



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование тропических циклонов с использованием спутниковой информации»

Исполнитель **Фомина Виталия Витальевна**
(фамилия, имя, отчество)

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

Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

«18» 06 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Теоретические и методические основы спутникового мониторинга тропических циклонов	6
1.1. Физические механизмы, внутреннее строение и жизненный цикл тропических циклонов.....	6
1.2. Тропические циклоны в северо-западной части Тихого океана	12
1.3. Тропические циклоны в северной части Атлантического океана	13
1.4. Спутниковые методы наблюдения за тропическими циклонами	15
1.5. Возможности портала EUMETrain и веб-инструмента ePort Pro	19
2 Методика исследования на базе платформы EUMETrain (ePort Pro)	25
2.1. Объекты исследования и критерии их выбора	25
2.1.1. Ураган «Эрин».....	27
2.1.2. Тайфун «Ногури»	30
2.2. Методика работы с аналитическим инструментом ePort	32
2.3. Критерии визуального сравнительного анализа структуры циклонов .	35
3 Анализ эволюции и структуры тропических циклонов на основе данных EUMETSAT, визуальной платформы ePort Pro	40
3.1. Эволюция облачных систем по данным геостационарных спутников .	40
3.1.1. Ураган «Эрин».....	40
3.1.2. Тайфун «Ногури»	60
3.2. Оценка синоптических условий и полей ветра по модельным данным ECMWF на платформе ePort Pro.....	73
3.3. Сравнительная таблица и обсуждение результатов.	74
Заключение.....	78
Список литературы.....	81

Введение

Тропические циклоны относятся к числу наиболее мощных и разрушительных природных явлений. В условиях наблюдаемого изменения климата, проявляющегося в том числе в повышении температуры поверхности океана, возрастает потребность в углублённом понимании механизмов формирования, эволюции и затухания этих вихревых систем. Поскольку тропические циклоны зарождаются и проводят большую часть своего жизненного цикла над океаническими акваториями, сеть наземных метеорологических наблюдений оказывается крайне разреженной, и основным, а зачастую и единственным источником информации об их состоянии становятся метеорологические спутники.

Среди имеющихся в открытом доступе образовательно-аналитических ресурсов, предназначенных для работы со спутниковой метеорологической информацией, особое место занимает портал EUMETrain, созданный Европейской организацией по эксплуатации метеорологических спутников EUMETSAT. Платформа предоставляет бесплатный доступ к архивам снимков геостационарных и полярно-орбитальных спутников, а также включает интерактивный веб-инструмент ePort, предназначенный для визуализации, анимации и комплексного анализа спутниковых данных совместно с полями численных моделей.

Объектом исследования являются тропические циклоны как атмосферные вихревые системы мезо- и синоптического масштаба.

Предметом исследования выступают особенности эволюции облачной структуры, внутренней организации и синоптического окружения тропических циклонов, выявляемые по спутниковым данным и модельным полям в среде ePort.

Целью настоящей дипломной работы является проведение сравнительного анализа жизненного цикла и структурных характеристик двух тропических циклонов, развивавшихся в различных океанических бассейнах

— Атлантическом и северо-западном Тихоокеанском, — с использованием спутниковых данных и аналитического инструмента ePort портала EUMETrain. Выбор двух разных бассейнов обусловлен необходимостью выявить влияние региональных особенностей, включая температуру поверхности океана, вертикальный сдвиг ветра и характеристики крупномасштабной циркуляции, на морфологию облачной системы, темпы интенсификации и особенности структурной организации тропических циклонов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Рассмотреть физические механизмы формирования, развития и разрушения тропических циклонов.
2. Проанализировать возможности платформы ePort Pro для спутникового мониторинга тропических циклонов.
3. Разработать воспроизводимую методику сравнительного анализа тропических циклонов по спутниковым данным и модельным полям.
4. Исследовать эволюцию урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури» на различных стадиях жизненного цикла.
5. Выполнить сравнительный анализ структурных характеристик исследуемых циклонов и факторов, определявших их эволюцию.

Структурно работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Первая глава охватывает физические основы формирования и развития тропических циклонов, обзор спутниковых методов наблюдения и возможностей платформы EUMETrain, включая описание инструмента ePort. Вторая глава посвящена методике исследования: обоснованию выбора циклонов, описанию процедур работы с ePort и разработке критериев сравнительного анализа. Третья глава содержит сравнительный анализ эволюции облачных систем, структуры циклонов, синоптических условий и полей ветра, а также обсуждение полученных результатов. В заключении сформулированы основные выводы исследования.

Научная новизна работы заключается в разработке и практическом применении воспроизводимой методики сравнительного анализа тропических циклонов, основанной исключительно на использовании открытых спутниковых данных и веб-инструмента ePort платформы EUMETrain. Предложенный подход реализует полный цикл анализа в единой браузерной среде и объединяет многоспектральную интерпретацию геостационарных спутниковых изображений, визуальный анализ структурных элементов циклона, оценку синоптического окружения по модельным полям ECMWF и систему унифицированных критериев сравнения. Новизна также заключается в адаптации данного подхода для сопоставления циклонов различных океанических бассейнов, что позволило выявить особенности влияния региональных условий на процессы интенсификации, структурную организацию и эволюцию тропических циклонов.

Практическая значимость работы состоит в разработке методического подхода, пригодного для использования в учебных курсах по спутниковой метеорологии, учебно-исследовательской деятельности и задачах сравнительного анализа тропических циклонов. Результаты исследования демонстрируют возможность выполнения комплексного спутникового анализа средствами исключительно браузерного инструментария без привлечения специализированного программного обеспечения.

1 Теоретические и методические основы спутникового мониторинга тропических циклонов

1.1. Физические механизмы, внутреннее строение и жизненный цикл тропических циклонов

Тропические циклоны представляют собой интенсивные вихревые атмосферные системы, формирующиеся над тёплыми водами тропических и субтропических океанов и характеризующиеся низким атмосферным давлением в центре, мощной конвективной облачностью и сильными ветрами. В отличие от внетропических циклонов, основной энергетический источник тропических циклонов связан с высвобождением скрытой теплоты конденсации, возникающей при фазовом переходе водяного пара, испарившегося с поверхности океана. Выделение скрытого тепла приводит к нагреванию атмосферного столба, снижению давления в центре системы и усилению циклонической циркуляции, формируя положительную обратную связь между океаном и атмосферой [5, 6].

Для возникновения и дальнейшего развития тропического циклона требуется одновременное выполнение нескольких условий. Температура поверхности океана должна превышать приблизительно $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубину не менее 50 м, обеспечивая достаточный поток тепла и влаги в пограничный слой атмосферы. Нижняя и средняя тропосфера должны характеризоваться высоким содержанием влаги, необходимым для поддержания глубокой конвекции и ограничения испарительного охлаждения внутри конвективных ячеек. Вертикальный сдвиг ветра — различие скорости и направления ветра между уровнями 850 и 200 гПа — должен оставаться слабым, чтобы конвективные башни сохраняли вертикальную организацию, а выделяющееся скрытое тепло концентрировалось в пределах циркуляции циклона. Дополнительными условиями являются наличие предсуществующего низкоширотного возмущения и достаточное влияние силы Кориолиса, что

обычно ограничивает образование тропических циклонов широтами выше 5° от экватора [6, 9, 16].

Совокупность перечисленных факторов определяет пространственную и сезонную неравномерность формирования тропических циклонов, а также различия их активности между отдельными океаническими бассейнами.

Структура зрелого тропического циклона обладает выраженной осесимметричной организацией с отчётливым центром циркуляции (Рис. 1.1). В самом центре располагается «глаз» бури — область диаметром от 20 до 60 километров, характеризующаяся слабыми ветрами, нисходящими движениями воздуха, пониженной облачностью и относительно тёплым ядром. Формирование глаза связано с перераспределением момента количества движения внутри интенсивного вихря, развитием нисходящих движений в центральной части циклона и адиабатическим нагреванием опускающегося воздуха. Глаз окружён «стеной глаза» — узким кольцеобразным поясом чрезвычайно мощных кучево-дождевых облаков, где регистрируются наиболее сильные устойчивые ветры, максимальные значения конвективных осадков и наибольшие вертикальные скорости. Стена глаза может претерпевать циклы замены: когда внешнее кольцо конвекции сжимается и замещает внутреннее, что приводит к временному ослаблению максимальных ветров с последующей повторной интенсификацией, часто с расширением поля ураганных ветров [5, 6].

Вне стены глаза располагаются спиральные дождевые полосы — закрученные конвективные структуры, по которым влажный воздух транспортируется внутрь системы. Эти полосы могут содержать мезомасштабные конвективные комплексы и местами вторичные максимумы ветра. Глубокая конвекция в спиральных полосах переносит влагу и момент количества движения, поддерживая энергетический баланс всей системы. В верхней тропосфере над зрелым циклоном формируется антициклонический отток, который эффективно рассеивает массу, поднятую в конвективных башнях, и способствует поддержанию низкого давления в центре. Тёплое ядро,

наиболее выраженное на уровнях 300–500 гПа, является ключевым диагностическим признаком тропического циклона и выявляется преимущественно по данным температурного зондирования, микроволновых наблюдений и косвенно по структуре облачной системы [5, 6, 11].

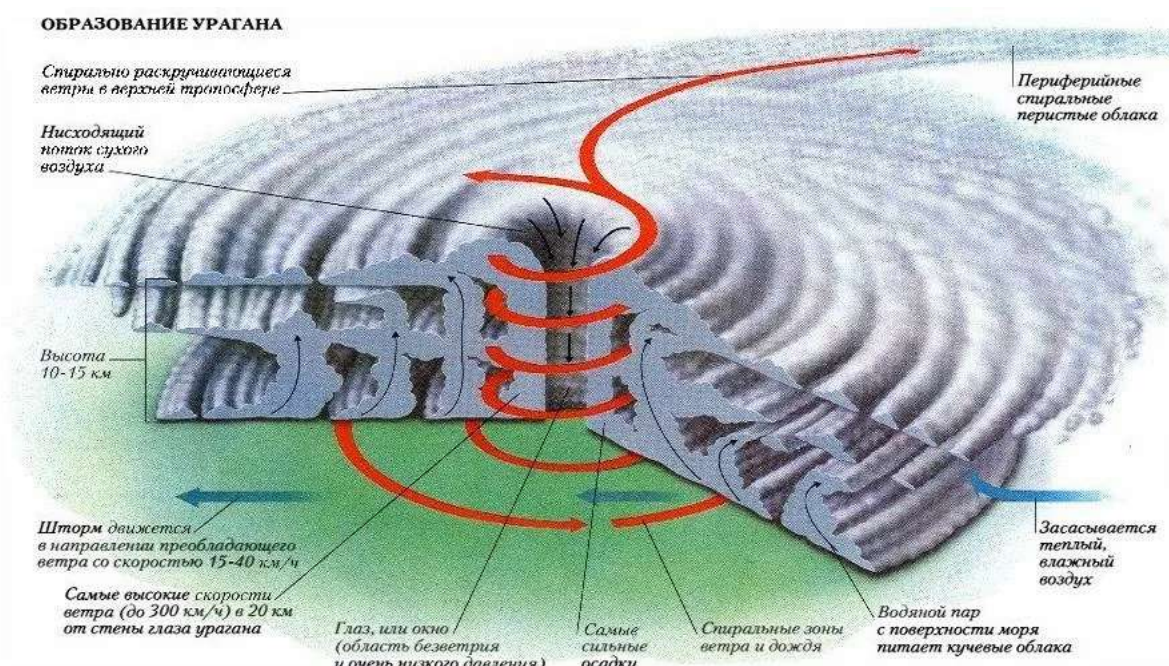


Рис. 1.1.1. Схема вертикального строения тропического циклона

Жизненный цикл тропического циклона принято разделять на несколько последовательных стадий, отражающих эволюцию его структурной организации и интенсивности (Рис. 1.2). Начальная стадия — тропическое возмущение — представляет собой область неупорядоченной конвекции с изобарической депрессией в несколько гектопаскалей и слабым приземным градиентом давления. Когда в возмущении формируется замкнутая циклоническая циркуляция и максимальный устойчивый ветер достигает 17 м/с, система классифицируется как тропическая депрессия; на этой стадии на спутниковых снимках часто наблюдается изогнутая полоса глубокой конвекции, но глаз отсутствует. Дальнейшее усиление до скорости ветра 18–32 м/с переводит систему в категорию тропического шторма, которому

присваивается собственное имя. На стадии тропического шторма конвекция приобретает более организованный вид, появляются спиральные полосы, и может начаться формирование центрального плотного облачного кластера [5, 6, 9].

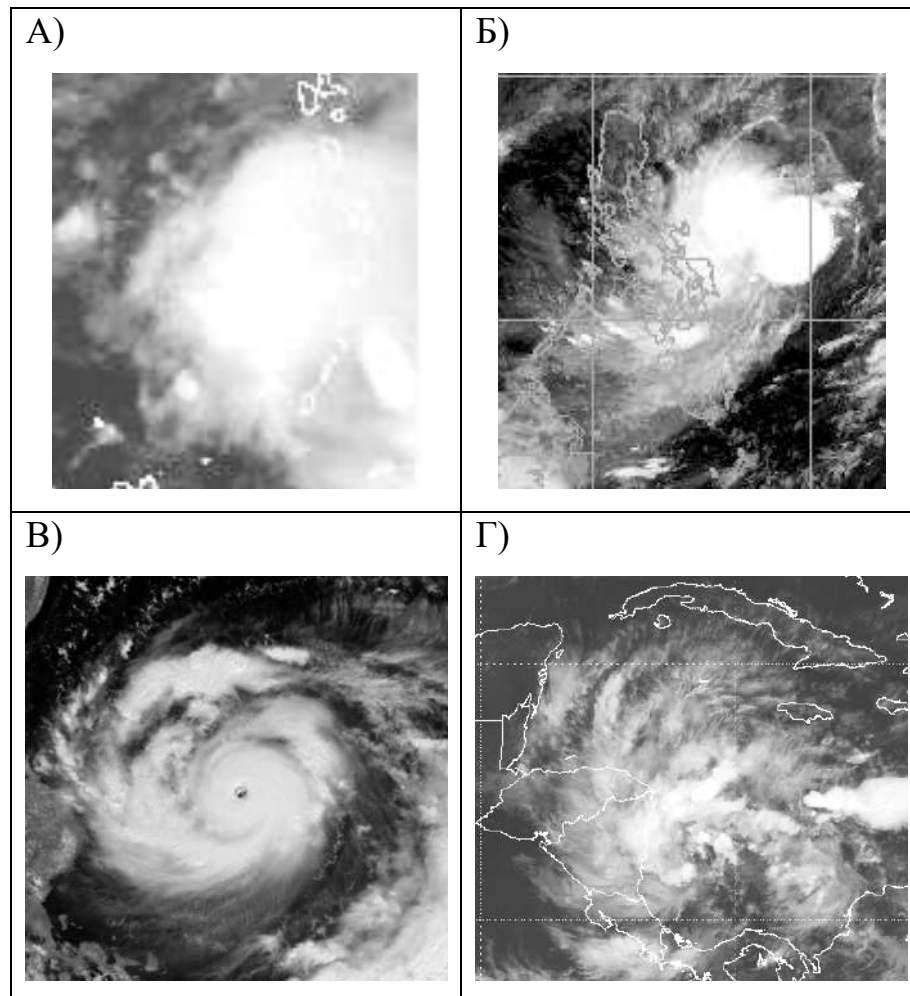


Рис. 1.1.2. Стадии развития тропического циклона: а) тропическая депрессия; б) тропический шторм; в) ураган; г) разрушающийся тропический циклон

Когда максимальный устойчивый ветер превышает порог 33 м/с, циклон достигает стадии урагана или тайфуна. В этой фазе на инфракрасных и видимых спутниковых изображениях уже может прослеживаться глаз, и структура становится отчётливо симметричной. Интенсивность ураганов подразделяется на пять категорий по шкале Саффира-Симпсона (Табл. 1.1),

основанной на оценке максимального устойчивого ветра и соответствующего потенциального ущерба. Категория 5 (ветер ≥ 70 м/с) — это система с катастрофическими повреждениями и давлением в центре, нередко опускающимся ниже 920 гПа. Наивысшая категория достигается лишь малой долей циклонов и обычно сохраняется непродолжительное время, сменяясь циклами замены стенки глаза или ослаблением под действием внешних факторов [5, 6].

Таблица 1.1.1 – Шкала Саффира – Симпсона

Категория	Скорость ветра, м/с (км/ч)
Тропические циклоны до ураганной силы	
Тропическая депрессия	0 – 17 (60)
Тропический шторм	17 – 33 (60 – 120)
Тропические циклоны ураганной силы	
Первая	33 – 43 (120 – 150)
Вторая	43 – 49 (150 – 180)
Третья	49 – 58 (180 – 210)
Четвертая	58 – 70 (210 – 250)
Пятая	≥ 70 (250)

Фаза максимальной интенсивности сменяется стадией ослабления и затухания. Ослабление может быть вызвано выходом на сушу, когда

прекращается поступление влаги и тепла с океанической поверхности и возрастает трение о подстилающую поверхность; перемещением над более холодными водами; ростом вертикального сдвига ветра, который разрушает тепловое ядро и нарушает локализацию конвекции. В ряде случаев тропический циклон претерпевает внетропический переход, взаимодействуя с бароклинными зонами средних широт. В ходе этого перехода система теряет симметричную структуру и тёплое ядро, её поле облачности вытягивается вдоль фронтальных границ, а энергоснабжение переключается на бароклинные механизмы. Пост-тропический циклон при этом может сохранять ветры штормовой силы и вызывать опасные морские явления даже на значительном удалении от места перехода [5, 6].

Описанные физические процессы непосредственно отражаются в спутниковых данных различных спектральных диапазонов. Формирование глаза, развитие симметричной конвекции, изменение температуры облачных вершин и перестройка структуры облачного щита являются признаками, которые могут быть идентифицированы по геостационарным спутниковым изображениям и использованы для оценки стадии развития и интенсивности тропического циклона. Поэтому понимание физической организации вихря является необходимым условием корректной интерпретации спутниковых наблюдений.

Таким образом, физика тропического циклона определяется взаимодействием океана и атмосферы через потоки скрытого и явного тепла, структура отражает организацию глубокой влажной конвекции в условиях быстро вращающегося вихря, а стадийность развития описывает последовательное усиление от слабого возмущения до катастрофического урагана с последующей деградацией. Понимание этих процессов необходимо для корректной интерпретации спутниковых данных и последующего сравнительного анализа конкретных циклонов в разных океанических бассейнах.

1.2. Тропические циклоны в северо-западной части Тихого океана

Северо-западная часть Тихого океана является наиболее активным регионом формирования тропических циклонов в мире. На данный бассейн приходится наибольшее количество тропических штормов и тайфунов по сравнению с другими океаническими регионами, что обусловлено сочетанием благоприятных океанических и атмосферных условий на обширной акватории [5].

Область формирования тропических циклонов охватывает значительную часть западной тропической зоны Тихого океана, включая районы к востоку от Филиппин, акватории Филиппинского моря, Южно-Китайского моря и прилегающие области экваториальной зоны. В среднем ежегодно здесь формируется около 25–30 тропических циклонов различной интенсивности, значительная часть которых достигает стадии тайфунов [18].

В отличие от Атлантического бассейна, сезонность тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана выражена менее чётко. Формирование циклонов возможно практически в течение всего года, однако максимальная активность обычно наблюдается с июля по октябрь. Ослабленная сезонность связана с устойчиво высокими температурами поверхности океана и благоприятными условиями циркуляции атмосферы на протяжении большей части года.

Высокая циклоническая активность региона определяется сочетанием нескольких факторов. Одним из важнейших является повышенная температура поверхности океана, которая на значительных площадях превышает пороговые значения, необходимые для поддержания интенсивной конвекции. Дополнительную роль играет высокая влажность тропосферы, наличие обширной зоны конвергенции и сравнительно слабый вертикальный сдвиг ветра в периоды активного циклогенеза [5, 6].

Важной особенностью бассейна является влияние муссонной циркуляции и муссонной впадины, создающих благоприятные условия для

формирования начальных возмущений. Многие тропические циклоны северо-западной части Тихого океана развиваются внутри протяжённых областей пониженного давления и могут испытывать сложные процессы взаимодействия с окружающими синоптическими структурами [5, 7].

Тропические циклоны данного бассейна характеризуются значительным разнообразием траекторий движения и высокой способностью к быстрой интенсификации. Наличие обширных акваторий с высокими значениями температуры поверхности океана способствует продолжительному сохранению энергетической подпитки, что нередко приводит к развитию мощных тайфунов с хорошо организованной структурой глаза и интенсивной конвекцией.

Дополнительное влияние на межгодовую изменчивость активности оказывает крупномасштабная изменчивость системы океан–атмосфера, включая явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья, способные изменять пространственное распределение районов циклогенеза, траектории движения и интенсивность тропических циклонов [5, 11].

Для анализа особенностей развития циклонов северо-западной части Тихого океана в данной работе рассматривается тайфун Ногури, представляющий интерес как пример интенсивного тропического циклона, проходившего стадии быстрого усиления, формирования выраженной глазной структуры и последующей трансформации под воздействием изменяющихся условий окружающей среды. Исследование его эволюции позволяет выявить особенности функционирования тропических циклонов в условиях наиболее активного циклогенетического бассейна планеты и провести дальнейшее сравнение с циклоном Атлантического бассейна.

1.3. Тропические циклоны в северной части Атлантического океана

Северная часть Атлантического океана является одним из наиболее изученных районов формирования и развития тропических циклонов.

Атлантический бассейн включает области зарождения циклонов в тропической зоне восточной Атлантики, акватории Карибского моря, Мексиканского залива и западной части Атлантического океана. Ежегодно в регионе формируется в среднем от 10 до 20 именованных штормов, часть из которых достигает стадии ураганов различной интенсивности [21].

Формирование тропических циклонов в Атлантическом бассейне тесно связано с сезонными изменениями океанических и атмосферных условий. Официальный сезон атлантических ураганов продолжается с 1 июня по 30 ноября, при этом максимум активности обычно наблюдается в период с августа по октябрь. Такая сезонность обусловлена достижением максимальных значений температуры поверхности океана, повышением влагосодержания атмосферы и уменьшением вертикального сдвига ветра.

Основной областью зарождения наиболее интенсивных атлантических циклонов является восточная часть тропической Атлантики, где важную роль играют африканские восточные волны. Эти атмосферные возмущения формируются над территорией Западной Африки и, перемещаясь над тёплыми водами океана, могут становиться начальными возмущениями для последующего циклогенеза [5, 21].

Развитие тропических циклонов в Атлантическом бассейне определяется взаимодействием нескольких факторов: температуры поверхности океана, вертикального распределения ветра, содержания влаги в атмосфере и особенностей крупномасштабной циркуляции. Температура поверхности воды выше 26–27 °C обеспечивает необходимый поток скрытого тепла, поддерживающий развитие конвекции и интенсификацию циклона. Одновременно сильный вертикальный сдвиг ветра способен нарушать вертикальную структуру вихря и препятствовать его дальнейшему усилению [5, 6, 11].

Характерной особенностью атлантических циклонов является высокая изменчивость траекторий движения и интенсивности, обусловленная взаимодействием с субтропическим антициклоном, струйными течениями и

процессами взаимодействия с сушей. Проходя над островами Карибского бассейна, акваторией Мексиканского залива или восточным побережьем Северной Америки, циклоны нередко испытывают существенные изменения структуры и интенсивности [16, 21].

Для исследования особенностей развития тропических циклонов Атлантического бассейна в данной работе рассматривается ураган Эрин, эволюция которого позволяет проследить процессы формирования организованной облачной структуры, изменения интенсивности и особенности взаимодействия циклона с окружающей атмосферной средой. Анализ данного циклона представляет интерес как пример развития тропической системы в условиях Атлантического бассейна и служит основой для последующего межбассейнового сравнения.

