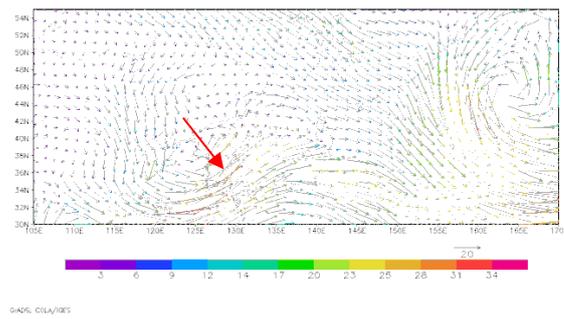
500 гПа

Б

700 гПа



**В** 850 гПа



**Г** 1000 гПа

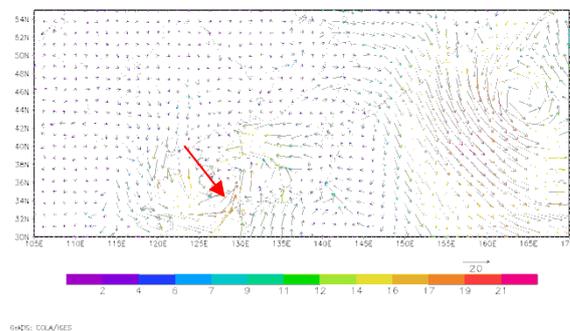
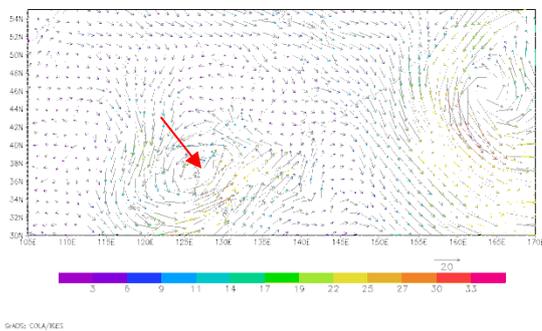
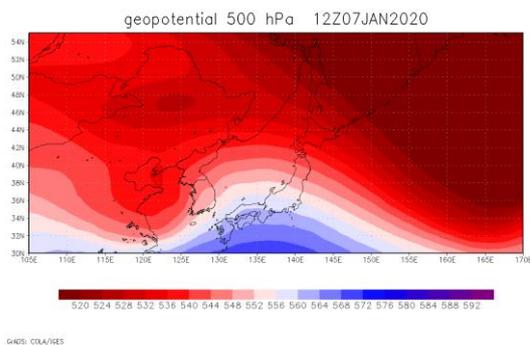


Рисунок 2.47 - Поля ветра за 07.01.2020

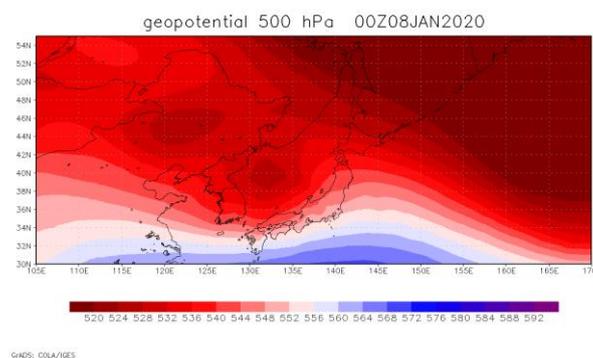
МЦ перемещался под высотной ложбиной, о чем свидетельствует падение геопотенциала на всех высотах – от 28гПа/12ч на 5 км до 20гПа/12ч на 1,5 км (Рисунок 2.48).