1.4. Спутниковые методы наблюдения за тропическими циклонами

Спутниковые методы наблюдения являются основным источником информации о тропических циклонах на всех стадиях их развития, поскольку подавляющая часть жизненного цикла этих систем проходит над обширными океаническими акваториями, где сеть наземных метеорологических станций практически отсутствует, а судовые и буйковые измерения носят точечный характер [1–4]. Современные метеорологические спутники оснащаются многоканальными сканирующими радиометрами, работающими в различных участках электромагнитного спектра — от видимого до микроволнового диапазона. Каждый из этих спектральных каналов несёт специфическую информацию о структуре, термодинамическом состоянии и динамических характеристиках циклона, и их совместное использование позволяет составить объёмное представление об эволюции тропической системы. Платформа EUMETrain и, в частности, её интерактивные инструменты визуализации предоставляют оперативный и архивный доступ к данным геостационарных спутников Meteosat, так и с других геостационарных платформ —

американской GOES-E, обслуживающей Атлантический регион, и японской Himawari, покрывающей западную часть Тихого океана. Это даёт возможность проводить многоспектральный анализ в рамках одного программного окружения, адаптируя набор используемых каналов и RGB-композигов под доступные продукты каждого спутника [14, 15].

Видимый диапазон спектра (VIS), охватывающий длины волн приблизительно от 0,4 до 1,1 мкм, регистрирует отражённую от земной поверхности и облачных образований солнечную радиацию. На снимках видимого канала высока отражательная способность водяных капель и кристаллов льда, поэтому облачные массивы выглядят светлыми, а безоблачная поверхность океана — тёмной. Это позволяет с высокой детализацией изучать мезомасштабную структуру облачного покрова тропических циклонов: текстуру и размер центрального плотного облачного кластера, степень закрытия глаза низкими облаками, конфигурацию спиральных полос и особенности конвективных ячеек в стенке глаза. Видимые изображения особенно ценны для анализа на стадиях тропического возмущения и тропической депрессии, когда глаз ещё не выражен в инфракрасном канале, но в видимом диапазоне прослеживается начальная кривизна полос низкой облачности, указывающая на формирование замкнутой циркуляции. Основным ограничением видимого канала является его зависимость от солнечного освещения: ночью получение данных невозможно, а в сумеречных зонах угол солнца создаёт неравномерную освещённость, что усложняет автоматический анализ [1, 2, 8].

Инфракрасный диапазон (IR), в частности атмосферное окно в области длин волн около 10–12,5 мкм, даёт информацию о температуре излучающей поверхности — облачных вершин или океана, — основываясь на регистрируемом уходящем тепловом излучении. Поскольку температура в тропосфере понижается с высотой, облака с более холодными вершинами отождествляются с более мощной вертикальной конвекцией. Перевод измеренной радиации в яркостную температуру позволяет количественно

оценить высоту верхней границы облаков, а области с температурой ниже минус 70–80 °С интерпретируются как глубокие конвективные кластеры, в которых формируются интенсивные осадки и происходит выделение основной энергии циклона. Инфракрасные снимки доступны в круглосуточном режиме, что делает их главным инструментом оперативного мониторинга и основой для объективных методик оценки интенсивности, таких как техника Дворжака, где по паттернам облачности IR и VIS оценивают текущую и прогностическую силу тропического циклона [10, 22]. Чувствительность инфракрасного канала ограничена наличием перистой облачности верхнего яруса, которая может маскировать нижележащие конвективные структуры и истинное положение центра циркуляции, особенно на стадиях сдвиговой деформации. В практическом плане для выделения наиболее холодных вершин часто применяются усиленные версии инфракрасных каналов (enhanced IR), которые доступны для всех упомянутых спутниковых платформ [2, 15].

Канал водяного пара (WV), центрированный в полосе поглощения водяного пара примерно на длине волны 6,2 мкм, измеряет излучение, исходящее не от поверхности, а из слоя средней и верхней тропосферы (приблизительно 300–600 гПа), где концентрация водяного пара как парникового газа достаточно высока для поглощения и переизлучения. Получаемые изображения показывают распределение влажности в этом слое: тёмные области соответствуют сухому воздуху и опускающим движениям, светлые — влажным восходящим потокам и высокой концентрации пара. Для анализа тропических циклонов канал водяного пара незаменим при изучении крупномасштабного окружения: он выявляет области сухого воздуха, вторжение которого может подавлять конвекцию и ослаблять систему, показывает структуру оттока в верхней тропосфере, положение струйных течений и взаимодействие циклона со среднеширотными ложбинами. Кроме того, WV-изображения позволяют проследить эволюцию теплового ядра опосредованно — через распределение влажного и сухого воздуха вокруг центра, и часто используются для раннего обнаружения начала

внетропического перехода, когда симметричная влажная область сменяется асимметричной запятовидной формой [2, 8].

Микроволновый диапазон, охватывающий длины волн от нескольких миллиметров до десятков сантиметров, открывает уникальные возможности для зондирования тропических циклонов, недоступные оптическим и инфракрасным сенсорам. Микроволновое излучение слабо взаимодействует с мелкими облачными каплями и кристаллами льда в перистых облаках, поэтому микроволновые радиометры способны видеть сквозь плотный облачный покров и получать информацию о нижележащих слоях атмосферы и поверхности океана. Приборы, такие как AMSU и MHS на спутниках Metop, работают в нескольких десятках каналов, охватывающих линии поглощения кислорода (вблизи 50–60 ГГц для температурного зондирования) и водяного пара (183 ГГц для профиля влажности), а также каналы в окнах прозрачности (например, 89 ГГц). Зондирование в кислородной полосе позволяет восстановить вертикальный профиль температуры, что даёт возможность уверенно идентифицировать тёплое ядро тропического циклона. Каналы высокой частоты чувствительны к рассеянию на крупных частицах льда, поэтому области глубокой конвекции проявляются как резкие минимумы яркостной температуры, позволяя оконтурить стену глаза и интенсивные спиральные полосы даже под слоем плотной перистой облачности. Данные полярно-орбитальных спутников особенно ценны для анализа внутренней структуры циклона, однако в оперативной практике часто дополняются или заменяются косвенными оценками, получаемыми по геостационарным многоканальным композитам и модельным полям, что и было реализовано в настоящей работе [2, 4, 13].

Комплексное использование всех перечисленных спектральных диапазонов составляет методическую основу спутникового мониторинга тропических циклонов. Видимые изображения обеспечивают распознавание тонкой текстуры облаков в дневное время; инфракрасный канал даёт непрерывную во времени информацию о температуре облаков и высоте

конвективных систем; канал водяного пара раскрывает синоптический контекст и влажностные взаимодействия; микроволновое зондирование и скаттерометрия при наличии доступа предоставляют прямые данные о тепловом ядре и приземном ветре. В рамках данной работы непосредственный доступ к микроволновым продуктам полярно-орбитальных спутников через веб-интерфейс для исследуемых регионов и периода оказался ограничен, поэтому анализ опирался главным образом на геостационарные снимки высокого разрешения, RGB-композиции и модельные поля.

1.5. Возможности портала EUMETTrain и веб-инструмента ePort Pro

Проект EUMETTrain (EUMETSAT International Training Project) представляет собой крупнейшую международную образовательную инициативу Европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT), реализуемую при участии национальных метеорологических служб Австрии, Хорватии, Финляндии, Германии, Португалии и Венгрии. Ключевой целью проекта является создание, поддержка и распространение учебно-методических материалов по спутниковой метеорологии, а также организация систематического обучения специалистов, способствующего эффективному применению спутниковых данных как самостоятельно, так и в комплексе с данными наземных наблюдений и численного моделирования [12, 13].

Образовательный потенциал портала EUMETTrain.org реализуется через структурированную коллекцию ресурсов, которая включает руководства по спутниковым продуктам (product tutorials), тематические исследования конкретных метеорологических ситуаций (case studies), интерактивные симуляторы, учебные модули и полноценные дистанционные курсы. Все учебные материалы разрабатываются с учётом стандартов и профессиональных компетенций, определённых Всемирной метеорологической организацией (WMO), что обеспечивает их

международное признание и соответствие современным требованиям оперативной метеорологии. На базе EUMeTrain на регулярной основе проводятся онлайн- и очные мероприятия, в том числе курсы по синоптическому и мезомасштабному анализу, морской метеорологии, а также тематические недели (Event Weeks), в рамках которых эксперты из разных стран обсуждают актуальные метеорологические явления и демонстрируют передовые методы их анализа. Для обучающегося или исследователя, выполняющего дипломную работу, особую ценность представляют модули, посвящённые интерпретации спутниковых изображений, идентификации мезомасштабных конвективных систем и оценке интенсивности тропических циклонов, поскольку они формируют теоретическую базу, необходимую для корректного визуального дешифрирования данных [15].

Аналитическим ядром портала выступает веб-инструмент ePort, который представляет собой интерактивное приложение, предназначенное для визуализации и комплексного совмещения спутниковых снимков, производных спутниковых продуктов и полей численных моделей погоды. В соответствии с официальным описанием, ePort позиционируется как «отличный учебный инструмент, предназначенный в первую очередь для преподавателей в области метеорологии», однако его функциональные возможности выходят за рамки чисто демонстрационных задач и позволяют выполнять полноценный научный анализ метеорологических объектов. Инструмент тесно интегрирован в порталную среду и не требует установки дополнительного программного обеспечения: вся работа ведётся через стандартный веб-браузер, что существенно снижает порог вхождения для пользователя и делает его доступным в условиях ограниченных вычислительных ресурсов [14].

С точки зрения информационного охвата ePort предоставляет доступ к оперативным и архивным данным нескольких геостационарных спутниковых платформ: GOES East (обслуживает Атлантический регион и восточную часть Тихого океана), GOES West, Himawari (западная часть Тихого океана), IODC

(регион Индийского океана), а также к данным европейской геостационарной системы Meteosat (MSG и перспективной MTG). Кроме того, поддерживаются данные полярно-орбитальных спутников MetOp, хотя доступность конкретных продуктов зависит от выбранного региона и временного интервала. В рамках данной работы основными источниками геостационарной информации служили спутники GOES-E (для атлантического циклона «Эрин») и Himawari (для тихоокеанского тайфуна «Ногури»). Архив снимков в интерфейсе ePort доступен с дискретностью в три часа, что является достаточным для отслеживания ключевых стадий эволюции тропического циклона, включая фазу взрывной интенсификации, продолжительность которой составляет, как правило, от 12 до 24 часов [14, 15].

Инструмент ePort поддерживает одновременное отображение нескольких спектральных каналов и RGB-композиций. В распоряжении пользователя находятся видимые каналы (VIS 0.64 μm , 0.86 μm и аналоги), усиленные инфракрасные каналы (IR enhanced, например 10.3 μm для GOES-E и 10.4 μm для Himawari), каналы водяного пара (WV 6.2 μm , 7.3 μm) и широкий набор стандартных RGB-продуктов: Convection RGB, Severe Storms RGB, Airmass RGB, Natural Colors RGB и другие. Каждый из перечисленных слоёв предоставляет специфическую информацию об облачной системе. Возможность комбинирования слоёв в одном окне позволяет создавать композитные изображения, на которых одновременно отображаются, например, усиленный инфракрасный сигнал и поле приземного давления, что даёт возможность анализировать положение центра циклона относительно барических образований. Прозрачность слоёв регулируется, что обеспечивает гибкость при визуальном сопоставлении.

Важнейшей функцией ePort, широко использованной в данной работе, является режим анимации. Пользователь может задать временной интервал и шаг по времени, после чего система генерирует последовательность кадров, воспроизводимую с регулируемой скоростью (в настоящем исследовании применялась скорость 5–10 кадров в секунду). Анимация позволяет в

динамике проследить эволюцию облачных структур: замыкание кольца глубокой конвекции вокруг формирующегося глаза, циклы замены стенки глаза, смещение конвективных кластеров под действием сдвига ветра, вытягивание облачного щита при внетропическом переходе. Для подготовки иллюстративного материала анимационные визуализации были преобразованы в набор статических изображений, отражающих ключевые этапы развития обоих исследуемых циклонов.

Интерактивность ePort не ограничивается только визуализацией. Встроенные модули Meteorograms (метеограммы), Profiles (вертикальные профили), Charts (диаграммы) и Reports (отчёты) расширяют спектр аналитических операций. Функция Measure (измерения) позволяет вручную определять расстояния и углы непосредственно на снимке, что применялось для оценки диаметра глаза циклона и расстояния между центром низкоуровневой циркуляции и центром облачного купола. Совокупность этих модулей превращает ePort из простого просмотрщика изображений в среду для многоаспектного анализа, способную конкурировать с настольными ГИС-пакетами в задачах учебно-исследовательского уровня.

Методика наложения слоёв численных моделей погоды, реализованная в ePort, стала ключевой для оценки крупномасштабных факторов, управлявших эволюцией циклонов. Для каждого из исследуемых вихрей формировались композитные карты, совмещающие спутниковый канал (как правило, усиленный инфракрасный или RGB Airmass) с полями среднего давления на уровне моря (Mean Sea Level Pressure), геопотенциальной высоты на изобарических поверхностях 500 и 250 гПа (Geopotential Height 500 hPa, 250 hPa) и векторами ветра на различных уровнях (Wind, Wind Barbs). С помощью таких композиций были проанализированы траектории циклонов относительно управляющих потоков, оценено влияние субтропических антициклонов и среднеширотных ложбин на рекурвацию, а также зафиксированы моменты начала взаимодействия с бароклинной зоной.

Дополнительно использовалось поле температуры поверхности океана (Sea Surface Temperature), доступное в виде модельного слоя [12].

Существенным ограничением ePort, выявившимся в ходе выполнения работы, является неполнота покрытия для некоторых специализированных продуктов. Данные скаттерометра ASCAT Sea Winds за август–сентябрь 2025 года в интерфейсе ePort отсутствовали, а продукты Cloud Top Height, Instantaneous Precipitation и Accumulated Precipitation физически отображались только для европейского сектора Meteosat. В этих условиях анализ полей ветра был выполнен по модельным слоям Wind и Wind Barbs, а оценка высоты облаков и интенсивности осадков — косвенным путём, по яркостной температуре усиленных инфракрасных каналов и сигнатуре RGB-композиций конвекции. Как показано в методической литературе, такой подход является общепринятым и достаточно надёжным для сравнительного анализа тропических циклонов. Тем не менее, отсутствие прямых микроволновых и скаттерометрических данных следует рассматривать как объективное ограничение, накладываемое доступным инструментарием, и оно было учтено при формулировании выводов.

Таким образом, образовательная платформа EUMETrain.org и её аналитический веб-инструмент ePort формируют единую экосистему, в которой теоретическая подготовка, осуществляемая через учебные модули EUMeTrain, непосредственно сопрягается с практическим анализом спутниковых данных в реальном или архивном режиме. В настоящей дипломной работе портал EUMETrain выступил одновременно и как источник методических знаний, и как основной инструмент для многоспектрального исследования эволюции урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури». Применение именно веб-ориентированного инструмента, не требующего инсталляции специализированного ПО и обеспечивающего унифицированный доступ к данным различных спутниковых платформ, сделало возможным проведение полностью воспроизводимого сравнительного анализа в рамках ограниченных

временных и технических ресурсов, что подтверждает практическую ценность портала для учебно-исследовательских задач.

В настоящей работе из всех рассмотренных выше способов спутникового зондирования на практике применялись исключительно данные геостационарных спутников в каналах видимого, инфракрасного и водяного пара, а также стандартные RGB-композиции на их основе. Поля ветра, температуры поверхности океана и геопотенциала анализировались по модельным данным ECMWF, визуализированным непосредственно в среде ePort Pro. Микроволновое зондирование и скаттерометрические продукты (ASCAT, AMSU и аналогичные) не использовались, поскольку для выбранных региона и периода они отсутствовали в интерфейсе ePort Pro. Таким образом, весь сравнительный анализ выполнен в едином инструментальном контуре, без привлечения внешних источников полярно-орбитальной информации.

2 Методика исследования на базе платформы EUMETrain (ePort Pro)

2.1. Объекты исследования и критерии их выбора

Для настоящего сравнительного исследования были отобраны два тропических циклона, развивавшиеся в 2025 году в Атлантическом и северо-западном Тихоокеанском бассейнах: ураган Эрин и тайфун Ногури. Выбор именно этих систем обоснован несколькими соображениями, позволяющими обеспечить методическую корректность сравнения и выявить влияние региональных факторов на эволюцию и внутреннее строение вихрей. Прежде всего, оба циклона относятся к одному сезону активности, что даёт возможность рассматривать их на фоне общего крупномасштабного состояния климатической системы и минимизирует влияние межгодовой изменчивости. Оба вихря зародились в типичных для своих бассейнов районах: Эрин возник из африканской восточной волны над центральной Атлантикой, Ногури сформировался из области глубокой конвекции в западной части Тихого океана вблизи острова Уэйк [17, 21]. Это позволяет сопоставить начальные механизмы циклогенеза в разных географических и циркуляционных условиях.

Принципиально важно, что и Эрин, и Ногури продемонстрировали эпизоды чрезвычайно быстрой интенсификации, достигнув высших категорий по шкале Саффира – Симпсона, а именно пятой и четвёртой соответственно. Такая высокая интенсивность делает их репрезентативными примерами мощных тропических циклонов с ярко выраженной внутренней структурой, включающей хорошо оформленный глаз, стену глаза, спиральные полосы и антициклонический отток. Эти элементы детально различимы на спутниковых снимках, что принципиально для последующего многоспектрального анализа. Вместе с тем региональные различия между бассейнами проявляются в термическом потенциале океана, типичных полях вертикального сдвига ветра и характеристиках крупномасштабной циркуляции, влияющих на траекторию

и продолжительность жизни циклонов. Атлантический бассейн в районе развития Эрина характеризовался аномально высокими температурами поверхности океана, но одновременно присутствием слоёв сухого воздуха сахарского происхождения, которые временно сдерживали начальное усиление. Северо-западная часть Тихого океана, напротив, отличается наиболее обширным тёплым бассейном и, как правило, более слабым сдвигом ветра в сезон тайфунов. Эти условия способствовали стремительному усилению Ногури и его способности к повторной интенсификации в аномально высоких широтах. Таким образом, сопоставление двух циклонов позволяет проследить, как региональный фон трансформирует типовую схему жизненного цикла интенсивного вихря.

Дополнительным критерием выбора послужила траекторная эволюция: оба циклона прошли через стадию рекурвирования и последующего внетропического перехода. Это открывает возможность сравнить признаки разрушения тёплого ядра и асимметризации облачной системы в разных синоптических контекстах. Немаловажно и то, что оба вихря провели практически весь жизненный цикл над открытым океаном, не испытывая прямого и продолжительного влияния суши. Их ослабление определялось прежде всего внутренней динамикой и крупномасштабным окружением, а не трением о подстилающую поверхность, что делает сравнительный анализ более чистым с физической точки зрения. С методической стороны выбор Эрин и Ногури продиктован доступностью полного архива геостационарных спутниковых данных (GOES-E, Himawari) и модельных полей ECMWF, визуализированных в ePort Pro за соответствующий период, а также наличием подробных аналитических сводок региональных метеорологических центров, верифицирующих спутниковые оценки интенсивности.

2.1.1. Ураган «Эрин»

Тропический циклон «Эрин» был крупным и долгоживущим ураганом, который достиг пятой категории по шкале Саффира-Симпсона. Он двигался по длинной параболической траектории вокруг северной части Атлантического океана (Рис. 2.1.1.1) [21].

Циклон зародился из африканской восточной волны, которая вышла в Атлантический океан с побережья Африки 8 августа 2025 года. Пройдя над островами Кабо-Верде, система достаточно консолидировалась, и 11 августа Национальный центр ураганов (NHC) классифицировал её как тропическая депрессия Эрин, пятый в сезоне. В этот момент центр циклона находился в центральной части тропической Атлантики, примерно в 3700 км к востоку от северных Подветренных островов. В течение нескольких дней, несмотря на наличие обширной открытой акватории, Эрин оставался слабым тропическим штормом. Его усиление сдерживалось низкими температурами поверхности океана и вторжением сухого воздуха, которые препятствовали глубокой конвекции. Перемещаясь в западном направлении со скоростью около 280 километров в час, 14 августа шторм достиг точки с координатами 16.6° с.ш. и 50.4° з.д., где его максимальный устойчивый ветер оценивался в 90 км/ч, а минимальное центральное давление составляло 998 гПа. К вечеру того же дня, по мере продвижения в зону с более высокими температурами воды, интенсивность ветра возросла до 112 километров в час, что ознаменовало начало фазы его стремительного усиления [21].

Ключевой фазой в жизни урагана стал период с 15 по 16 августа. Утром 15 августа Эрин достиг статуса урагана 1-й категории, а его максимальный устойчивый ветер составлял 120 километров в час. Центр циклона находился примерно в 740 километрах к востоку от северных Подветренных островов. Далее, в течение последующих 24–25 часов, произошла взрывная интенсификация. Скорость ветра увеличилась приблизительно до 136 километров в час, что позволило урагану последовательно преодолеть все

промежуточные категории. Уже к 12 по восточному поясному времени (17 часов по UTC) 16 августа Эрин официально достиг пятой, высшей категории. Пик интенсивности циклона был зафиксирован в координатах вблизи северных Подветренных островов, когда его центр располагался примерно в 150 милях к северо-востоку от острова Ангилья. В этот момент максимальный устойчивый ветер в течение 1 минуты достиг 260 км/ч, а центральное давление упало до минимального за всю историю наблюдений за циклоном значения в 913 гПа. Согласно данным NHC, микроволновый радиометр GMI и двухчастотный осадочный радар DPR спутника GPM Core Observatory зафиксировали кольцо интенсивных осадков и мощные конвективные башни высотой более 10 км, в которых выделялось огромное количество скрытой теплоты [21].

После прохождения точки максимальной интенсивности ураган, подвергшись циклу замены стенок глаза, временно ослабел до 3-й категории, но затем вновь усилился до 4-й, расширившись в размерах. Его траектория стала меняться под влиянием крупномасштабных процессов в атмосфере. Следуя по классической параболической траектории, характерной для рекурвирующих (поворачивающих) циклонов, Эрин двигался в западном-северо-западном направлении, огибая западную периферию субтропического антициклона. Утром 18 августа центр урагана находился к северо-востоку от юго-восточных Багамских островов (22.8° с.ш., 70.2° з.д.), минимальное давление в центре поднялось до 945 гПа, а скорость ветра составляла 213 км/ч [20]. Проходя между восточным побережьем США и Бермудскими островами, циклон начал разворачиваться на север, а затем и на северо-восток, ускоряясь в среднеширотном западном потоке. Взаимодействуя с бароклинной зоной, 22 августа 2025 года ураган Эрин утратил характеристики тропической системы и трансформировался в мощный внетропический циклон. В этот момент его центр находился в точке с координатами примерно 40.0° с.ш., 59.7° з.д., он двигался на восток-северо-восток со скоростью 61 км/ч, минимальное центральное давление составляло 957 гПа, а максимальный устойчивый ветер

— около 145 км/ч. Несмотря на потерю тропических свойств, система оставалась очень обширным и мощным штормом, вызывавшим опасные для жизни прибойные волны и отбойные течения на большей части атлантического побережья США и Канады на протяжении ещё нескольких дней. Окончательно циклон рассеялся 23 августа [21].

Жизненный цикл урагана Эрин характеризовался экстремально быстрым переходом от слабого тропического шторма до урагана 5-й категории, что было обусловлено уникально благоприятными термодинамическими условиями, включая аномально тёплую воду, слабый вертикальный сдвиг ветра и эффективный отток в верхней тропосфере.

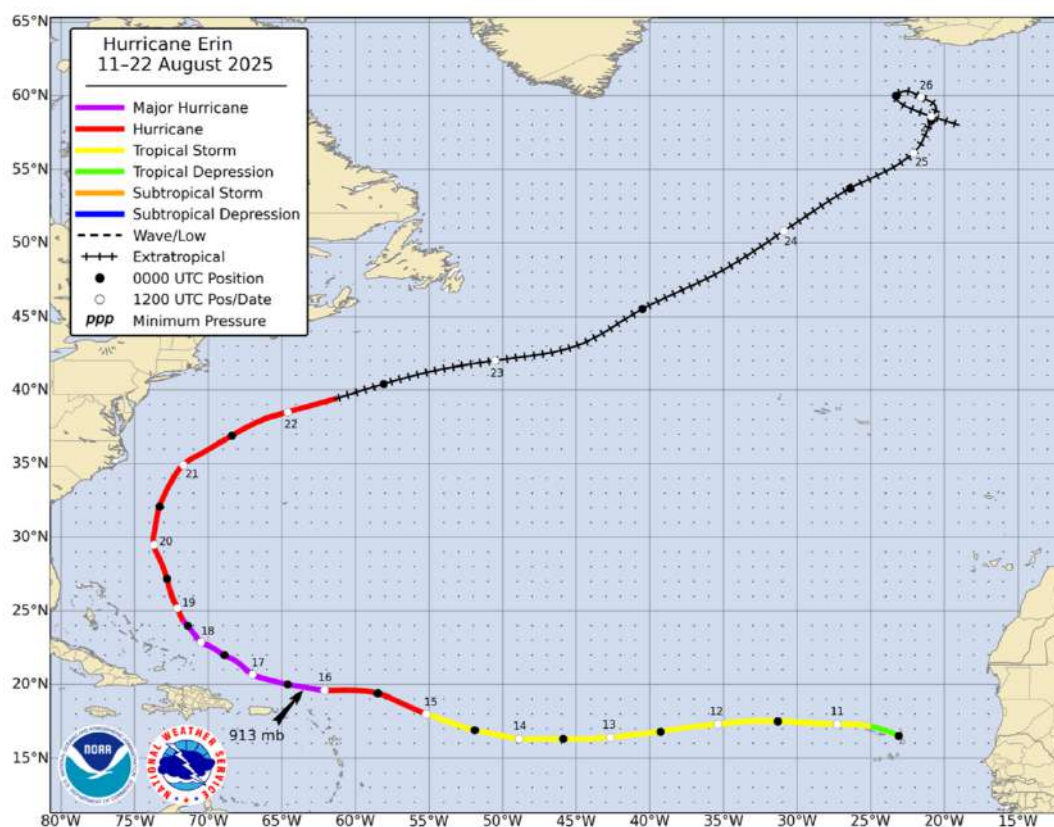


Рис. 2.1.1.1. Траектория движения урагана «Эрин» (по данным ННС)

2.1.2. Тайфун «Ногури»

Тропический циклон Ногури (Neoguri), международное обозначение 2519, JTWC-обозначение 25W) функционировал в северо-западной части Тихого океана в период с 18 по 29 сентября 2025 года и являлся девятнадцатым поименованным штормом в сезоне тихоокеанских тайфунов этого года. Циклон зародился из области глубокой конвекции, которая начала консолидироваться в тропическую депрессию приблизительно в 2650 км к востоку-юго-востоку от Токио, вблизи острова Уэйк. По данным Японского метеорологического агентства (JMA), формирование тропического шторма было зафиксировано 18 сентября в 15 по японскому стандартному времени, когда центр системы находился в точке с координатами $23,6^{\circ}$ с.ш. и $163,5^{\circ}$ в.д., а минимальное давление в центре составляло 995 гПа при максимальном устойчивом ветре около 18 м/с [17].

В течение последующих полутора-двух суток Ногури перемещался в западно-северо-западном направлении со скоростью, варьировавшейся от 20 до 24 км/ч, под воздействием западной периферии субтропического антициклона. Условия окружающей среды — аномально высокие температуры поверхности океана ($29\text{--}30^{\circ}\text{C}$), незначительный вертикальный сдвиг ветра и эффективный отток в верхней тропосфере — оказались исключительно благоприятными для быстрой интенсификации. Уже к 19 сентября система достигла стадии сильного тропического шторма, а 20 сентября перешла в категорию тайфуна. Днём 20 сентября минимальное давление в центре упало до 970 гПа, а максимальный устойчивый ветер достиг 98 миль в час (около 157 км/ч) по 1-минутной оценке JTWC, что соответствовало второй категории по шкале Саффира-Симпсона. Однако наиболее взрывное усиление произошло в ночь на 21 сентября, когда за 12 часов давление снизилось с 937 гПа до 936 гПа, а скорость ветра возросла до 144 миль в час (приблизительно 232 км/ч), что перевело циклон в четвёртую категорию. В утренние часы 21 сентября Ногури достиг пиковой интенсивности: по данным JMA, минимальное

центральное давление составило 920 гПа, максимальная мгновенная скорость ветра достигала 270 км/ч при 10-минутном устойчивом ветре около 195 км/ч, а JTWC присвоил циклону категорию 4 (125 узлов, примерно 230 км/ч с минутным осреднением). В тот момент центр циклона располагался в точке 27,7° с.ш., 151,8° в.д., примерно в 1500 км к востоку от побережья Японии [17].

После достижения максимальной интенсивности траектория Ногури претерпела характерную для рекурвирующих тайфунов эволюцию. Под влиянием приближающейся среднеширотной ложбины циклон замедлил поступательное движение и, начиная с 22 сентября, начал поворачивать на север, а затем на северо-восток, описывая антициклоническую дугу. В ходе поворота он подвергся циклу замены стенки глаза, что привело к временному ослаблению: к исходу суток 22 сентября давление повысилось до 963 гПа, а скорость ветра снизилась до 104 миль в час. Тем не менее, смещаясь в некогда умеренные широты над водами с температурой, остававшейся достаточно высокой для поддержания тропической конвекции, Ногури продемонстрировал редкую способность к повторной интенсификации в аномально высоких широтах. К 28 сентября, находясь в районе с координатами 38° с.ш., 167° в.д., циклон вновь усилился до 127 миль в час и давления 947 гПа, достигнув вторичного пика и став одним из самых мощных тропических циклонов, зарегистрированных вблизи 40-й параллели. В этот период система двигалась на северо-восток со скоростью, возраставшей до 65 км/ч, по мере её захвата среднеширотным западно-восточным переносом [17].

Заключительная стадия жизненного цикла Ногури была обусловлена взаимодействием с бароклинной зоной. В течение 29 сентября циклон претерпел внетропический переход, теряя симметричную структуру и тёплое ядро, и к 9 по японскому времени JMA выпустило последнее предупреждение, зафиксировав прекращение существования тайфуна как тропической системы. К моменту рассеивания центр системы находился приблизительно у 42,4° с.ш., 172,4° в.д [18]. За весь период своего существования Ногури оставался преимущественно над открытыми океанскими водами, и его прямое

воздействие на населённые территории было минимальным, ограничиваясь усилением прибойных волн и отбойных течений на некоторых островах и участках побережья (Рис. 2.1.2.1). Однако сам факт достижения им статуса супертайфуна, продолжительной жизни, эрратичности траектории и способности к возобновлению интенсивности в высоких широтах делает этот циклон ценным объектом для изучения механизмов быстрой интенсификации и структурной эволюции тропических циклонов в условиях меняющегося климата [17, 19].

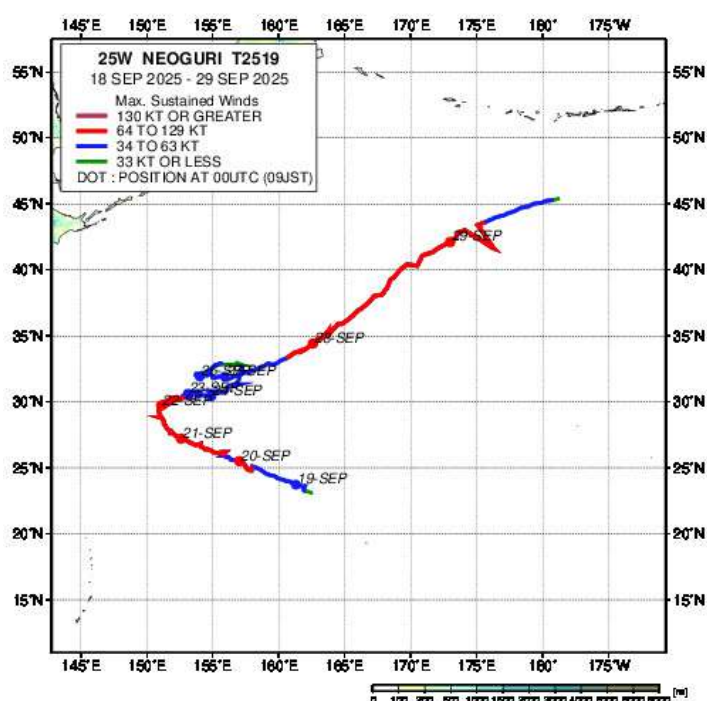


Рис. 2.1.2.1. Траектория движения тайфуна «Ногури» (по данным JAXA)

2.2. Методика работы с аналитическим инструментом ePort

Методика сравнительного спутникового анализа двух тропических циклонов была полностью реализована средствами аналитического веб-инструмента ePort, интегрированного в платформу EUMETrain.org. Дополнительные офлайн-инструменты не применялись, что обеспечило

единство методической базы и полную воспроизводимость всех операций в рамках единой веб-среды.

Работа начиналась с авторизации на портале и выбора географического сектора, соответствующего району активности каждого циклона. Для урагана «Эрин» использовалась проекция, охватывающая центральную и западную части тропической Атлантики, с данными спутника GOES-E. Для тайфуна «Ногури» выбирался сектор западной части Тихого океана с центрированием на область к востоку от Японии, и данные поступали со спутника Himawari. Временной интервал для каждого циклона охватывал весь период его существования — от стадии тропической депрессии до внетропического перехода или затухания — с дискретностью доступных снимков в три часа, что позволяло надёжно фиксировать все ключевые фазы эволюции.

Основной методической операцией в ePort являлось формирование анимационных последовательностей и статических композитов в ключевых спектральных каналах и RGB-продуктах. Для каждого циклона были подготовлены временные ряды в следующих слоях: видимые каналы (GOES-E VIS 0.64 μm , Himawari VIS 0.64 μm) — для анализа текстуры облачного покрова, степени симметричности центрального плотного облачного кластера, наличия и чистоты глаза, конфигурации спиральных полос; усиленные инфракрасные каналы (GOES-E IR 10.3 μm enhanced, Himawari IR 10.4 μm enhanced) — как круглосуточный инструмент отслеживания глубокой конвекции, идентификации стены глаза и циклов её замены; RGB-композиты конвекции (GOES-E Convection RGB, Himawari Severe Storms RGB) — для контрастного выделения областей с мелкими ледяными частицами на вершинах кучево-дождевых облаков; RGB-композит «Воздушные массы» (Airmass RGB) и каналы водяного пара (WV 6.2 μm и 7.3 μm) — для анализа крупномасштабного окружения, выявления сухих вторжений, оценки симметрии высотного оттока и ранних признаков внетропического перехода [15].

Изображения визуализировались с оптимальными цветовыми настройками: для усиленных инфракрасных каналов применялась стандартная цветовая шкала EUMETSAT, рекомендованная для инфракрасного диапазона (Рис. 2.2.1), в которой наиболее холодные облачные вершины отображаются яркими оттенками. Шкала охватывает температурный диапазон от -33 до -73 °C: яркие красно-оранжевые тона соответствуют вершинам глубокой конвекции, зелёные и голубые — областям с умеренной конвекцией. Для RGB-композиций сохранялись стандартные цветовые схемы EUMETSAT. Анимации создавались с регулируемой скоростью воспроизведения (5–10 кадров в секунду) и экспортировались для включения в иллюстративный материал работы [14].

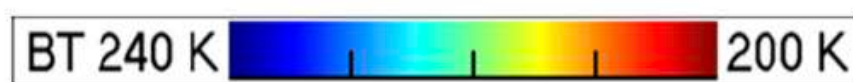


Рис. 2.2.1. Стандартная цветовая шкала для усиленных инфракрасных каналов. Источник: EUMETSAT

Вторым важным приёмом являлось наложение слоёв численных прогнозов погоды на спутниковые снимки. Для ключевых стадий каждого циклона (начало быстрой интенсификации, максимальная интенсивность, внетропический переход) формировались композиции, совмещающие усиленный инфракрасный канал или Airmass RGB с полями давления на уровне моря (Mean Sea Level Pressure), геопотенциальной высоты 500 гПа (Geopotential Height 500 hPa) и векторами ветра (Wind, Wind Barbs) на различных изобарических поверхностях. Это позволило установить положение центров циклонов относительно управляющих потоков, оценить влияние ложбин и струйных течений, а также зафиксировать момент взаимодействия с бароклинной зоной. Для тайфуна «Ногури» дополнительно привлекалось поле температуры поверхности океана (Sea Surface Temperature)

для подтверждения термического потенциала, обеспечившего повторную интенсификацию в высоких широтах [12].

Для количественных оценок структурных характеристик активно применялась функция Measure инструмента ePort. С её помощью на усиленных инфракрасных снимках измерялись диаметр глаза (по внутренней границе стены), расстояние между центром низкоуровневой циркуляции и центром облачного купола, а также угловые параметры ориентации спиральных полос. Точность измерений, ограниченная пространственным разрешением снимков, позволяла фиксировать изменения диаметра глаза с погрешностью в несколько километров, что достаточно для сравнительного анализа.

Прямые данные полярно-орбитальных спутников (микроволновое зондирование, скаттерометрия) в рамках настоящей работы не использовались по причинам, подробно рассмотренным в подглаве 1.5. Анализ полей ветра выполнялся по модельным слоям Wind и Wind Barbs, а информация о высоте облаков и интенсивности осадков извлекалась косвенным путём — по яркостной температуре усиленных инфракрасных каналов и сигнатуре конвективных RGB-композиций, что является общепринятым подходом в спутниковой метеорологии.

Таким образом, предложенная методика, опирающаяся исключительно на функциональные возможности ePort — многослойную визуализацию, анимацию, наложение модельных полей и измерительный модуль Measure, — позволила провести полностью симметричный многоспектральный анализ эволюции и структурных характеристик урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури» при полной унификации процедур для двух океанических бассейнов.

2.3. Критерии визуального сравнительного анализа структуры циклонов

Формулировка чётких и воспроизводимых визуальных критериев является необходимым этапом методики, обеспечивающим переход от

качественного просмотра спутниковых изображений к систематическому сравнительному анализу эволюции тропических циклонов. В рамках настоящей работы набор критериев был разработан таким образом, чтобы его применение было возможным исключительно на основе данных, доступных через платформу EUMETrain, а именно геостационарных многоканальных снимков, RGB-композигов и модельных полей, визуализированных средствами ePort. Критерии сгруппированы в три основных блока: характеристики глаза циклона, свойства конвективных кластеров и показатели симметрии облачной системы, что в совокупности позволяет охарактеризовать как структурную зрелость вихря, так и стадию его жизненного цикла.

Первый блок критериев связан с наличием и качеством глаза бури — наиболее диагностически значимого структурного элемента зрелого тропического циклона. Фиксировался сам факт появления глаза на инфракрасных и видимых изображениях, что служило маркером перехода системы в стадию урагана или тайфуна. Для количественной оценки качества глаза с помощью функции Measure инструмента ePort определялись следующие параметры: диаметр глаза, измеренный в километрах по внутренней границе стенки глаза на усиленных инфракрасных снимках в момент максимальной интенсивности; степень заполненности глаза облачностью низкого и среднего ярусов, определяемая визуально по видимым изображениям и выражаемая в качественной шкале как «чистый», «частично заполненный» или «полностью закрытый»; форма глаза, классифицируемая как круглая, овальная или искажённая. Отчётливо выраженный, свободный от облаков глаз правильной округлой формы интерпретировался как индикатор высокой степени организации вихря и слабого вертикального сдвига ветра. В случаях, когда видимый глаз отсутствовал или был маскирован перистой облачностью, дополнительно привлекались изображения RGB-композигов Airmass и усиленного инфракрасного канала, позволяющие надёжно идентифицировать стенку глаза по температурному контрасту и структуре влажности. Для каждого из исследуемых циклонов фиксировались временные

интервалы существования глаза и изменение его диаметра в ходе циклов замены стенки глаза.

Второй блок критериев охватывал характеристики конвективных кластеров, под которыми понимаются области с наиболее низкими яркостными температурами на инфракрасных снимках, соответствующие вершинам мощных кучево-дождевых облаков. Основным количественным показателем служила минимальная яркостная температура в пределах циклонической циркуляции на каждый момент времени, которая позволяла судить о глубине конвекции. В качестве порогового значения для выделения зон глубокой конвекции принималась температура минус 70 °C и ниже; области с температурой ниже минус 80 °C выделялись как ядра наиболее интенсивных восходящих потоков. Для каждого циклона на протяжении его жизненного цикла анализировалось пространственное распределение таких сверххолодных областей: их количество, площадь и привязка к элементам структуры — стенке глаза, спиральным полосам или внешнему конвективному кольцу. Особое внимание уделялось появлению кольцеобразной структуры глубокой конвекции вокруг центра, что интерпретировалось как признак начала быстрой интенсификации. При помощи анимаций ePort оценивалась также временная устойчивость конвективных кластеров: длительное сохранение симметричного холодного кольца указывало на стабильную фазу зрелости, тогда как его фрагментация и смещение в одну сторону свидетельствовали о воздействии сдвига ветра или начале внетропического перехода [14,15].

Третий блок критериев касался симметрии облачной системы в целом. Симметричность тропического циклона является прямым отражением баланса между интенсивностью циркуляции и воздействием внешних факторов, прежде всего вертикального сдвига ветра. Для её оценки применялся визуальный анализ инфракрасных снимков, RGB-композиций Airmass и изображений водяного пара, в ходе которого облачный щит циклона классифицировался по трёхбалльной шкале: симметричный, умеренно

асимметричный и сильно асимметричный. У симметричного циклона центральный плотный облачный кластер и спиральные полосы распределены относительно равномерно вокруг центра циркуляции, а глаз, если он присутствует, находится в геометрическом центре облачной массы. Умеренная асимметрия предполагает смещение наиболее активной конвекции в один из секторов, как правило, в направлении сдвига, при сохранении общей кольцевой структуры. Сильная асимметрия характеризуется концентрацией всей глубокой конвекции в одном квадранте и обширными безоблачными зонами в противоположном секторе; такая картина типична для стадий затухания или активного внетропического перехода. Дополнительным количественным индикатором служило расстояние между центром циркуляции на низких уровнях, определённым по кривизне низких облаков в видимом канале или по полю модельного ветра на уровне 10 м, и центром верхнетропосферного облачного купола, оценённым по инфракрасному каналу. Это расстояние измерялось инструментом Measure, и его приращение во времени использовалось как мера нарастания асимметрии [15].

Помимо трёх основных блоков, в анализе применялись вспомогательные критерии, касающиеся общей структуры облачного поля. Оценивалась выраженность спиральных дождевых полос по четырехбалльной шкале от «отсутствуют» до «хорошо развиты, прослеживаются на периферию циклона». Фиксировалось наличие или отсутствие отточной перистой облачности в виде антициклонически изогнутых полос на снимках водяного пара, что свидетельствовало о качестве высотного оттока. Для стадии внетропического перехода дополнительным критерием служило появление характерной запятовидной формы облачного поля и развитие облачной полосы, ориентированной вдоль фронтальной зоны. Для унификации процедуры сравнения циклонов Эрин и Ногури все перечисленные критерии фиксировались в единые хронологические таблицы с шагом в шесть часов на протяжении всего жизненного цикла каждого вихря. Результаты занесения

этих критериев в таблицы легли в основу сравнительного анализа, представленного в Главе 3.

3 Анализ эволюции и структуры тропических циклонов на основе данных EUMETSAT, визуальной платформы ePort Pro

3.1. Эволюция облачных систем по данным геостационарных спутников

В данном разделе приведены результаты анализа эволюции урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури» на основе геостационарных спутниковых данных, полученных через ePort Pro. Для каждого циклона выделены ключевые стадии жизненного цикла: формирование, быстрая интенсификация, максимальная интенсивность, цикл замены стенки глаза (если имел место), ослабление и внетропический переход. Описание выполнено по единой схеме с использованием видимых, инфракрасных, усиленных инфракрасных каналов и RGB-композигов Airmass и Convection/Severe Storms, а также композита температуры поверхности океана (Sea Surface Temperature)

3.1.1. Ураган «Эрин»

Анализ эволюции урагана «Эрин» выполнен по данным геостационарного спутника GOES-E, доступным в ePort Pro с дискретностью в три часа, не считая единичных случаев, достигающих шести часов. Наблюдения охватывают период от 9 до 23 августа 2025 года.

Ураган «Эрин» зародился из африканской восточной волны, которая покинула побережье Западной Африки 8 августа 2025 г. и начала смещаться в западно-северо-западном направлении над Атлантикой.

На снимке в видимом диапазоне за 9 августа 15 UTC (Рис. 3.1.1.1a) конвективный кластер волны имеет вытянутую с юго-востока на северо-запад форму; центральная плотная облачность отсутствует, кучево-дождевые ячейки разрознены и не образуют единого центра циркуляции. Усиленный инфракрасный канал 10.3 мкм с наложенными стрелками направления ветра

на уровне 850 гПа (Рис. 3.1б) подтверждает незамкнутость приземной циркуляции: поток направлен преимущественно с востока на северо-восток, огибая зону конвекции без признаков циклонического вращения. Минимальная яркостная температура облачных вершин в пределах волны составляет от -43 до -50 °C, что соответствует конвекции умеренной глубины, недостаточной для инициации самоорганизации вихря.