**А**

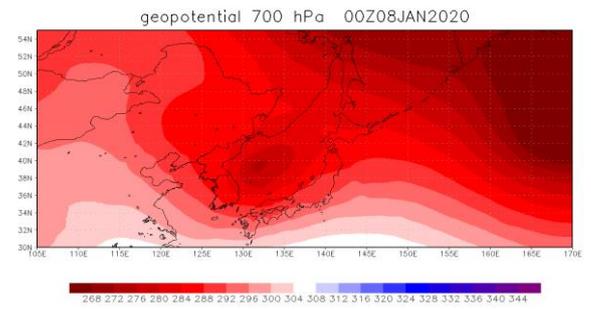
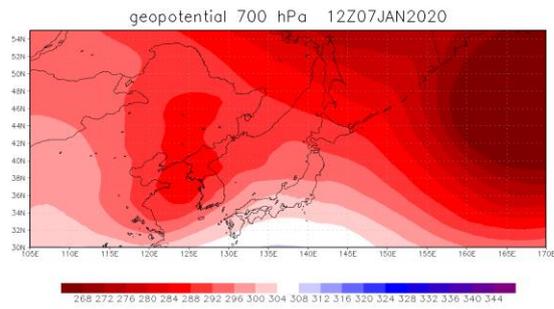


**В**

**Б**



**Г**



Д

Е

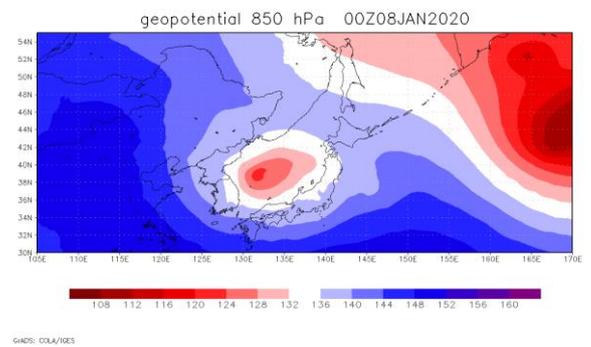
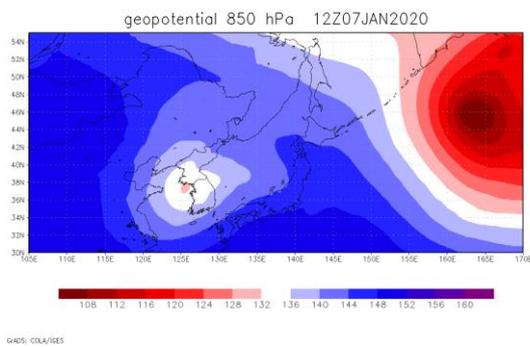


Рисунок 2.48 - Поля геопотенциала

Заключение

В работе рассмотрены случаи кратковременного влияния мезомасштабных циклонов на Японское море в 2020 г. Прохождение МЦ сопровождалось сильными осадками и резким усилением ветра до штормовых значений. Изменения носили краткосрочный характер, и после ухода мезоциклонов с акватории Японского моря рассмотренные показатели вернулись к фоновым значениям.

В результате изучения спутниковых снимков выявлено, что облачность МЦ Японского моря плотная – это кучевые и кучево-слоистые облака с перистыми вершинами. В основном, наличие полос облаков повышенной конвекции и полей открытых конвективных облачных ячеек характерно для момента образования МЦ. На спутниковых снимках чем интенсивней мезоциклон, тем ярче изображение.

Анализ пространственно-временного распределения мезоциклонов (МЦ) над Японским морем за 2020 г. показал, что общими благоприятными условиями для возникновения МЦ были заток холодного воздуха на относительно теплую морскую поверхность (так называемое холодное вторжение) и орографический эффект, вызванный деформацией воздушных потоков у западного побережья Японского моря горным хребтом Сихотэ-Алиня с запада и островом Хоккайдо с востока. Типичной синоптической ситуацией можно считать наличие адвекции тепла в передней части и адвекции холода в тыловой, малоградиентное поле и образование МЦ в ложбине основного циклона, а также наличие вертикального сдвига ветра в приземном слое и струйного течения на высотах. Анализ предпосылок появления МЦ для возможности дальнейшего прогнозирования показал, что необходима также высотная ложбина на  $H_{500}$ , под которую попадает МЦ, так как высотные гребни от Тихоокеанского максимума блокируют прохождение любых циклонов по Японскому морю.

Сравнивая условия прохождения МЦ в Японском море в теплое и холодное полугодие, можно сделать выводы, что причиной формирования и развития в первом случае служит главным образом термический фактор, а во

втором – динамический. Летом и осенью МЦ выходят из тропических широт на холодную поверхность Японского моря. Вынос теплых масс воздуха с юга в передней части МЦ и заток холода в тыловой части способствуют его регенерации. Зимой же циклоны идут с Желтого моря на восток, северо-восток, выходят на относительно теплую морскую поверхность Японского моря, а с континента северо-западные холодные потоки углубляют их до МЦ.