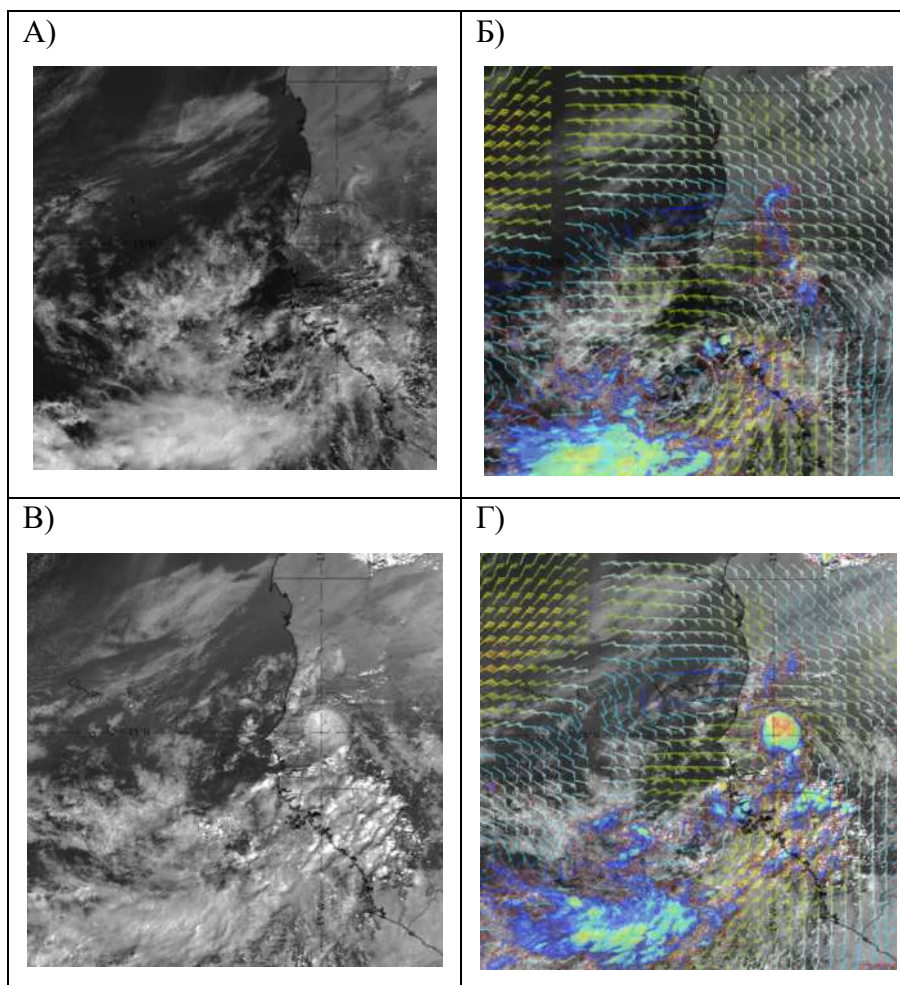


Рис. 3.1.1.1. Выход восточной африканской волны с материка: а) Снимок в VIS 0.64 μm 09.08.25 15 UTC; б) Снимок в VIS 0.64 μm с наложением поля Wind Barbs и IR 10.3 μm enhanced 09.08.25 15 UTC; в) Снимок в VIS 0.64 μm 09.08.25 18 UTC; г) Снимок в VIS 0.64 μm с наложением поля Wind Barbs и IR 10.3 μm enhanced 09.08.25 18 UTC

За последующие сутки система сплотилась (консолидировалась). К 11 августа Национальный ураганный центр (NHC) классифицировал её как тропическую депрессию, а спустя несколько часов — как тропический шторм «Эрин». Совместный анализ видимого снимка 0.64 мкм и усиленного инфракрасного канала 10.3 мкм за 11 августа 06 UTC (Рис. 3.1.1.2а, 3.1.1.2б) демонстрирует качественное изменение структуры: на видимом изображении отчётливо видно, что конвективные полосы начинают закручиваться вокруг общего центра, формируя центральный плотный облачный кластер к юго-западу от островов Кабо-Верде. Усиленный ИК-канал подтверждает углубление конвекции в этой области: минимальная яркостная температура понижается до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, что указывает на рост высоты облачных вершин и интенсификацию восходящих движений. Наложение модельного поля ветра на уровне 850 гПа (Рис. 3.1.1.2б) выявляет замкнутую циклоническую циркуляцию: в северной части формирующегося вихря стрелки направления ориентированы с востока на запад, в западной — с севера на юг, в южной — с запада на восток, в восточной — с юга на север. Такая смена направлений вокруг единого центра количественно подтверждает образование приземной циклонической циркуляции и переход системы в стадию тропической депрессии.

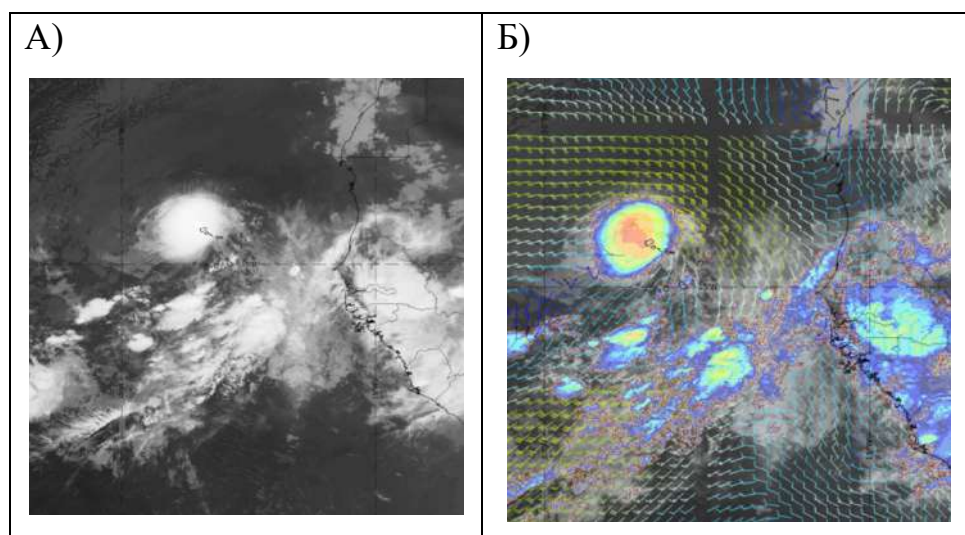


Рис. 3.1.1.2. Развитие конвекции 11.08.2025 06 UTC: а) Снимок в IR 10.3 μm ; б) Снимок в IR 10.3 μm с наложением композитов Wind Barbs и IR 10.3 μm enhanced

К 12 UTC того же дня (Рис. 3.1.1.3) форма центрального плотного облачного кластера становится более симметричной, однако конвекция, которая шестью часами ранее характеризовалась вершинами с температурой около -70°C , заметно ослабевает: минимальная яркостная температура в пределах центрального облачного кластера повышается до -58°C , а на усиленном инфракрасном снимке, исчезают красно-оранжевые оттенки, маркирующие зоны глубокой конвекции. Причиной временного ослабления послужило смещение системы в акваторию с пониженной температурой поверхности океана. По данным слоя Sea Surface Temperature инструмента ePort, в данном районе температура воды снижается до $25,5^{\circ}\text{C}$, что оказывается несколько ниже порогового значения 26°C , требуемого для устойчивой подпитки глубокой конвекции потоками скрытого тепла. Несмотря на дефицит термической энергии, сформировавшаяся штормовая организация сохраняется: на видимом снимке за тот же срок (Рис. 3.1.1.3а) отчётливо прослеживаются изогнутые полосы низких облаков, сходящиеся к центру циркуляции, а поле ветра на 850 гПа по-прежнему демонстрирует замкнутое

циклоническое вращение. Таким образом, в интервале 06–12 UTC 11 августа система пережила быстрое, но обратимое угнетение глубокой конвекции, обусловленное локальным понижением ТПО, при сохранении уже приобретённой структурной целостности тропического шторма.

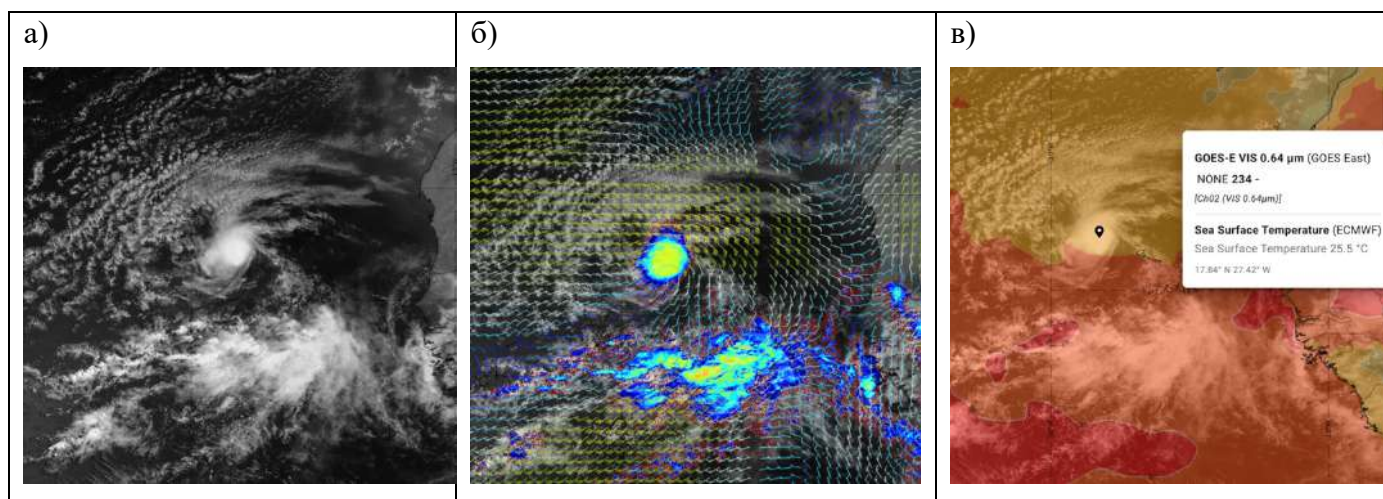


Рис. 3.1.1.3. Снимки за 11.08.25 12 UTC: а) Снимок урагана «Эрин» в видимом диапазоне б) Видимый диапазон с наложением поля направления ветра и усиленного инфракрасного канала; в) Наложение канала VIS 0.64 на модель Sea Surface Temperature

Таким образом, в период с 06 до 12 UTC 11 августа система перешла от кратковременно реализовавшейся глубокой конвекции к фазе умеренной конвекции, что было обусловлено термическим фактором, но не привело к разрушению уже сформировавшейся штормовой структуры.

Сохранив статус тропического шторма, «Эрин» продолжил смещаться в западном направлении. По данным модельного поля ветра на уровне 850 гПа скорость удерживается вблизи 20 м/с, однако плотный облачный кластер остаётся слабо выраженным, а его вершины не достигают порога глубокой конвекции. Наблюдаемая картина согласуется с сохранявшимся в этой начальной фазе дефицитом термической энергии: циклон ещё находился над

водами с температурой около 24–25 °С, что ограничивало поток скрытого тепла с поверхности океана.

Ситуация меняется к 12 августа 12 UTC: согласно данным слоя Sea Surface Temperature инструмента ePort, циклон достигает акватории с температурой воды 26,1 °С, превысив пороговое значение, необходимое для поддержания глубокой конвекции (Рис. 3.1.1.4в). Вместе с тем переход к активной фазе конвекции произошёл не мгновенно, что обусловлено инерционностью системы и необходимостью накопления влаги и тепла в пограничном слое. На усиленных инфракрасных снимках вплоть до 13 августа 15 UTC облачный кластер сохраняет умеренную яркостную температуру (не ниже –60...–65 °С), оставаясь разреженным и лишённым выраженного ядра.

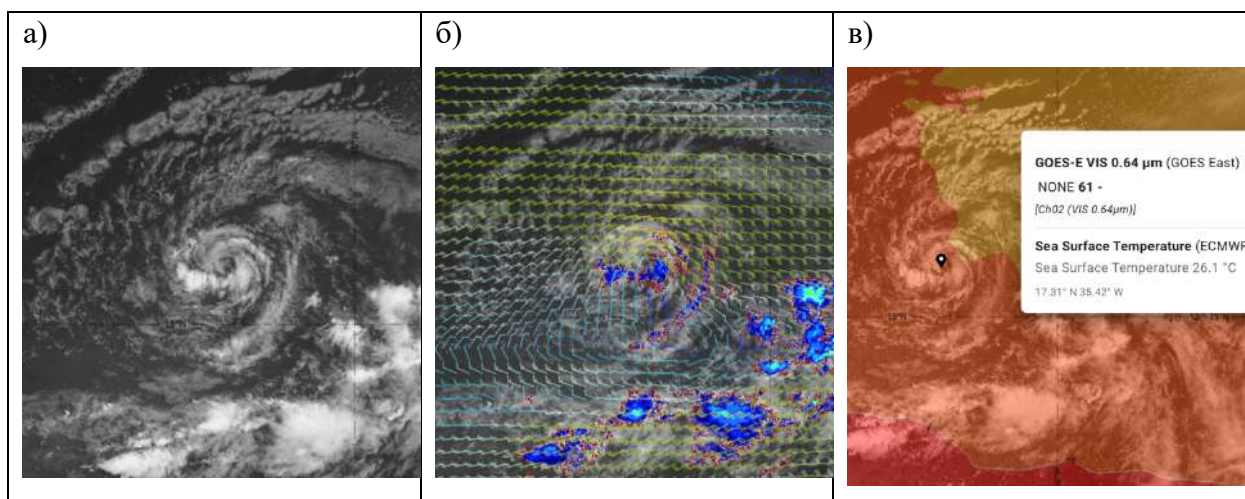


Рис. 3.1.1.4. Снимки за 12.08.25 12 UTC: а) Видимый диапазон; б) Видимый диапазон с наложением поля ветра и усиленного инфракрасного канала; в) Наложение видимого диапазона на модель температуры поверхности океана

Перелом наступает к вечеру 13 августа. В 18 UTC на усиленном инфракрасном снимке (Рис. 3.1.1.5б) в пределах облачного кластера появляется компактная вершина, яркостная температура которой достигает приблизительно –70 °С. Эта локальная вспышка глубокой конвекции свидетельствует о том, что накопившейся термической энергии стало

достаточно для инициации мощных восходящих движений, достигающих тропопаузы.

К 21 UTC того же дня (Рис. 3.1.1.6б) кластер становится крупнее и симметричнее, его форма приобретает выраженный изгиб, напоминающий запятую; площадь зоны с температурой ниже -60°C увеличивается.

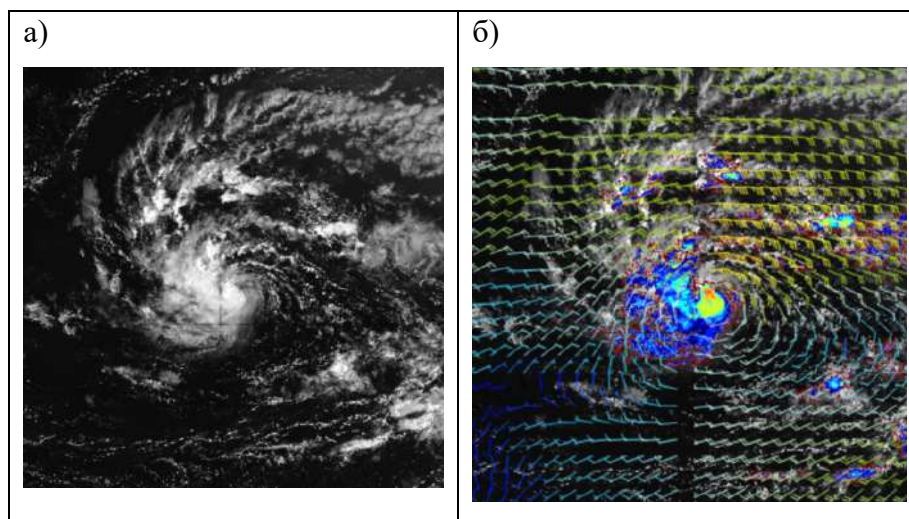


Рис. 3.1.1.5. Снимки за 13.08.25 18 UTC: а) Видимый диапазон; б) Видимый диапазон с наложением поля направления ветра и усиленного инфракрасного канала

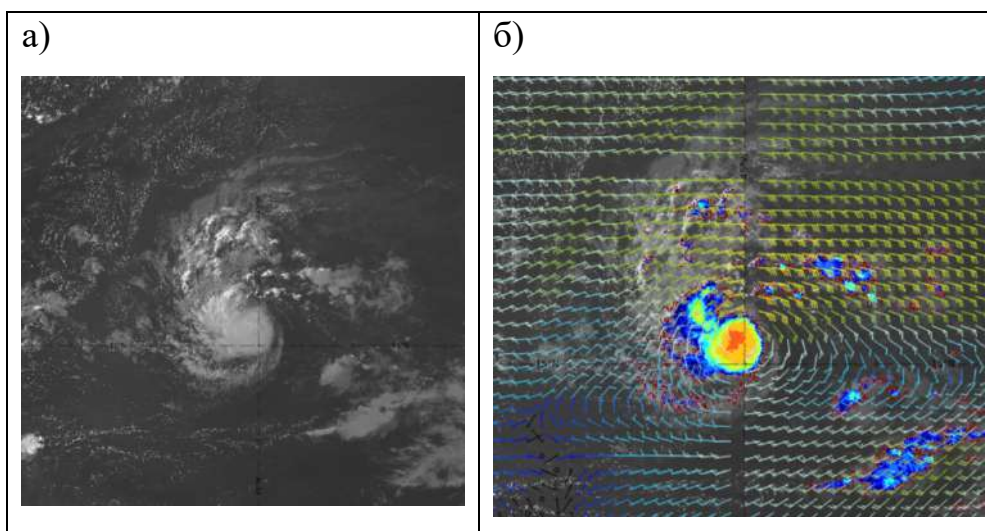


Рис. 3.1.1.6. Снимки за 13.08.25 21 UTC: а) Видимый диапазон; б) Видимый диапазон с наложением поля направления ветра и усиленного инфракрасного канала

Решающий импульс усилению циклона придал его выход в термически богатую акваторию. Днём 14 августа «Эрин» приблизился к водам с температурой поверхности океана выше 28 °С, однако переход носил постепенный характер. По данным слоя Sea Surface Temperature инструмента ePort, по состоянию на 18 UTC 14 августа лишь около половины облачного кластера находилось над акваторией с температурой >28 °С, тогда как остальная часть ещё располагалась над несколько более прохладными водами. К 06 UTC 15 августа система уже примерно на три четверти переместилась в зону с температурой выше 28 °С (Рис. 3.1.1.7), что резко увеличило потоки скрытого и явного тепла в пограничный слой и создало условия для взрывного углубления конвекции.

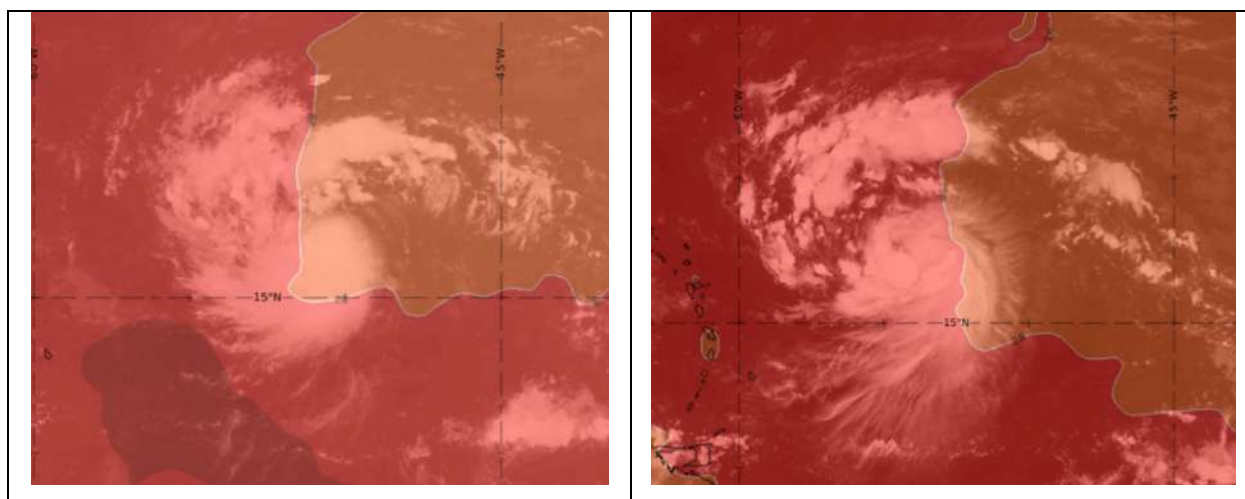


Рис. 3.1.1.7. Перемещение урагана «Эрин» в зону более теплой поверхности океана с 14.08.25 18 UTC по 15.08.25 06 UTC

Несмотря на то, что 14 августа термический потенциал был реализован ещё не полностью, на композите Convection RGB за 14 августа 15 UTC (Рис. 3.1.1.8в) вокруг центра циркуляции уже прослеживается формирующееся кольцо жёлто-оранжевых оттенков, указывающее на присутствие мелких ледяных кристаллов в вершинах кучево-дождевых облаков. Данная сигнатура

является надёжным предвестником образования глаза. Одновременно усиленный инфракрасный канал фиксирует расширение области с температурой ниже -70°C и постепенное замыкание холодного кольца.

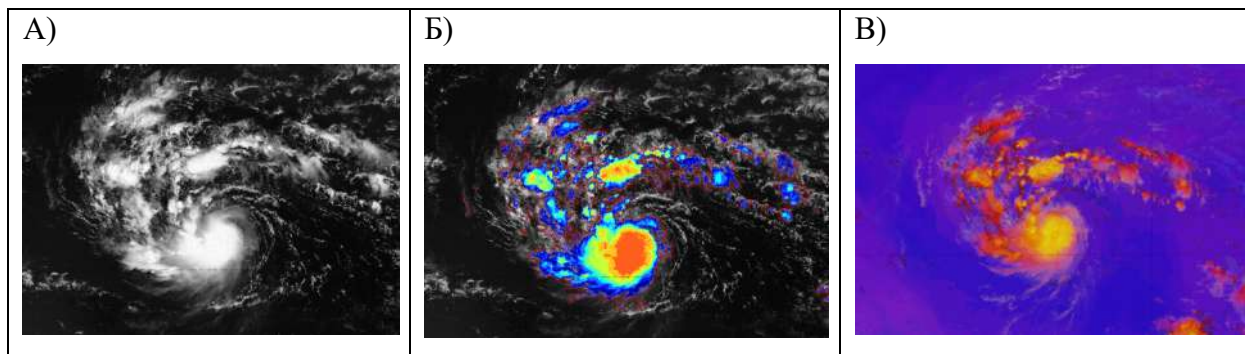


Рис. 3.1.1.8. Снимок урагана «Эрин» 14.08.25 15 UTC: А) Видимый диапазон; Б) Видимый диапазон с наложением усиленного инфракрасного канала; В) Композит Convection RGB

В ночь на 15 августа (00 UTC) на усиленном инфракрасном снимке 10.3 мкм (Рис. 3.1.1.9а) вокруг центра визуализируется симметричное кольцо облачных вершин с яркостной температурой до -75°C , что подтверждает переход системы в фазу быстрой интенсификации. К 03 UTC 15 августа на видимом снимке (Рис. 3.1.1.9б) прослеживаются изогнутые конвективные полосы, ориентированные в направлении центра циркуляции и приобретающие начальную кривизну, характерную для формирующейся спиральной структуры. Такая картина свидетельствует о прогрессирующем упорядочении конвекции, хотя полноценные спиральные полосы, типичные для зрелого урагана, в этот момент ещё не выражены.

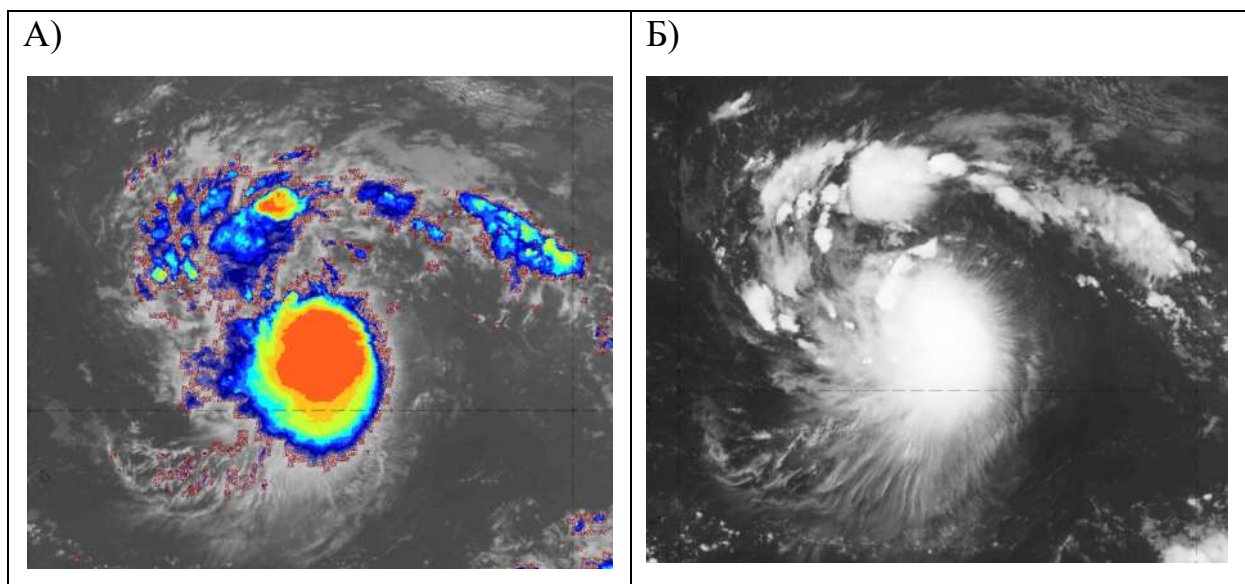


Рис. 3.1.1.9. Визуализация процесса усиления урагана «Эрин»: А) ИК с наложением усиленного ИК 15.08.25 00 UTC; Б) ИК канал с очерченными облачными линиями 15.08.25 03 UTC

Кульминация наступила 16 августа. К 12 UTC ураган достиг максимальной интенсивности, соответствующей 5-й категории по шкале Саффира–Симпсона. На усиленном ИК-снимке (Рис. 3.1.1.10д) визуализирован полностью сформировавшийся глаз диаметром около 14 км, измеренный инструментом Measure по внутренней границе облачной стены (Рис. 3.1.1.11). Глаз классифицируется как «чистый» — на видимом снимке внутри него отсутствуют низкие облака, что говорит о высокой степени организации вихря и слабом вертикальном сдвиге ветра. Стенка глаза симметрична, минимальная яркостная температура в ней опускается ниже -70°C . Конвективные кластеры распределены равномерно по кольцу; центральный плотный облачный кластер имеет квазикруглую форму.

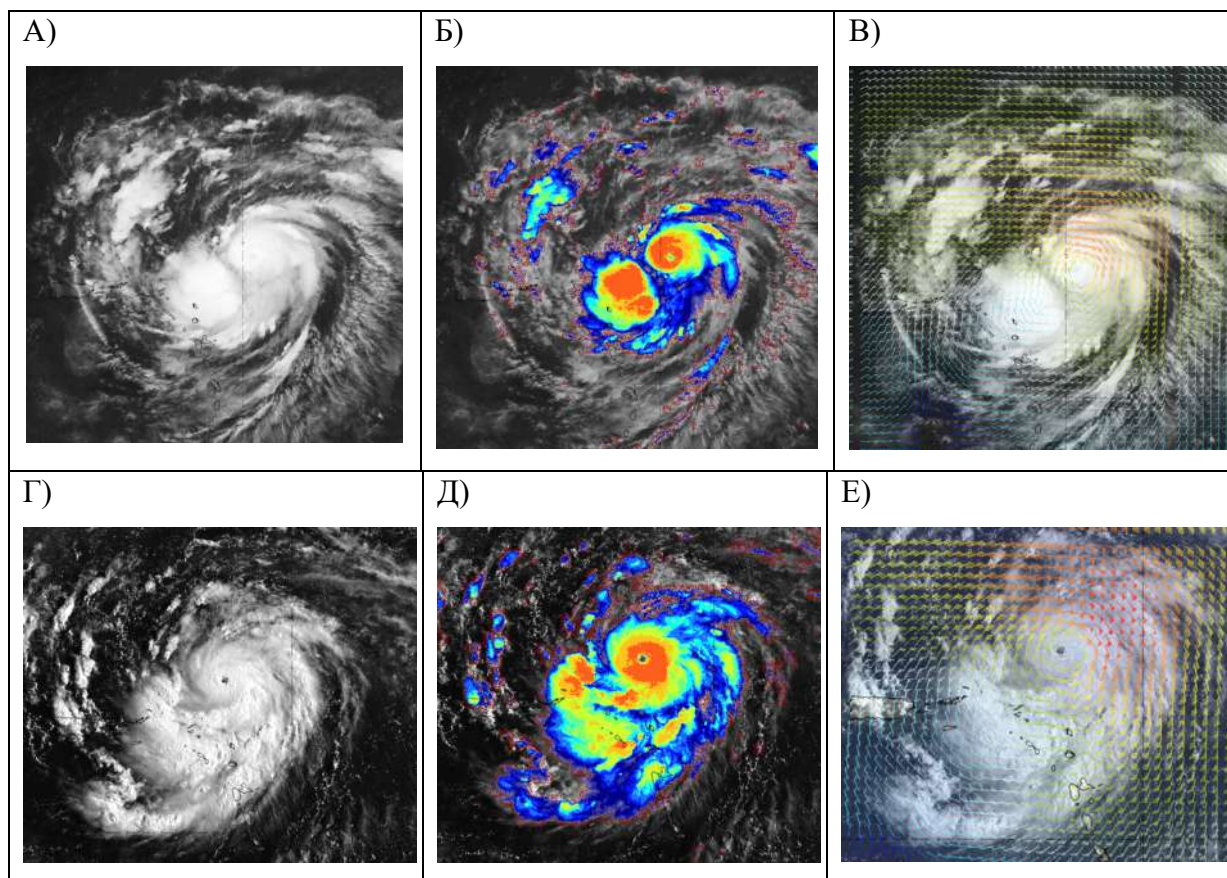


Рис. 3.1.1.10. Формирование глаза бури: а) Снимок в ИК диапазоне 16.08.25 03 UTC; б) Снимок в ИК диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом 16.08.25 03 UTC; в) Снимок в ИК диапазоне с наложением поля ветра 16.08.25 03 UTC; г) Снимок в видимом диапазоне 16.08.25 12 UTC; д) Снимок в видимом диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом 16.08.25 12 UTC; е) Снимок в видимом диапазоне с наложением поля ветра 16.08.25 12 UTC

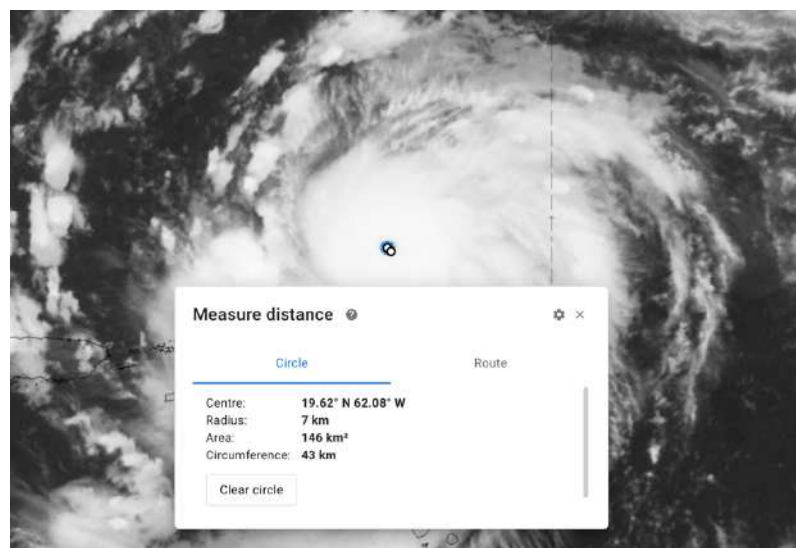


Рис. 3.1.1.11. Измерение глаза бури 16.08.25 12 UTC

Airmass RGB на момент пика (Рис. 3.1.1.12a) демонстрирует развитый высотный отток: от центра вихря в северном и южном направлениях расходятся полосы болотно-зелёного оттенка. В цветовой схеме композита Airmass RGB такая гамма характеризует тёплую воздушную массу с низкой влажностью в верхней тропосфере, что интерпретируется как вынос относительно сухого воздуха из центральной области урагана. Двухсторонняя симметричная структура оттока подтверждает слабый вертикальный сдвиг ветра — условие, необходимое для поддержания экстремальной интенсивности. Наложение модельного поля ветра на уровне 250 гПа (Рис. 3.1.1.12б) указывает на скорость ветра в оттоке около 20 м/с.

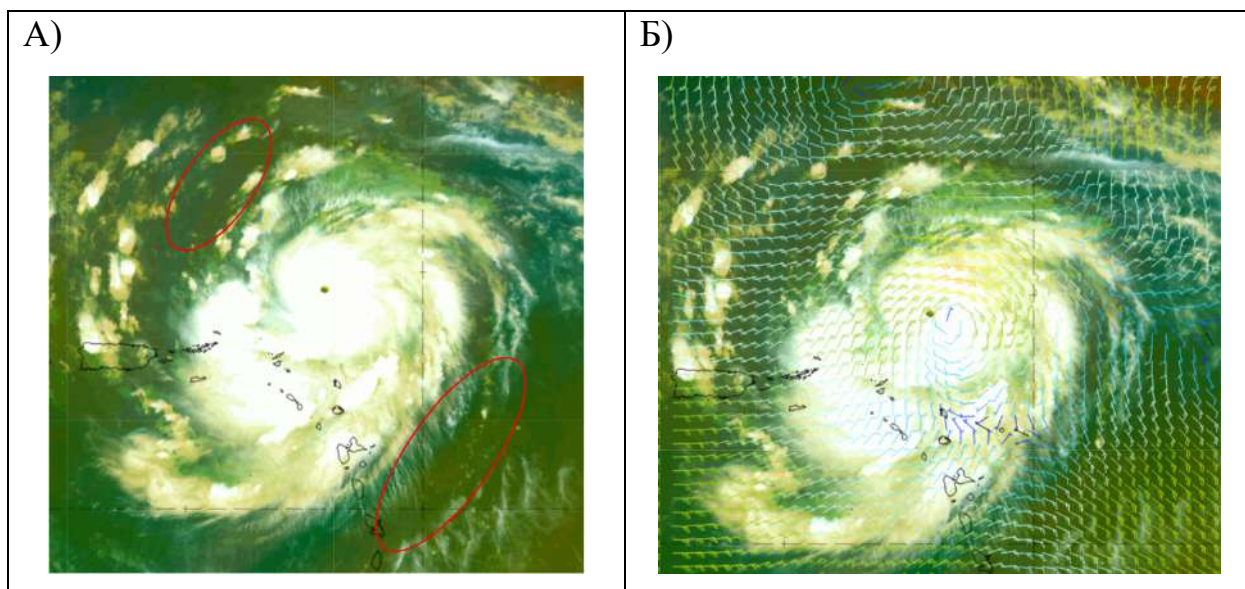


Рис. 3.1.1.12. А) Снимок ТЦ с композитом Airmass RGB 16.08.25 12 UTC; Б) Снимок ТЦ с полем Wind Barbs 16.08.25 12 UTC

После достижения максимальной интенсивности 16 августа структура урагана претерпела ряд последовательных изменений, связанных с циклом замены стенки глаза и последующим взаимодействием с бароклининой зоной средних широт.

17 августа в 15 UTC на видимом снимке (Рис. 3.1.1.13а) вновь обнаруживается глаз, однако он не является чистым: его центральная область частично заполнена низкой слоисто-кучевой облачностью, маскирующей тёмное ядро. На усиленном инфракрасном снимке за тот же срок глаз также прослеживается по характерному кольцу холодных вершин, но температурный контраст несколько сглажен из-за присутствия низких облаков. Подобное состояние свидетельствует о том, что конвекция в стенке глаза остаётся интенсивной, но нисходящие движения в центре ещё не полностью очистили его от облачности.

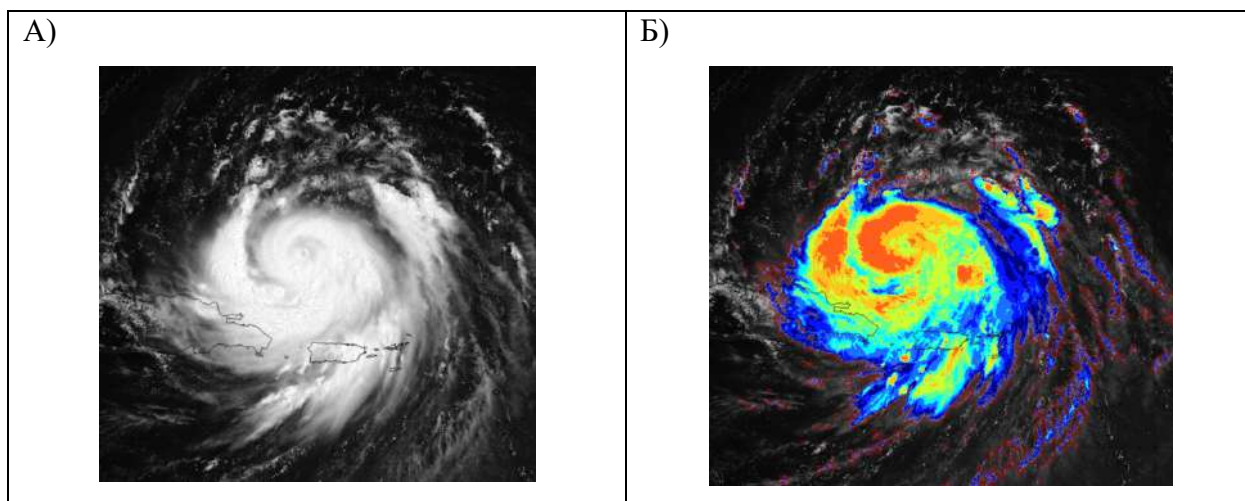


Рис. 3.1.1.13. Снимок урагана «Эрин» на стадии повторного появления глаза после цикла замены стенки 17.08.25 15 UTC: а) Снимок в видимом диапазоне; б) Снимок в видимом диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом;

В течение последующих полутора суток, вплоть до 19 августа 03 UTC, циклон визуально разрастался (Рис. 3.1.1.14): площадь центрального плотного облачного кластера увеличилась, спиральные полосы распространились на периферию. К 18 августа около 12 UTC, в ходе этого разрастания, глаз циклона, всё ещё закрытый низкой облачностью, достиг максимального диаметра за постпиковый период — 40 км, измеренного инструментом Measure по внутренней границе облачной стены (Рис. 3.1.1.15). Столь значительное расширение глаза указывает на завершившийся цикл замены стенки и формирование новой, более обширной структуры.

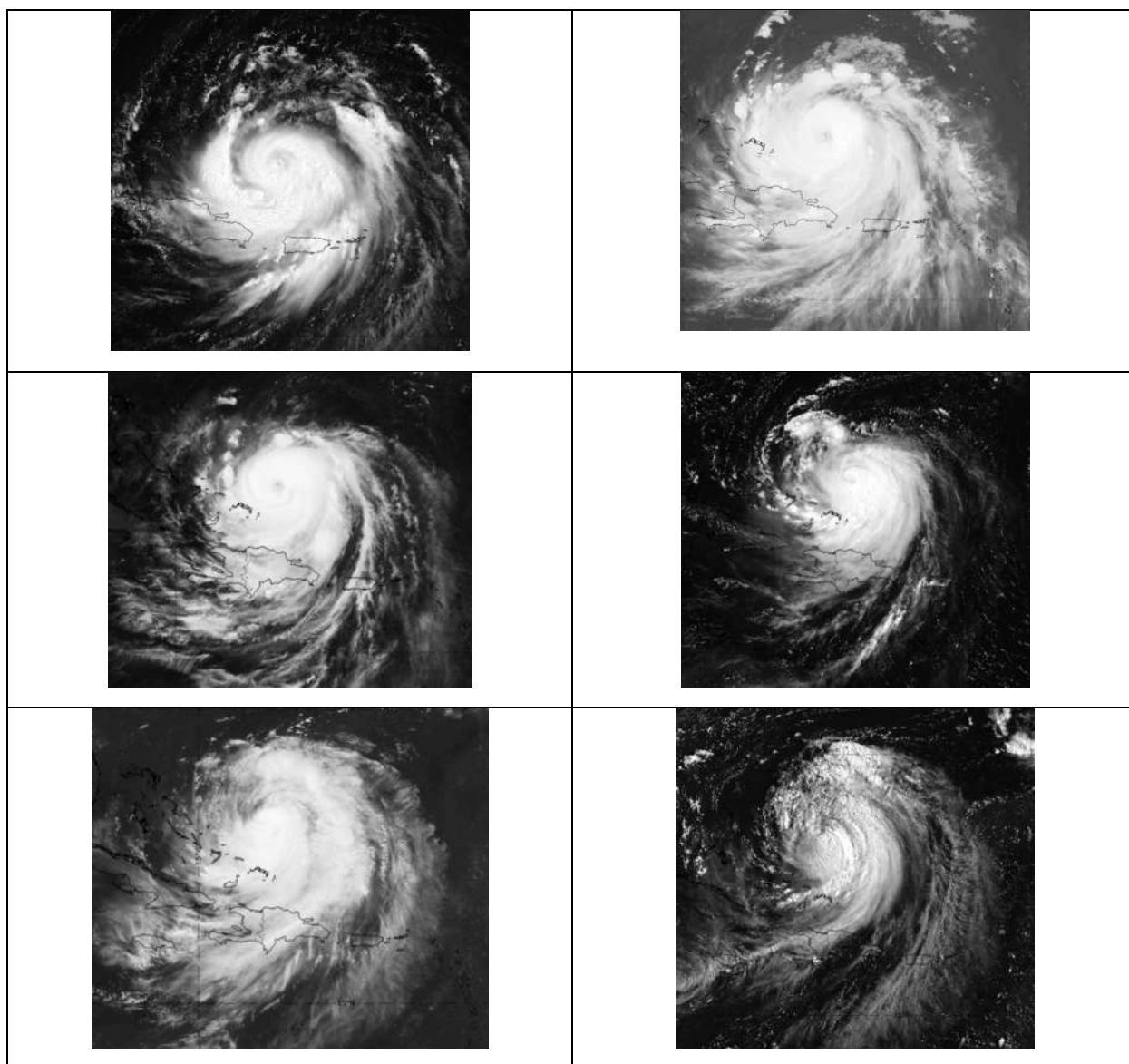


Рис. 3.1.1.14. Снимки эволюция урагана «Эрин» с 17.08.25 15 UTC по 19.08.25 12 UTC с шагом 9 часов

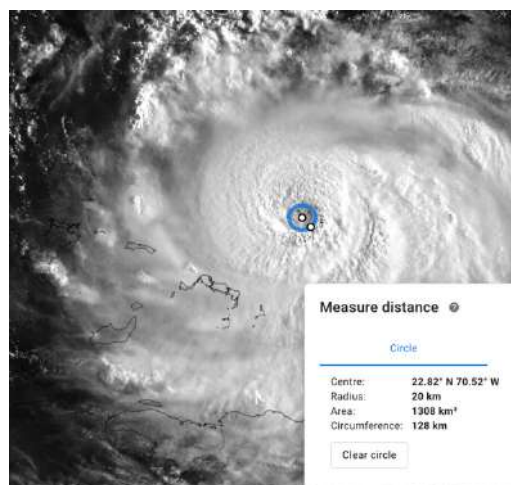


Рис. 3.1.1.15. Измерение глаза бури 18.08.25 12 UTC

Новая фаза усиления началась после 19 августа 03 UTC. К 20 августа 15 UTC на усиленном инфракрасном снимке (Рис. 3.1.1.16б) вновь обозначился глаз бури, но, как и прежде, он оставался закрытым низкой облачностью. Его диаметр составил приблизительно 20 километров в диаметре (Рис. 3.1.1.17). Глубокая конвекция в стенке глаза сохранялась, однако глаз не прояснился.

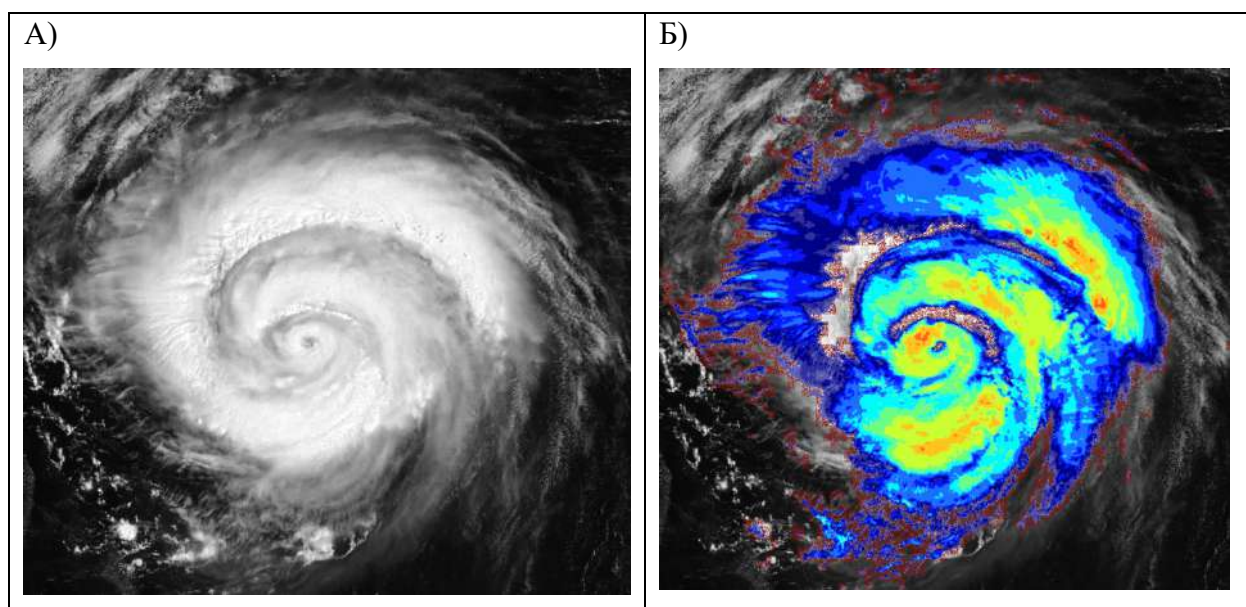


Рис. 3.1.1.16. Снимки за 20.08.25 15 UTC на стадии третьего появления глаза:

- а) Снимок в видимом диапазоне; б) Снимок в видимом диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом;

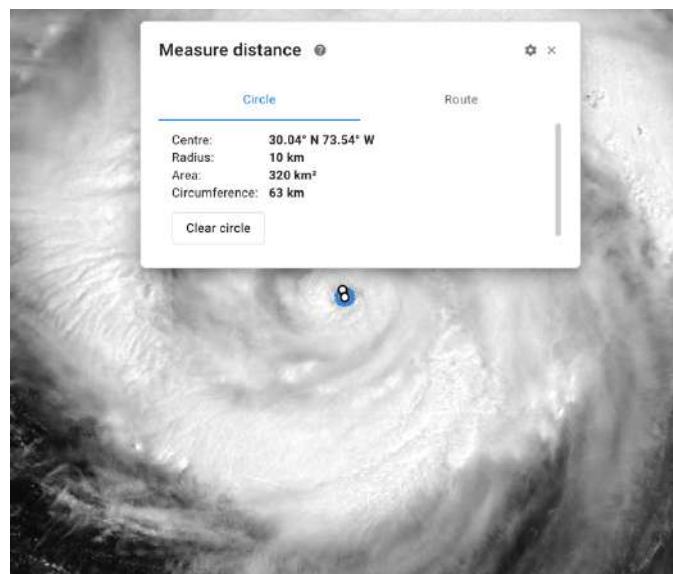


Рис. 3.1.1.17. Измерение глаза бури 20.08.25 15 UTC

К 21 августа 00 UTC глаз окончательно исчез с инфракрасных изображений. Траектория циклона приобрела северное, а затем северо-восточное направление, в результате чего система начала взаимодействовать с зоной горизонтального градиента температуры между тропическим и полярным воздухом — бароклинной зоной средних широт. На композитном изображении, построенном в ePort (Рис. 3.1.1.18), данный переход идентифицируется по нескольким признакам. На Airmass RGB к северо-западу от центра циклона обширная область окрашена в сине-фиолетовые тона, соответствующие холодной и сухой воздушной массе, тогда как с юго-востока примыкает тёплая влажная масса (зелёные и болотные оттенки). Такой цветовой контраст характерен для бароклинной зоны. Дополнительно модельное поле ветра на уровне 300 гПа фиксирует значительное усиление скорости воздушного потока в окрестностях циклона, что свидетельствует о его вовлечении в струйное течение. Сочетание этих факторов инициировало внетропический переход, в ходе которого циклон постепенно утрачивал симметричную структуру и тёплое ядро.