Для данного региона в основном характерны летние МЦ, образующиеся из тропических циклонов, появляющиеся с июня по октябрь.

#### Литература

1. Григоркина Р. Г., Фукс В. Р. Воздействие тайфунов на океан. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 243 с.

2. Пермяков М. С., Тархова Т. И., Поталова Е. Ю. Тропические циклоны северо-западной части Тихого океана и их воздействие на воды морей Дальнего Востока // Сб. «Дальневосточные моря России». Кн. 1. М.: Наука, 2007. С. 97-111.
3. Поталова Е. Ю., Тархова Т. И., Пермяков М. С. Некоторые оценки воздействия тропических циклонов на верхний слой Японского и Охотского морей //
4. 20. Тархова Т. И., Пермяков М. С., Сергиенко А. С. Некоторые особенности мелкомасштабного взаимодействия атмосферы и океана в области тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2002. № 11. С. 60-67.
5. Пермяков М. С., Акмайкин Д. А., Салюк П. А. и др. Влияние тайфунов на поля концентрации хлорофилла «а» по данным сканера цвета морской воды SeaWiFS // Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 56-62.
6. Пермяков М. С., Тархова Т. И., Буров Д. В. и др. Возмущения поля температуры поверхности при прохождении тропического циклона в Охотском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 1. С. 332-336
7. Григоркина Р. Г., Фукс В. Р. Воздействие тайфунов на океан. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 243 с.
8. Пермяков М. С., Тархова Т. И., Сергиенко А. С. Оценки характеристик горизонтального турбулентного обмена в северо-западной части Тихого океана // Океанология. 2007. Т. 47. № 5. С. 696-701.
9. Гурвич И. А. Интенсивные мезомасштабные циклоны над дальневосточными морями. Часть I. Структура и характеристики мезомасштабных циклонов по мультисенсорным спутниковым измерениям / Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 87 с.
10. Луценко Э. И., Лагун В. Е. Полярные мезомасштабные циклоны в атмосфере над Баренцевым и Карским морями // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 76-89.

11. Заболотских Е. В., Бобылёв Л. П., Дикинис А. В. и др. Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 16. С. 59-76.
12. Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 64-77.
13. Chen F., von Storch H. Trends and variability of North Pacific polar lows // Advances in meteorology. 2013. V. 2013. Article ID 170387. 11 P. DOI: 10.1155/2013/170387.
14. Yanase W., Niino H., Watanabe S. I. et al. Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 Reanalysis // J. Climate. 2016. V. 29. № 2. P. 419-437. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0291.1.
15. Гурвич И. А., Пичугин М. К. Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 51-59.
16. Watanabe S. I., Niino H., Yanase W. Climatology of polar mesocyclones over the Sea of Japan using a new objective tracking method // Mon. Wea. Rev. 2016. V. 144. P. 2503-2515. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0349.1.
17. Нестеров Е. С., Лукин А. А. Об экстремальном волнении в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2012. № 11. С. 46-55.
18. <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/>
19. [https://ru.abcdef.wiki/wiki/Cyclone\).](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Cyclone).)
20. Министерство природных ресурсов Российской Федерации Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.  
Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики.  
Справочное пособие

21. Polar Lows Project, Final Report. Main editor Lystad M. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, May 1986. 196 p.
22. [Public.wmo.int/](http://public.wmo.int/)тропические циклоны
23. Dysthe K.B., Harbitz A. Big waves from polar lows? // Tellus 39A. 1987. P. 500-508.
24. [www.jma.go.jp/en/Activities/forecast/html](http://www.jma.go.jp/en/Activities/forecast/html)
25. [www.Atlantic Oceanografic and Meteorological Laboratory](http://www.AtlanticOceanographicandMeteorologicalLaboratory.com), Hurrican Research Division. NOAA
26. Shoemaker, Daniel N. Characteristics of Tropical Cyclones Affecting the Philippine Islands
27. <https://ecodelo.org>
28. Иванова Г.Ф. Анализ барических образований и атмосферных фронтов, Саратов, 2017
29. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