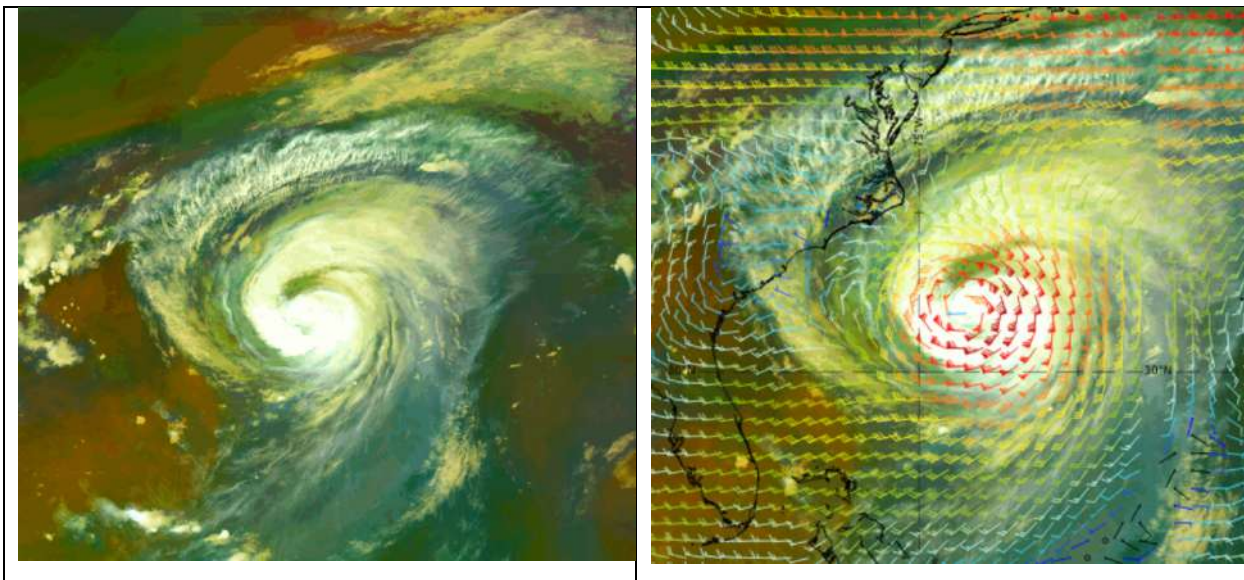
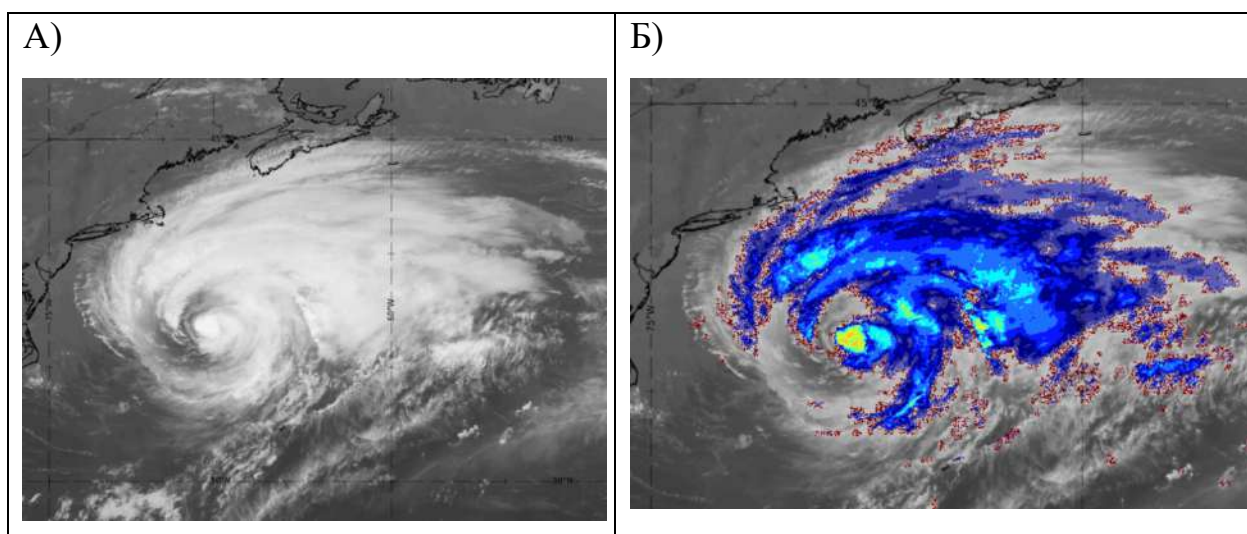


Рис. 3.1.1.18. Снимок урагана «Эрин» с наложением композита Airmass RGB и полем ветра на уровне 300 гПа

22 августа в 00 UTC центральный облачный кластер уменьшился до небольшого компактного образования. На усиленном инфракрасном снимке (Рис. 3.1.1.19) в его пределах наблюдались оранжевые оттенки стандартной цветовой шкалы EUMETSAT, что соответствовало яркостной температуре около -63°C и указывало на конвекцию лишь умеренной глубины. К 03 UTC того же дня кластер потерял симметрию и начал деградировать: его облачная структура стала вытягиваться.



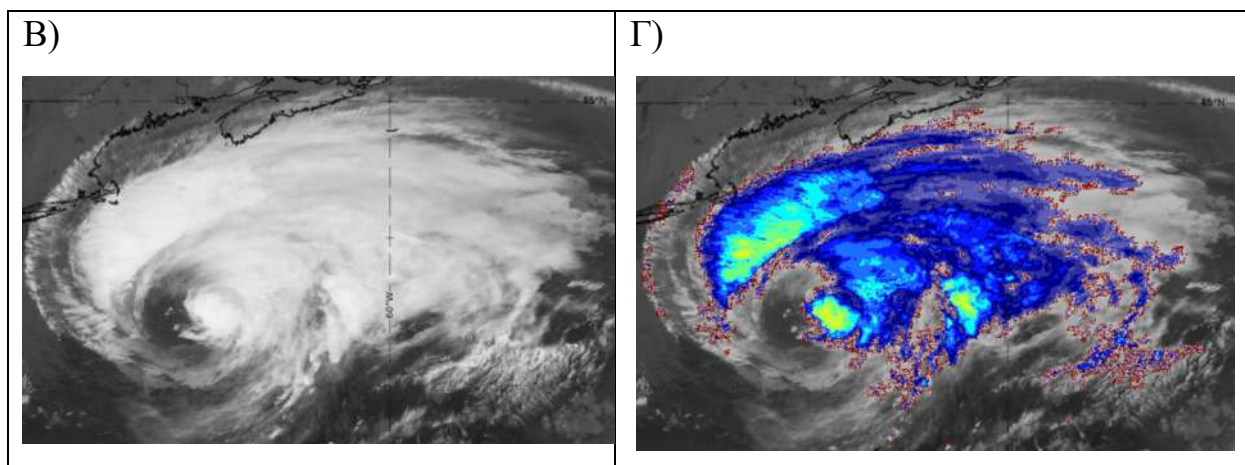


Рис. 3.1.1.19. Снимок урагана «Эрин»: а) Снимок в ИК диапазоне 22.08.25 00 UTC; б) Снимок в ИК диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом 22.08.25 00 UTC; в) Снимок в ИК диапазоне 22.08.25 03 UTC; г) Снимок в ИК диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом 22.08.25 03 UTC

В 18 UTC 22 августа на инфракрасном снимке ненадолго появились маленькие пятна, окрашенные в красные тона (температура около -70°C), остаточные вспышки глубокой конвекции (Рис. 3.1.1.20). Однако их площадь была незначительной, и спустя шесть часов, к 23 августа 00 UTC, они полностью исчезли. К этому моменту система уже находилась над водами с температурой поверхности около 24°C (Рис. 3.1.1.21), а по мере дальнейшего продвижения на северо-восток температурный градиент океана возрастал, лишая циклон термической энергии.

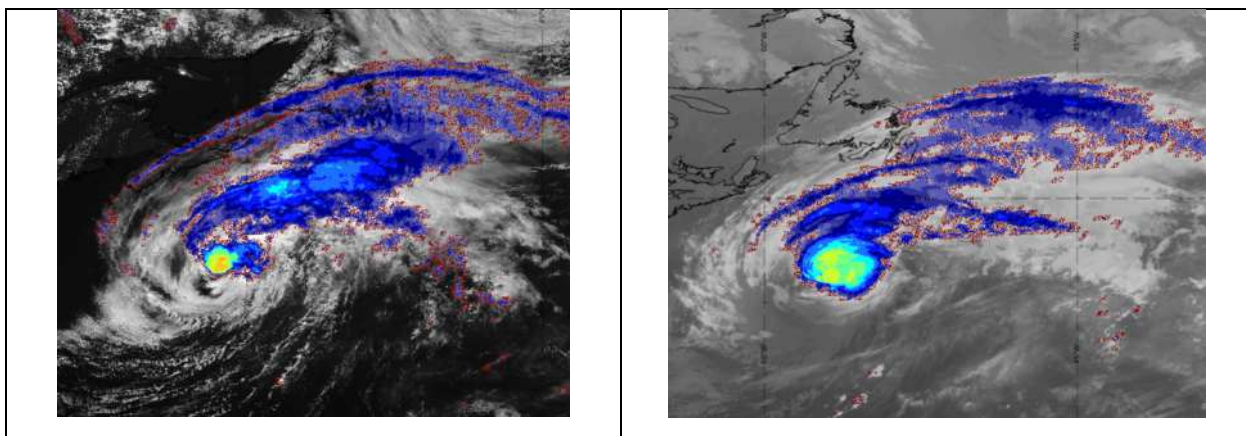


Рис. 3.1.1.20. Внетропический переход с 22.08.25 18 UTC по 23.08.25 00 UTC

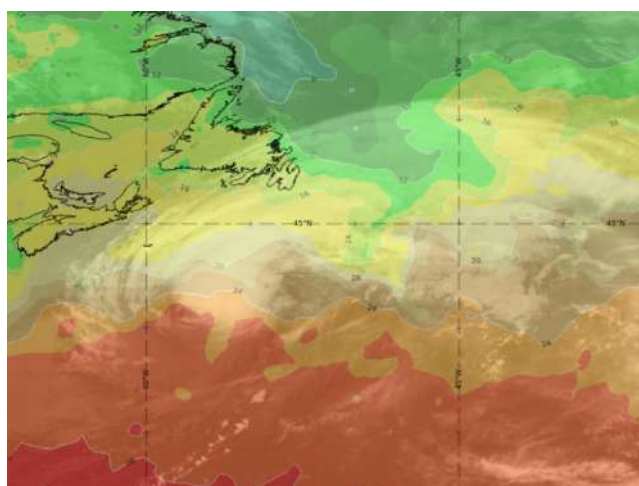


Рис. 3.1.1.21. Наложение инфракрасного канала на композит температуры поверхности океана

Лишённый подпитки, облачный массив окончательно утратил центральный кластер и вытянулся в узкую полосу, напоминающую перо. По мере дальнейшего продвижения над всё более холодными водами (ТПО опускалась ниже 20°C) облачность постепенно теряла вертикальное развитие и к 24 августа трансформировалась в обширное поле низкой слоистой облачности, лишённое организованной циклонической циркуляции (Рис. 3.1.1.22).

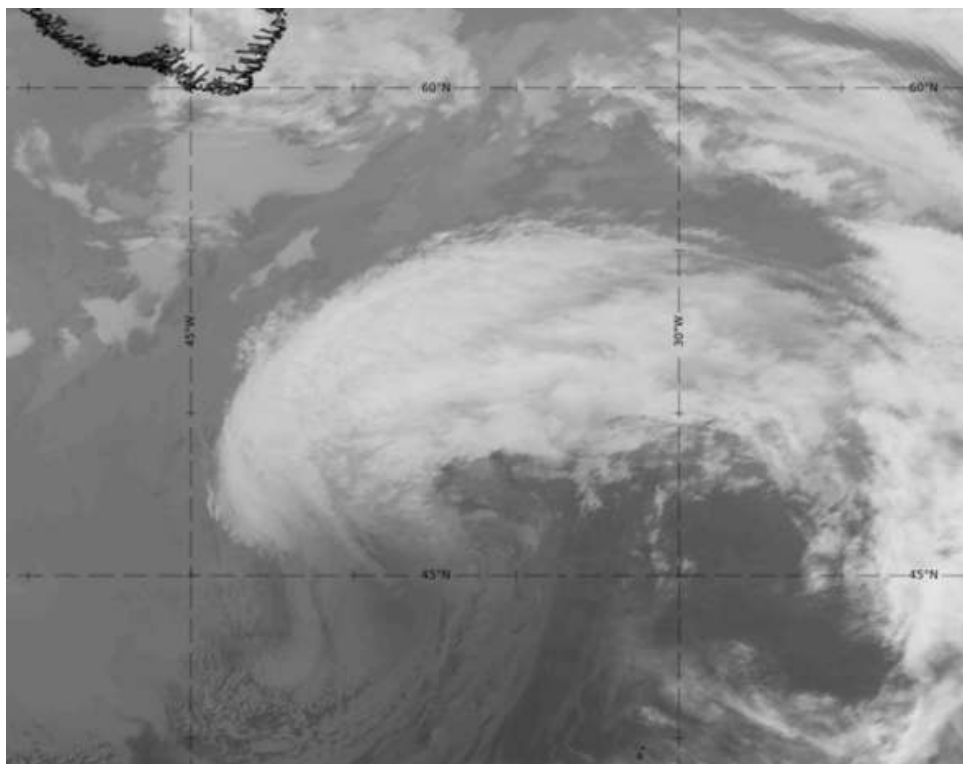


Рис. 3.1.1.22. Снимок внетропического циклона «Эрин» в инфракрасном канале

3.1.2. Тайфун «Ногоури»

Анализ эволюции тайфуна «Ногоури» (международное обозначение 2519) выполнен по данным геостационарного спутника Himawari с использованием инструмента ePort Pro. Временной интервал наблюдений охватывает период с 15 по 30 сентября 2025 г. с дискретностью снимков в три часа. Для дневных сроков (21–09 UTC для данного региона) дополнительно привлекался RGB-композит Convection RGB; в ночные часы основным инструментом служили усиленный инфракрасный канал 10.4 мкм и Airmass RGB.

Формирование циклона происходило в западной части Тихого океана из обширной области глубокой конвекции, постепенно консолидировавшейся и приобретавшей признаки организованной циклонической циркуляции восточнее острова Уэйк (Рис. 3.1.2.1). По данным Японского

метеорологического агентства (JMA), 18 сентября в 06:00 UTC система была классифицирована как тропическая депрессия.

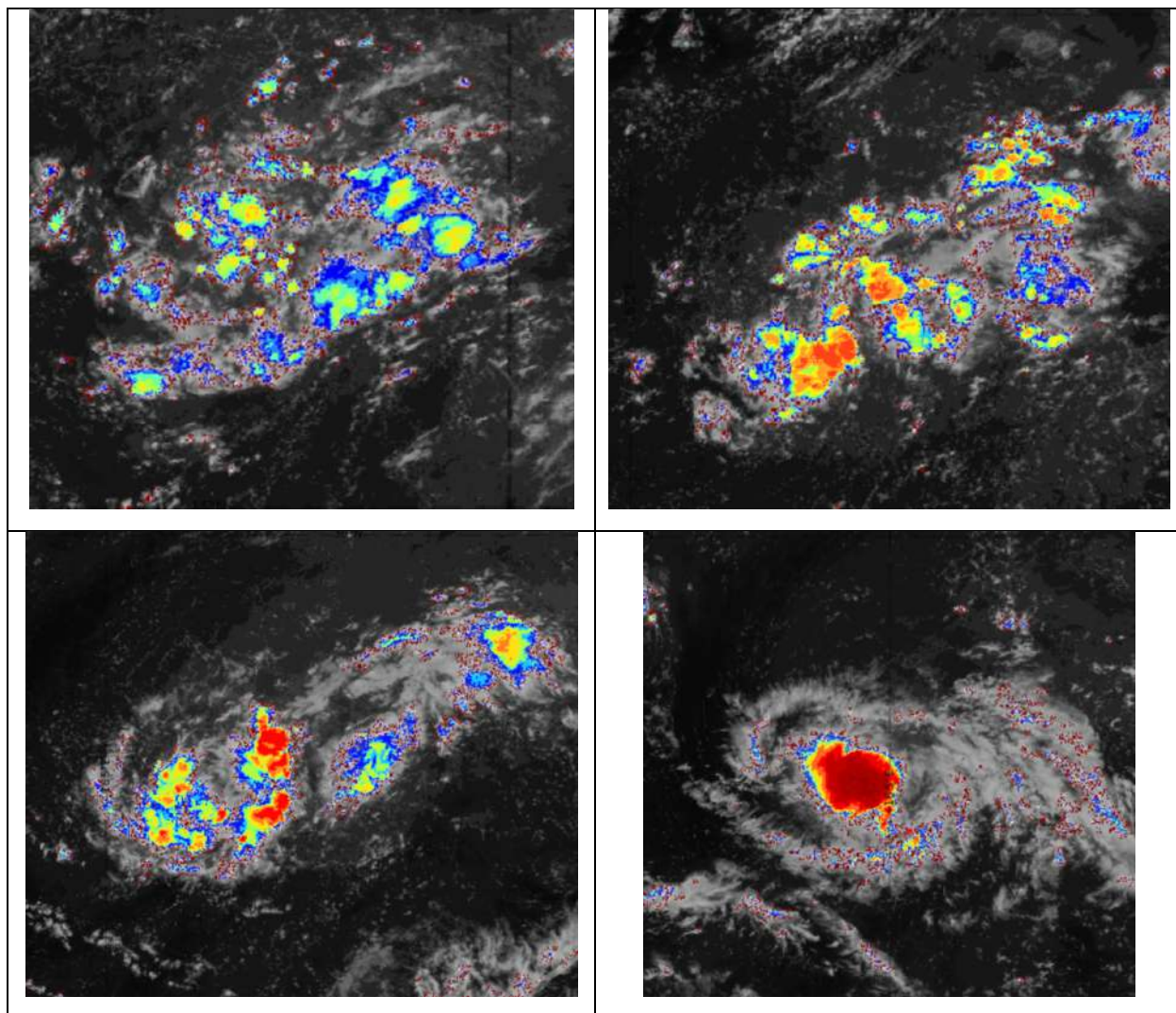


Рис. 3.1.2.1. Развитие тропического циклона «Ногури» до стадии тропической депрессии с 15.09.25 00 UTC до 17.09.25 00 UTC с шагом в сутки и с 17.09.25 00 UTC до 18.09.25 06 UTC

На композитном изображении за 18 сентября 06:00 UTC (Рис. 3.1.2.2) облачный кластер имеет асимметричную форму, центральная плотная облачность наблюдается, но глаз не выражен. Инфракрасный канал 10.4 мкм (Рис. 3.1.2.2а) показывает компактный, сплошной конвективный кластер без выраженной ячеистой структуры. На усиленном инфракрасном канале 10.4

мкм (Рис. 3.1.2.2б) в пределах этого кластера фиксируются яркостные температуры до $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$, что уверенно идентифицирует его как область глубокой конвекции. Наложение модельного поля ветра на уровне 850 гПа (Рис. 3.1.2.2б) выявляет начавшееся формирование замкнутой циркуляции: вокруг общего центра ветры демонстрируют характерную для Северного полушария направление против часовой стрелки. Важнейшим отличием от атлантического случая является термический фон: по данным слоя Sea Surface Temperature уже на этапе генезиса циклон находился над водами с температурой $29 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно превышает пороговое значение $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ и создаёт исключительно благоприятные условия для быстрой интенсификации.

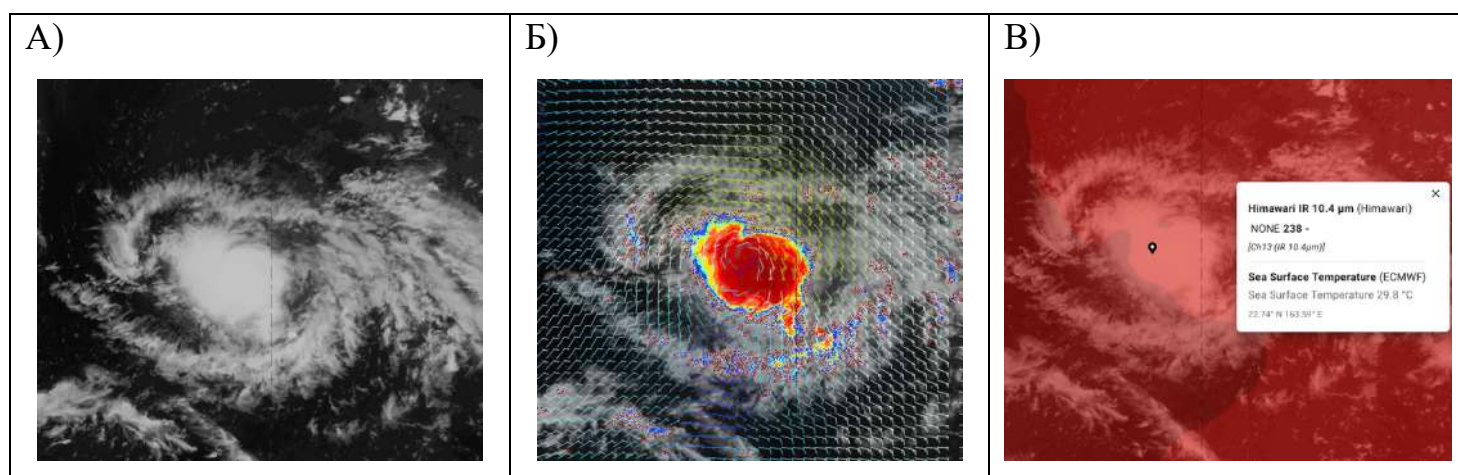


Рис. 3.1.2.2. Снимки тайфуна «Ногури» за 18.09.25 06 UTC: а) Инфракрасный диапазон; б) Снимок в инфракрасном диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом; в) Наложение снимка в ИК диапазоне на модельное поле ТПО

В течение 19 сентября система, оставаясь в области экстремально тёплой воды, продолжала развиваться. На снимках за 19 сентября 12:00 UTC (Рис. 3.1.2.3) облачный кластер увеличился в размерах и приобрёл более организованную структуру. При этом минимальная яркостная температура в его пределах составила около $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует умеренно-сильной

конвекции. Область с температурой ниже -73°C , маркирующая глубокую конвекцию, занимала лишь незначительную часть кластера. Несмотря на общее усиление конвективной активности, области с наиболее низкими яркостными температурами (ниже -73°C), соответствующие наиболее мощным восходящим потокам, оставались сосредоточенными в ограниченной части облачного кластера и ещё не формировали сплошное симметричное кольцо глубокой конвекции вокруг центра циркуляции. Днём 20 сентября, к 12:00 UTC, центральный плотный облачный кластер приобрёл выраженную симметрию, а на усиленном инфракрасном снимке 10.4 мкм минимальная температура достигла -75°C . В центральной части кластера как на обычном, так и на усиленном инфракрасном изображении начинает прослеживаться глаз — пока ещё не полностью ясный, но уверенно идентифицируемый по характерному тёмному пятну в окружении холодного кольца (Рис. 3.1.2.4). Появление глаза указывало на быстрое усиление системы и её переход к стадии тайфуна. На композите Airmass RGB (Рис. 3.1.2.4в) обращает на себя внимание присутствие оранжево-коричневых пятен вокруг формирующегося вихря, что указывает на наличие областей более сухого воздуха. В отличие от ситуации с ураганом «Эрин», где сухие вторжения сахарского происхождения наблюдались на ранних стадиях и временно сдерживали развитие, у «Ногури» сухой воздух присутствует в виде локальных включений и не препятствует быстрому усилению системы.

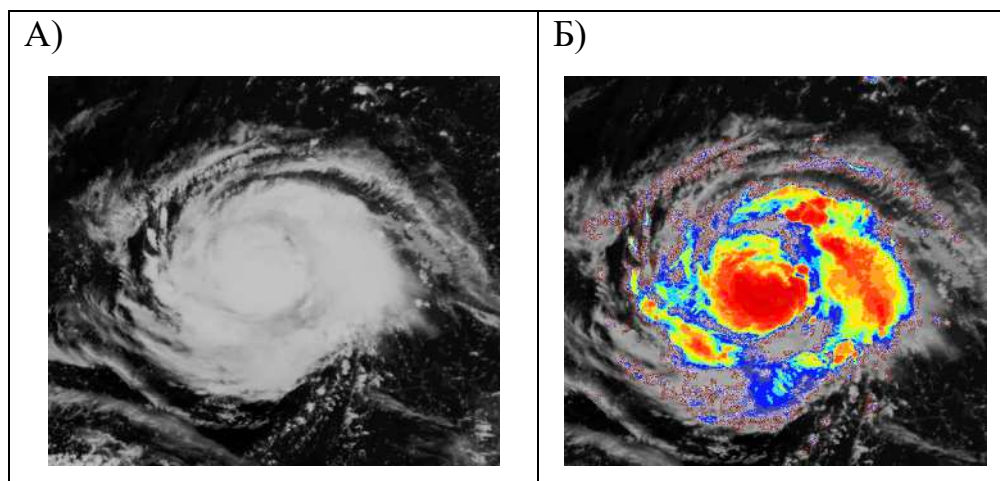


Рис. 3.1.2.3. Снимки тайфуна «Ногури» за 19.09.25 12 UTC: а) Инфракрасный диапазон; б) Снимок в инфракрасном диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом

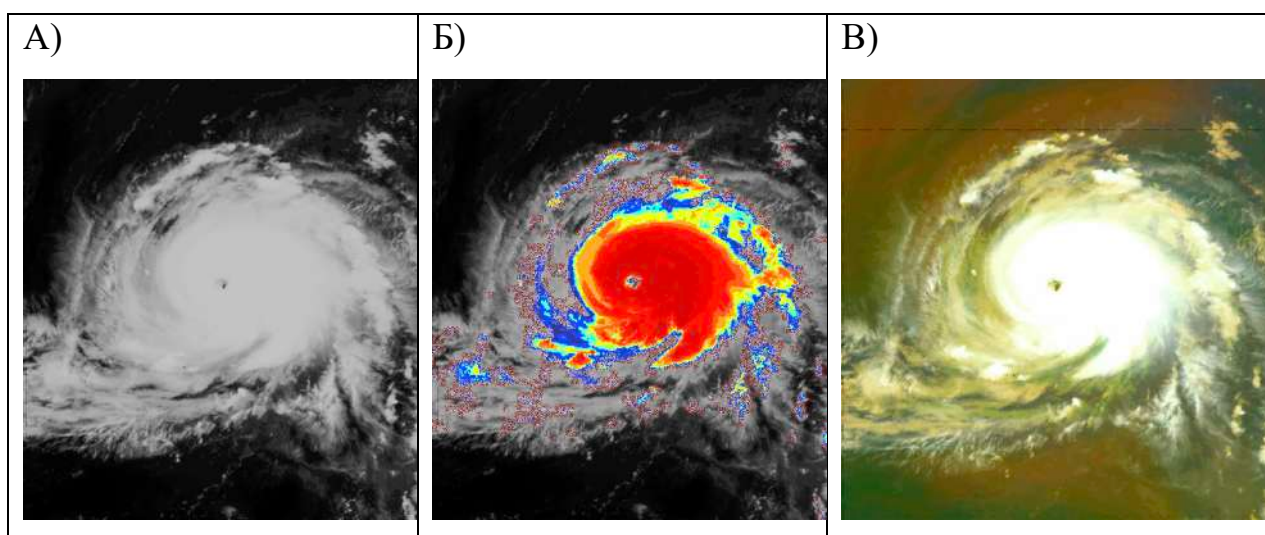


Рис. 3.1.2.4. Снимки тайфуна «Ногури» за 20.09.25 12 UTC: а) Инфракрасный диапазон; б) Снимок в инфракрасном диапазоне с наложенным усиленным инфракрасным каналом; в) Снимок с композитом Airmass

Вечером 20 сентября началась фаза взрывной интенсификации. В период с 18:00 UTC 20 сентября до 06:00 UTC 21 сентября тайфун прошёл путь от сильного тропического шторма до супертайфуна 4-й категории по шкале Саффира–Симпсона. Анализ выполнен с привлечением RGB-компози

Convection RGB (доступного в дневные часы по Японскому времени, с 21 до 09 UTC), усиленного инфракрасного канала 10.4 мкм и Airmass RGB.

К 21:00 UTC 20 сентября глаз стал полностью ясным и чётко очерченным. На композите Convection RGB за этот срок (Рис. 3.1.2.5а) вокруг глаза визуализируется кольцо розово-жёлтых оттенков, указывающее на начальную стадию накопления мелких ледяных кристаллов в вершинах кучево-дождевых облаков. К 00:00 UTC 21 сентября, с дальнейшим усилением конвекции, на Convection RGB (Рис. 3.1.2.5б) кольцо приобретает характерный яркий жёлто-оранжевый цвет — признак интенсивной глубокой конвекции с обильным образованием мелкого льда, типичный для фазы быстрой интенсификации перед выходом на пик.

Взрывная интенсификация продолжилась в ночные часы. К 00:00 UTC 21 сентября усиленный инфракрасный канал (Рис. 3.1.2.5в) фиксировал дальнейшее понижение температуры в стене глаза. В этот срок был выполнен замер диаметра глаза с помощью инструмента Measure: он составил 26 км (Рис. 3.1.2.5г). По данным модельного поля ветра на уровне 850 гПа, максимальная скорость ветра вблизи центра достигала 141 км/ч, однако циклон ещё не достиг максимальной интенсивности. К 03:00 UTC глаз сохранял чёткость, а конвективное кольцо оставалось симметричным.

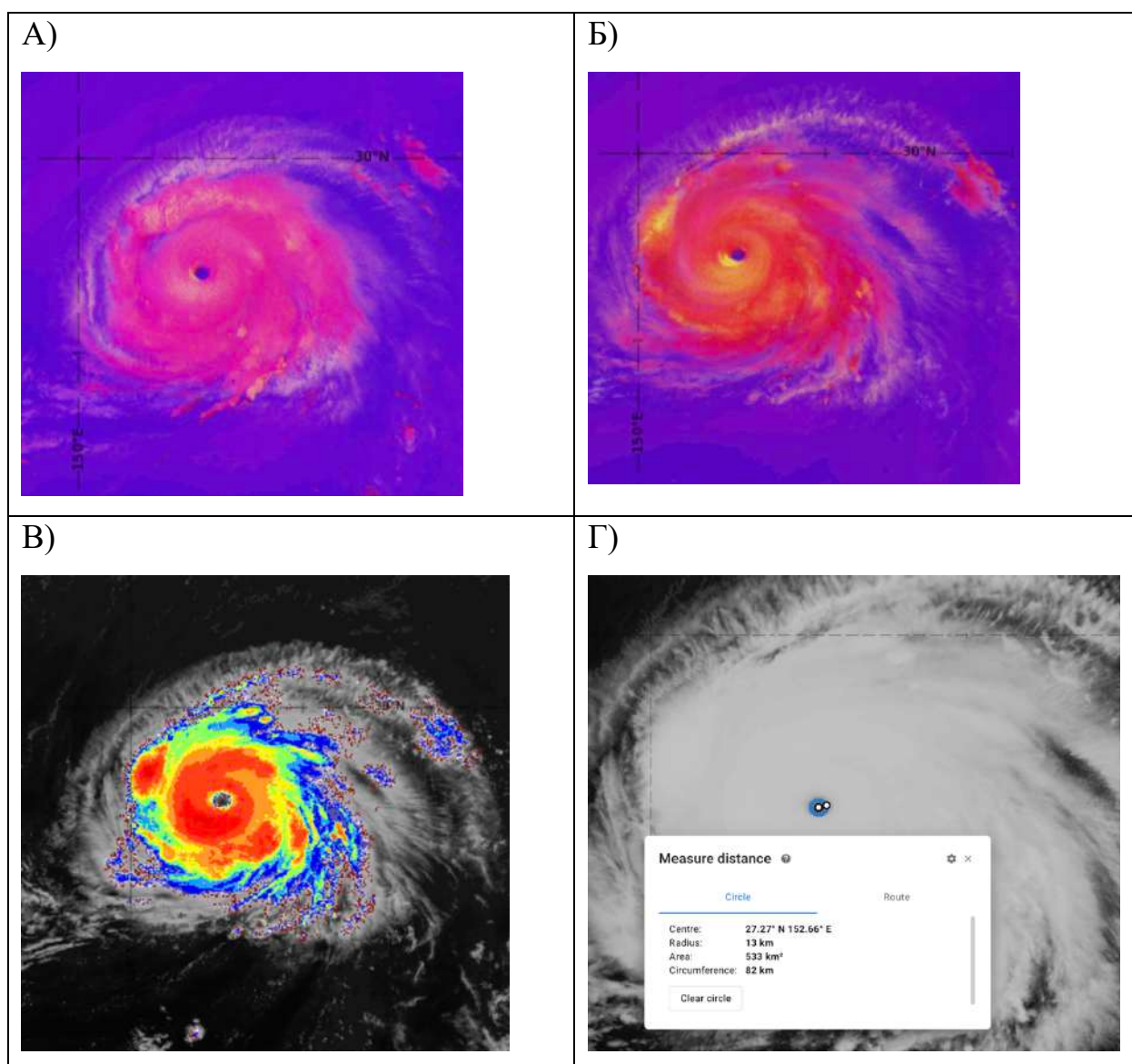


Рис. 3.1.2.5. Снимки тайфуна «Ногури»: а) Convection RGB за 20.09.2025 21:00 UTC; б) Convection RGB за 21.09.2025 00 UTC; в) Усиленный инфракрасный канал за 21.09.2025 00 UTC; г) Инфракрасный канал за 21.09.2025 00 UTC с наложением инструмента Measure

Наиболее интенсивным «Ногури» стал к 06:00 UTC 21 сентября. По данным JTWC, максимальный устойчивый ветер достиг 232 км/ч, а минимальное центральное давление, согласно JMA, упало до 920 гПа. На усиленном инфракрасном снимке за этот срок (Рис. 3.1.2.6б) стена глаза симметрична, минимальная яркостная температура в ней опускается до -73°C — экстремально низкого значения, указывающего на очень мощные

восходящие потоки, достигающие тропопаузы. Airmass RGB на момент пика (Рис. 3.1.2.6в) фиксирует область сухого воздуха, окаймляющую облачный массив тайфуна. В северном и северо-восточном секторах преобладают области оранжево-коричневых оттенков, соответствующие холодному сухому воздуху в средней и верхней тропосфере. В южном направлении прослеживается полоса болотно-зелёного оттенка — сигнатура тёплой сухой воздушной массы в верхней тропосфере, которая ближе к юго-юго-западу переходит в оранжево-коричневую гамму. Указанные цветовые области локализованы на периферии облачного щита и выраженные радиальные каналы оттока прослеживаются неотчётливо. Такая конфигурация свидетельствует о том, что сухой воздух огибал зону глубокой конвекции, а не выносился непосредственно из неё, что может указывать на асимметричный характер оттока или его частичное блокирование. Наложение модельного поля ветра на уровне 250 гПа фиксирует скорость оттока порядка 20–25 м/с. К 12:00 UTC 21 сентября глаз начал терять чёткость вследствие заполнения его центральной части низкой облачностью.

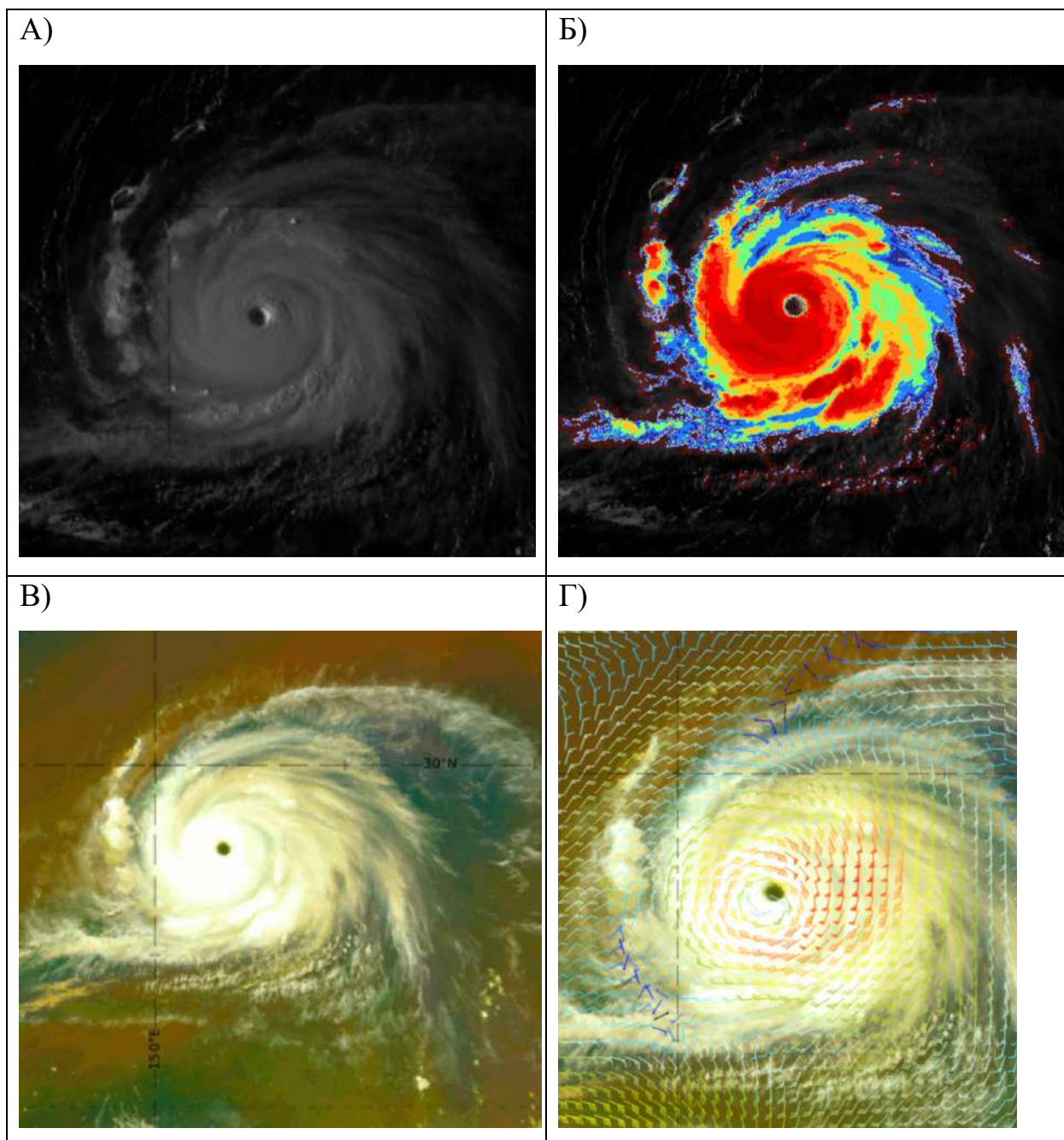


Рис. 3.1.2.6. Снимки тайфуна «Ногури» за 21.09.25 06 UTC: а) Снимок в видимом диапазоне; б) Снимок в видимом диапазоне с наложением усиленного инфракрасного канала; в) Airmass RGB; г) Airmass RGB с наложением модельного поля ветра

К 09:00 UTC 22 сентября глаз тайфуна полностью исчез с инфракрасных изображений. Облачная система приобрела форму, напоминающую запятую, а глубокая конвекция сосредоточилась в одном секторе (Рис. 3.1.2.7а). В

последующие часы минимальная температура вершин повысилась до $-50...-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, а к 18:00 UTC появились отдельные красные пятна с $-65...-68\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствовало о цикле замены стенки глаза — старое кольцо разрушалось, а новое ещё не сформировалось окончательно.

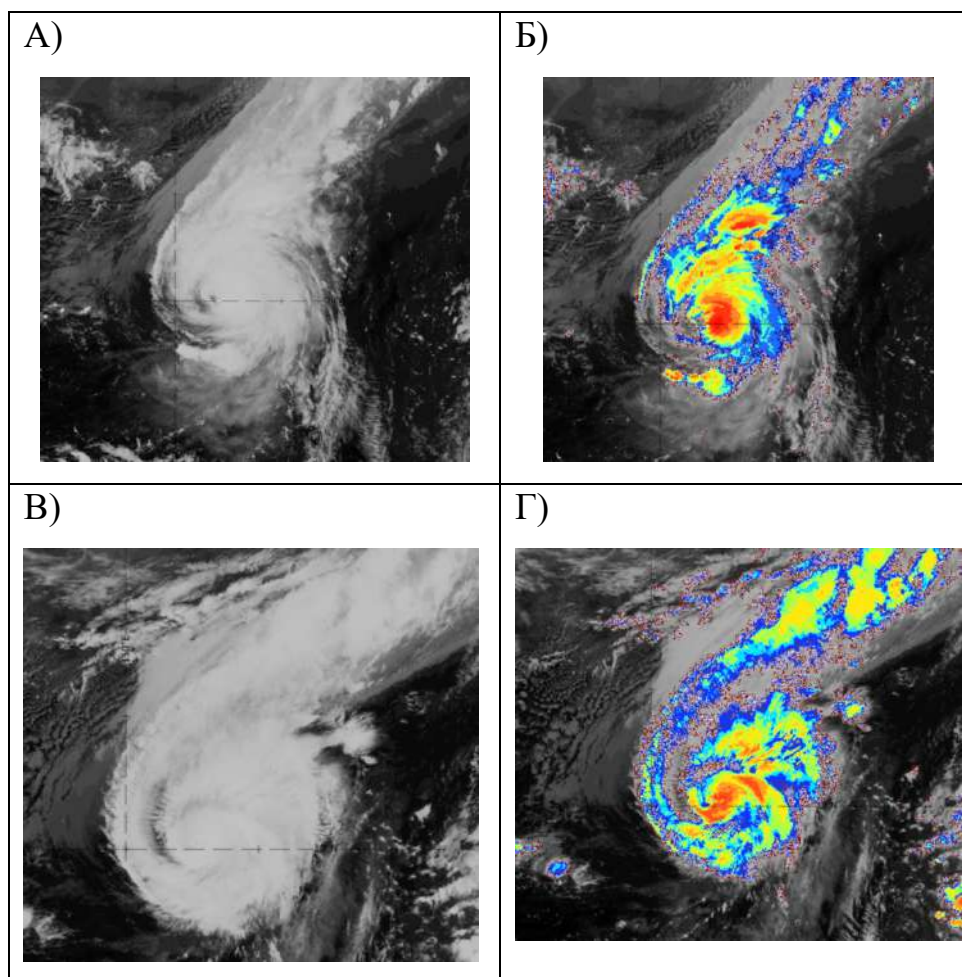


Рис. 3.1.2.7. Снимки тайфуна «Ногури»: а) Инфракрасный диапазон за 22.09.25 09 UTC; б) Наложение усиленного ИК на инфракрасный диапазон за 22.09.25 09 UTC; в) Инфракрасный диапазон за 22.09.25 18 UTC; г) Наложение усиленного ИК на инфракрасный диапазон за 22.09.25 18 UTC

К 06:00 UTC 23 сентября максимальная скорость ветра снизилась до 107 км/ч. При этом термический потенциал океана оставался высоким: температура поверхности воды по данным слоя Sea Surface Temperature в ePort

составляла около $28,3^{\circ}\text{C}$. На Airmass RGB в этот период наблюдались оранжево-коричневые пятна с юго-запада и юга, указывающие на вторжение сухого воздуха в среднюю и верхнюю тропосферу, что, вероятно, препятствовало восстановлению симметричной структуры (Рис. 3.1.2.8).

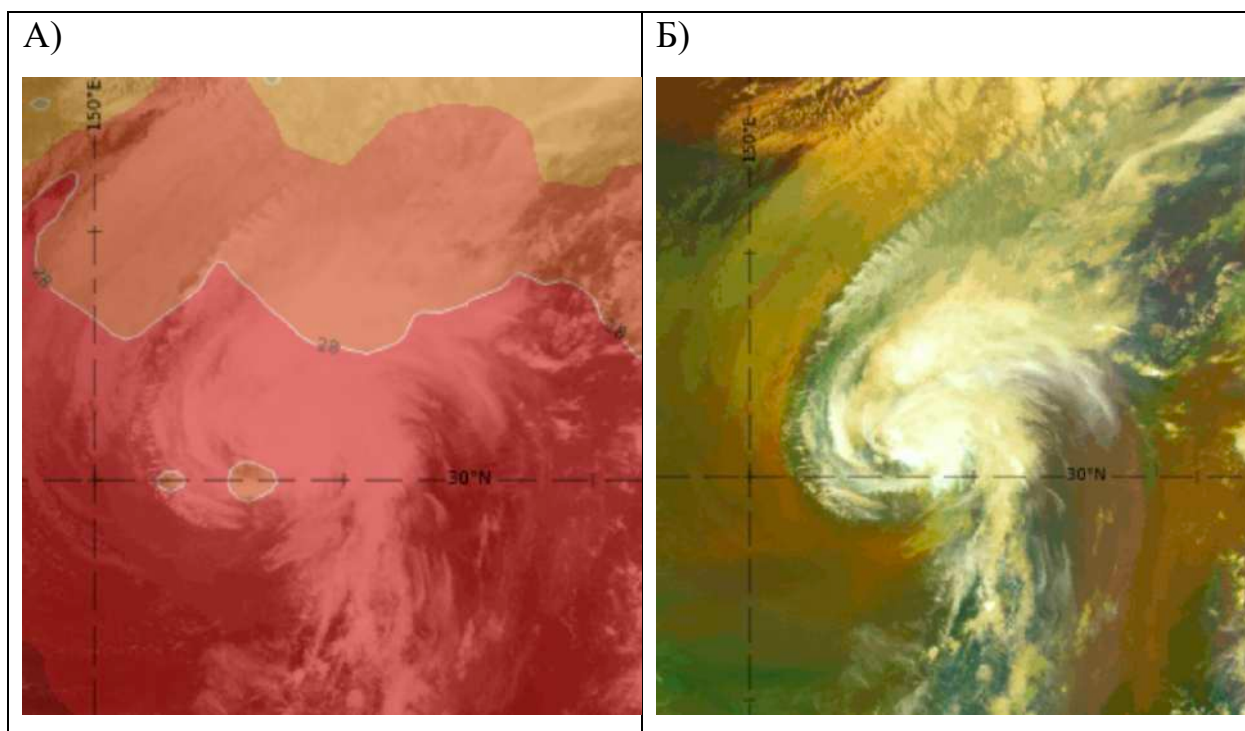


Рис. 3.1.2.8. Анализ внешних факторов на изменение циклона за 23.09.25 06 UTC: а) Наложение инфракрасного диапазона на модельное поле ТПО; б) Композит Airmass RGB

Спустя полтора суток после разрушения старой стены глаза, 24 сентября в 03:00 UTC, на усиленном инфракрасном снимке вновь образовалась обширная область с температурой около -70°C . В течение трёх часов она разрасталась, однако сохраняла асимметричную форму, и неустойчивый характер конвекции не позволял системе восстановить организованную структуру. Подобные колебания интенсивности наблюдались на протяжении нескольких суток.

Лишь к 15:00 UTC 27 сентября циклон приобрёл более симметричную структуру. На усиленном ИК-снимке в этот срок обозначился глаз — пока не

полностью чёткий, с температурой около -50°C , различимый как тёмное пятно в центре центрального плотного облачного кластера.

Спустя ещё двенадцать часов, к 03:00 UTC 28 сентября, глаз стал значительно более ясным, хотя и сохранял лёгкую асимметрию. Его диаметр, измеренный инструментом Measure, составил около 24 км (Рис. 3.1.2.9б). Температура поверхности океана под циклоном в этот момент равнялась 27°C , а вертикальный сдвиг ветра оставался слабым. На композите Convection RGB, полученном в тот же дневной срок (03:00 UTC входит в интервал доступности композита 21–09 UTC), вокруг глаза прослеживалось кольцо жёлто-оранжевых оттенков (Рис. 3.1.2.9в), аналогичное тому, что фиксировалось на первом пике. Эта сигнатура подтверждала восстановление глубокой конвекции с мелкими ледяными частицами на вершинах облаков.

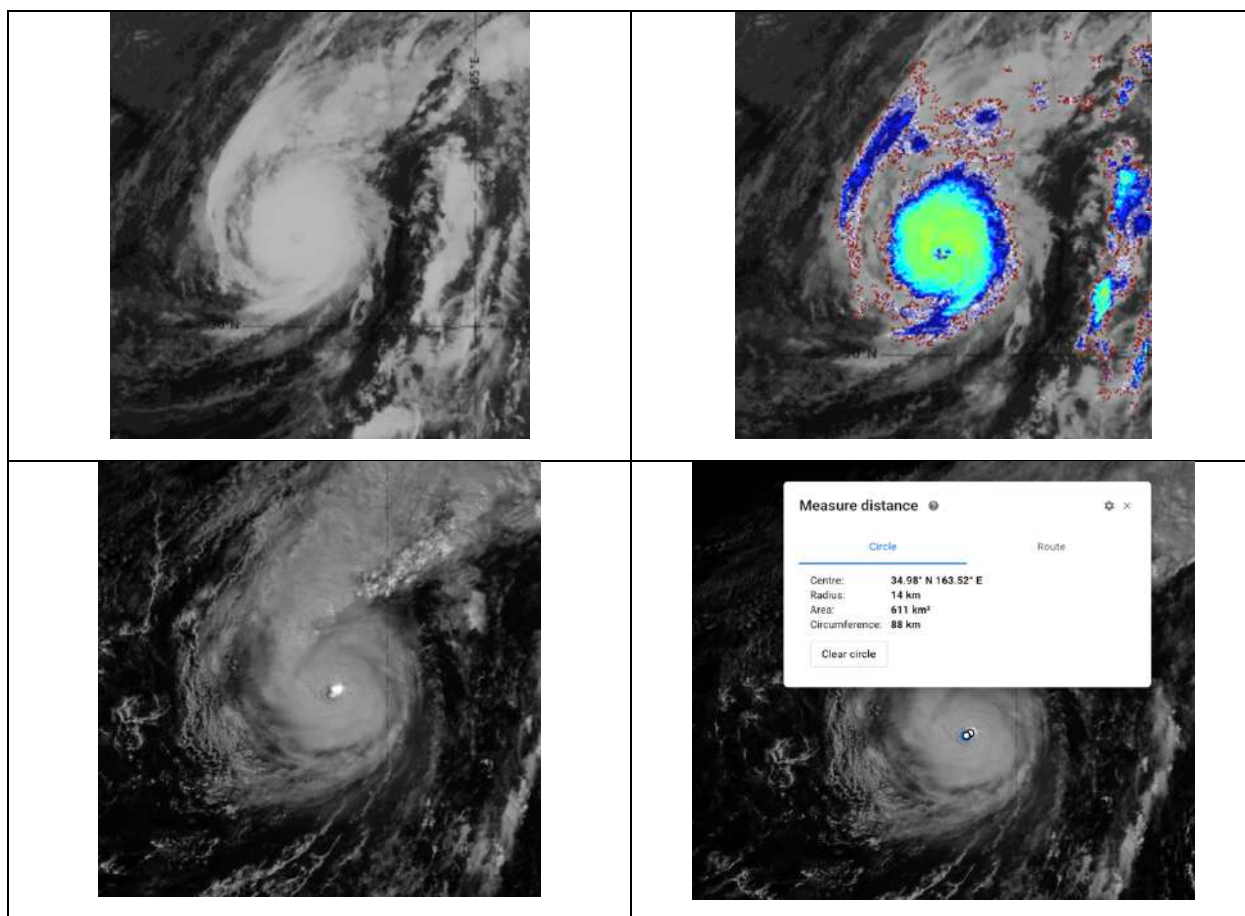


Рис. 3.1.2.9. Возникновение «глаза» 27.09.25 15 UTC и его дальнейшее развитие к 28.09.25 03 UTC

К 12:00 UTC 28 сентября тайфун достиг вторичного максимума интенсивности: скорость ветра возросла до 204 км/ч, а давление снизилось до 947 гПа. Однако уже через шесть часов, к 18:00 UTC, глаз исчез с инфракрасных изображений, а температура воды под вихрем упала до 21 °С. Лишённый термической поддержки, циклон начал быстро терять тропические свойства.

В течение следующих суток, 29 сентября, облачный массив «Ногури» вытягивался, глубокая конвекция сократилась до отдельных пятен, и система приобрела классическую запятовидную форму, характерную для внетропического шторма. К 00:00 UTC 30 сентября организованная глубокая конвекция полностью исчезла: на инфракрасных снимках преобладали оранжевые и зелёные оттенки, соответствующие температуре не ниже –40...–50 °С. Остатки облачности вытянулись в узкую полосу, напоминающую перо (Рис. 3.1.2.10г).

Таким образом, жизненный цикл тайфуна «Ногури» характеризовался сложной структурной эволюцией: многократными флуктуациями интенсивности, циклом замены стенки глаза и редкой повторной интенсификацией в высоких широтах над аномально тёплой водой. Использование спутниковых данных в ePort позволило детально проследить все стадии, включая динамику глаза, изменения температуры конвективных вершин и взаимодействие с крупномасштабным окружением.

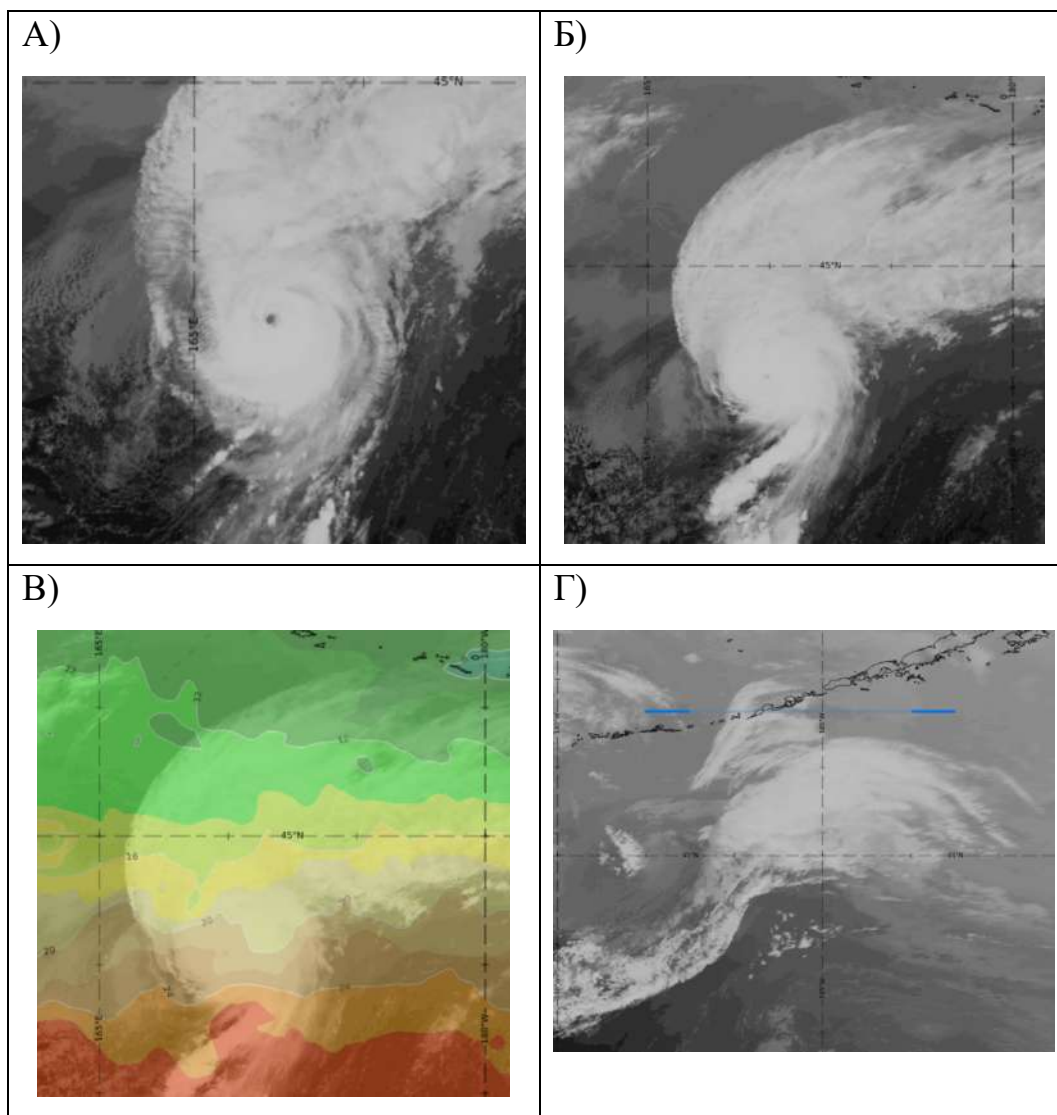


Рис. 3.1.2.10. Внетропический переход «Ногури»

3.2. Оценка синоптических условий и полей ветра по модельным данным ECMWF на платформе ePort Pro

Для анализа полей ветра и оценки крупномасштабных факторов, определявших эволюцию циклонов, использовались доступные в ePort Pro слои численных прогнозов ECMWF. Скорость и направление приземного ветра оценивались по модельному полю Wind Barbs на уровне 850 гПа. Структура высотного оттока и вертикальный сдвиг ветра анализировались с

привлечением полей геопотенциала (Geopotential Height) на уровнях 500 и 250 гПа, а также поля ветра на изобарических поверхностях.

Для каждого циклона были построены композитные карты на моменты максимальной интенсивности, совмещающие усиленный ИК-канал с изобарами Mean Sea Level Pressure, векторами ветра и изотермами Sea Surface Temperature. Сравнение этих карт показывает, что урагану Эрин в пике свойственно компактное поле ураганных ветров: зона максимальных скоростей сосредоточена в узком кольце вокруг глаза. У тайфуна Ногури, напротив, поле ветра заметно асимметрично и вытянуто в северном направлении, что, вероятно, связано с его взаимодействием со среднеширотным струйным течением.

Анализ вертикального сдвига ветра, выполненный путём сопоставления модельных полей ветра на 850 и 250 гПа, подтвердил, что взрывная интенсификация Эрин 15–16 августа происходила при очень слабом сдвиге (менее 5 м/с). У Ногури в начале его жизненного цикла сдвиг также был минимален, однако к 28 сентября, перед внетропическим переходом, он резко возрос до 20 м/с, что хорошо согласуется с началом асимметризации облачного щита, зафиксированной на Airmass RGB.

Карты Sea Surface Temperature показали, что оба циклона на стадии усиления находились над водами с температурой выше 28 °С. При этом Ногури, в отличие от Эрин, сохранял контакт с тёплой поверхностью (26–27 °С) даже на 38° с.ш., что и обеспечило его уникальную повторную интенсификацию.

3.3. Сравнительная таблица и обсуждение результатов.

Систематизация количественных характеристик и визуальных признаков, полученных в ходе анализа эволюции урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури», позволяет провести непосредственное сопоставление двух

циклонов и оценить влияние региональных факторов на их жизненный цикл. Основные параметры сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Сравнительные характеристики урагана «Эрин» и тайфуна «Ногури»

Критерий	Эрин	Ногури	Примечание
Начало быстрой интенсификации	15–16 августа, при выходе на воды с ТПО > 28 °С	Вечер 20 сентября, над водами с ТПО 29–30 °С	У обоих циклонов интенсификация инициирована попаданием в термически богатую акваторию
Минимальное давление (гПа)	913	920	Оба циклона достигли экстремально низкого давления
Максимальный устойчивый ветер (км/ч)	260	232	Эрин достиг пятой категории, Ногури дошел лишь до четвертой
Наличие глаза на пике	Чистый, круглый, диаметр 14 км	Чистый, овальный, диаметр 26 км	У Эрина глаз компактнее, Ногури крупнее, но асимметричнее
Минимальная температура стены глаза	–70°С	–73°С	У обоих зафиксирована глубокая конвекция, у Ногури вершины несколько холоднее
Симметричность облачного щита	Симметричен на пике, двусторонний отток	Симметричен на пике, отток имел признак асимметрии (сухой воздух огибал конвективный кластер)	Более выраженный отток у Эрина

Сухие вторжения (по Airmass RGB)	Выражены на ранних стадиях, временно сдерживали развитие	Локальные оранжево-коричневые пятна, не препятствовали усилению	В Атлантике сухой воздух играл роль подавляющего фактора, в Тихом океане нет
Присутствие вторичного пика	Да (до 4-й категории, глаз 40 км)	Да (до 3-й категории, глаз 24 км)	У обоих циклонов наблюдалась повторная интенсификация, но у Ногури она произошла в аномально высоких широтах (40 с.ш.)
Внетропический переход	22–24 августа, классическая запятовидная форма, вовлечение в струйное течение	29–30 сентября, вытянутая форма	Оба циклона завершили жизненный цикл внетропическим переходом при взаимодействии с бароклинной зоной

Представленные в таблице данные показывают, что, несмотря на общность ключевых стадий развития — тропическая депрессия, шторм, быстрая интенсификация, зрелость с глазом, внетропический переход, — региональные условия оказали существенное влияние на эволюцию каждого вихря.

Атлантический ураган «Эрин» развивался под воздействием сухого сахарского воздуха, который на ранних стадиях (11–13 августа) подавлял конвекцию и замедлял усиление. Выход в акваторию с аномально высокой температурой поверхности океана (выше 28 °C) 14–15 августа запустил взрывную интенсификацию, в результате которой циклон за сутки достиг пятой категории. Глаз при этом сформировался исключительно компактным (около 14 км) и чистым, а отток носил симметричный двухсторонний характер. После цикла замены стенки глаза произошло вторичное усиление до четвёртой

категории, причём диаметр глаза увеличился до 40 км. Внетропический переход сопровождался классической запятовидной деформацией облачного щита и усилением струйного течения (более 50 м/с).

Тихоокеанский тайфун «Ногури» с самого начала находился над экстремально тёплой водой (29–30 °C) и, несмотря на локальные очаги сухого воздуха, быстро достиг статуса тайфуна. Быстрая интенсификация 20–21 сентября привела к образованию глаза диаметром около 26 км с температурой стены до –73 °C. Отток на пике был менее симметричен, чем у «Эрин»: сухой воздух огибал конвективное ядро, а не выносился радиально. Последовавший цикл замены стенки глаза сопровождался длительным периодом флуктуаций интенсивности, однако высокая теплоёмкость океана (ТПО около 27 °C даже вблизи 38° с.ш.) обеспечила редкую повторную интенсификацию 28 сентября с формированием ясного глаза диаметром 24 км и ветрами до 204 км/ч. Внетропический переход произошёл 29–30 сентября над более холодными водами, и облачная система, пройдя стадию запятовидной формы, вытянулась в узкую полосу.

Таким образом, выполненный сравнительный анализ демонстрирует, что при общей последовательности стадий жизненного цикла тропических циклонов конкретные характеристики — темпы интенсификации, размер и чистота глаза, степень симметрии оттока, способность к повторному усилению — в значительной мере определяются региональным термическим режимом океана, наличием или отсутствием сухих вторжений и особенностями крупномасштабной циркуляции. Применение единого инструмента ePort Pro позволило получить сопоставимые количественные оценки и наглядно выявить эти различия.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведён сравнительный анализ жизненного цикла и структурных характеристик двух тропических циклонов — урагана «Эрин» в Северной Атлантике и тайфуна «Ногури» в северо-западной части Тихого океана, развивавшихся в 2025 году. Исследование выполнено на основе геостационарных спутниковых данных спутников GOES-East и Himawari, а также модельных полей ECMWF, визуализированных и обработанных исключительно в среде аналитического веб-инструмента ePort Pro образовательного портала EUMETrain.

В теоретической части работы рассмотрены физические механизмы формирования и развития тропических циклонов, особенности их внутренней структуры и жизненного цикла, а также региональные особенности циклогенеза в Атлантическом и Тихоокеанском бассейнах. Выполнен анализ современных спутниковых методов мониторинга и возможностей платформы EUMETrain как инструмента для дистанционного исследования атмосферных процессов.

В методической части разработана и апробирована воспроизводимая методика сравнительного анализа тропических циклонов, основанная на совместном использовании многоспектральных спутниковых изображений и модельных полей атмосферы. Методика включает применение видимых и инфракрасных каналов, каналов водяного пара, RGB-композиций Convection RGB и Airmass RGB, а также анализ полей давления, ветра, геопотенциала и температуры поверхности океана. Разработаны унифицированные критерии оценки структуры циклонов, позволяющие выполнять сопоставление систем, развивающихся в различных океанических бассейнах.

Практический анализ показал, что ураган «Эрин» характеризовался классическим сценарием развития атлантического циклона: зарождением из африканской восточной волны, временным ослаблением под влиянием сухого воздуха и последующей быстрой интенсификацией до максимальной

интенсивности категории 5. Эволюция системы сопровождалась формированием компактного глаза, циклом замены стенки глаза и последующим внетропическим переходом.

Тайфун «Ногури» продемонстрировал более сложную динамику развития, включавшую несколько фаз ослабления и повторного усиления, продолжительный цикл замены стенки глаза и редкую повторную интенсификацию в субтропических широтах. Анализ показал, что развитие системы происходило в условиях устойчиво высоких температур поверхности океана и слабого вертикального сдвига ветра, что способствовало поддержанию интенсивной конвекции на протяжении длительного периода.

Сравнительный анализ показал, что при общности основных стадий жизненного цикла региональные особенности окружающей среды оказывают существенное влияние на характер эволюции тропических циклонов. Для Атлантического бассейна значимым ограничивающим фактором выступали вторжения сухого воздуха, тогда как для северо-западной части Тихого океана определяющее значение имели повышенные температуры поверхности океана и благоприятные динамические условия, обеспечившие более продолжительную и сложную эволюцию циклона.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной методики, полностью реализуемой в браузерной среде ePort Pro без использования специализированного программного обеспечения. Работа показывает, что инструментарий платформы EUMETrain позволяет выполнять полноценный спутниковый анализ тропических циклонов и может использоваться как в учебно-исследовательской деятельности, так и при подготовке специалистов в области спутниковой метеорологии, дистанционного зондирования атмосферы и синоптического анализа.

Таким образом, поставленная цель работы достигнута, а все сформулированные задачи выполнены. Разработанная методика сравнительного анализа показала возможность проведения комплексных

исследований тропических циклонов исключительно на основе открытых спутниковых данных и веб-инструментов визуализации.

Список литературы

1. Аксентьев, В. Е. Дистанционное зондирование атмосферы из космоса / В. Е. Аксентьев. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2008. – 242 с.
2. Герман, М. А. Космические методы исследования в метеорологии : учебник / М. А. Герман. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.
3. Гинзбург, А. С. Спутниковая метеорология и мониторинг атмосферы / А. С. Гинзбург. – Москва: МГУ, 2010. – 284 с.
4. Кондратьев, К. Я. Космическая метеорология / К. Я. Кондратьев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 312 с.
5. Риль, Г. Климат и погода в тропиках / Г. Риль ; пер. с англ. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 368 с.
6. Тараканов, Г. Г. Тропическая метеорология : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Тараканов. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. – 175 с.
7. Хромов, С. П. Метеорология и климатология : учебник / С. П. Хромов, М. А. Петросянц. – 7-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 2006. – 582 с.
8. Шакина, Н. П. Спутниковая информация в анализе атмосферных процессов / Н. П. Шакина. – Москва: Изд-во Московского университета, 2008. – 198 с.
9. Atkinson, G. D. Forecaster's Guide to Tropical Meteorology [Электронный ресурс] / G. D. Atkinson; rev. by C. S. Ramage. – 2nd ed. – 1991. – Режим доступа: <https://www.weathergraphics.com/dl/tropicalmeteorology.pdf> (дата обращения: 23.05.2026).
10. Dvorak, V. F. Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data / V. F. Dvorak // NOAA Technical Report. – Washington, 1984. – 47 p.
11. Emanuel, K. A. Tropical Cyclones / K. A. Emanuel // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2003. – Vol. 31. – P. 75–104.
12. EUMETNET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eumetnet.eu> (дата обращения: 23.05.2026).

- 13.EUMETSAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.eumetsat.int> (дата обращения: 23.05.2026).
- 14.EUMeTrain. ePort PRO: Satellite Image Viewer and Data Hub
[Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.eumetrain.org/eport.html> (дата обращения: 23.05.2026).
- 15.EUMeTrain. User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.eumetrain.org/user-manual> (дата обращения: 26.05.2026).
- 16.Holland, G. J. Tropical Cyclone Motion: Environmental Interaction Plus a
Beta Effect / G. J. Holland // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1983. –
Vol. 40. – P. 328–342.
- 17.Japan Meteorological Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.jma.go.jp/jma/index.html> (дата обращения: 23.05.2026).
- 18.JAXA/EORC Tropical Cyclone Database [Электронный ресурс]. – Режим
доступа: [https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-
bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=e&area=WP](https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=e&area=WP) (дата обращения: 15.05.2026).
- 19.Joint Typhoon Warning Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.agwx.uky.edu/ldmdata/public/severe/WTPQ33.PGUM> (дата
обращения: 27.05.2026).
- 20.National Hurricane Center. Hurricane Erin Advisory 29A: Intermediate
Advisory, Monday, August 18, 2025, 2:00 PM EDT [Электронный ресурс].
– Режим доступа:
[https://www.nhc.noaa.gov/uscg/USCG_District7/HRCNErinSEDistrictUSC
G-Aug18PM.pdf](https://www.nhc.noaa.gov/uscg/USCG_District7/HRCNErinSEDistrictUSC
G-Aug18PM.pdf) (дата обращения: 23.05.2026).
- 21.Pasch, R. J. Tropical Cyclone Report: Hurricane Erin (AL052025)
[Электронный ресурс] / R. J. Pasch, A. D. Mahoney. – Version corrected, 30
January 2026. – Режим доступа:
https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL052025_Erin.pdf (дата обращения:
26.05.2026).
- 22.Velden, C. et al. The Dvorak Tropical Cyclone Intensity Estimation
Technique: A Satellite-Based Method that Has Endured for Over 30 Years / C.

Velden, B. Harper, F. Wells [и др.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2006. – Vol. 87. – P. 1195–1210.