



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
(магистерская диссертация)

На тему: «Типизация сценариев развития тропических циклонов на
основе спутниковых данных»

Исполнитель Окандз Грас Дорел
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«01» 06 мая 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Теоретические основы и методы исследования	4
1.1. Физические принципы образования и эволюции тропических циклонов.....	4
1.2. Структура тропических циклонов	16
1.3. Классификация и стадии развития	17
1.4. Современные методы спутникового мониторинга	26
1.5. Методика оценки скорости ветра по снимкам.....	29
1.6 Метод Хьюберта	31
1.7 Метод Дворжака.....	33
1.8 Анализ погрешностей метода Хьюберта по категориям циклонов	34
1.9 Анализ погрешностей метода Дворжака по категориям циклонов	35
Глава 2. Используемые данные и регион исследования	38
2.1. исследование тропические циклоны в Атлантическом океане	38
2.2. предсказывать путь тропических циклонов	39
2.3. Влияние точности предсказания траектории.....	40
2.4. Описание региона исследования.....	41
2.5. Механизмы тропического циклогенеза (юго-западной части Индийского океана)	43
2.6. Муссонная депрессия, колебания Мэддена-Джулиана и экваториальные волны	47
2.7. Характеристика использованных данных.....	51
Глава 3. Результаты анализа и типизация сценариев	52
3.1. Анализ траекторий и плотности циклонов.....	52
3.2. Результаты кластеризации сценариев эволюции	57
3.2.1 Сценарий 1: Быстрая интенсификация над теплым ядром	57
3.2.2 Сценарий 2: Ослабление из-за сильного сдвига ветра	60
3.2.3. Сценарий 3: Циклическая смена (обновление) стенки глаза	63
3.2.4. Сценарий 4: Разрушение структуры при взаимодействии с орографией.....	66
3.3. Иллюстрация выделенных сценариев на примерах тропических циклонов	69
3.3.1. Ураган Мария (2017).....	69
3.3.2. Ураган Флоренс (2018) и циклон Бени (2003).....	71
3.3.3. Циклон Джованна (2012)	74
Глава 4. Влияние крупномасштабных процессов	77
4.1. Связь циклонов с циркуляцией атмосферы (Северо-Атлантическое колебание, Эль-Ниньо)	77
Заключение	83

Тропические циклоны играют важную роль в глобальной климатической системе, влияя на тропические и субтропические регионы посредством переноса тепла, испарения и океанического атмосферного обмена. Эти мощные погодные явления могут причинить значительный ущерб как социально-экономическому, так и экологическому характеру, приводя к наводнениям, разрушению имущества и гибели людей.

Однако точное прогнозирование их интенсивности и траектории остается серьезной проблемой. Сложность заключается в многофакторном характере процессов, управляющих их развитием, включающих сложные взаимодействия между теплом океанической воды, конвекцией, вращением Земли и другими атмосферными переменными. Эти многочисленные факторы затрудняют составление надежных краткосрочных и среднесрочных прогнозов.

В условиях этих вызовов спутниковые данные представляют собой важнейший ресурс. Обеспечивая глобальное, непрерывное и высокоточное покрытие, они являются основным источником информации о состоянии океана, внутренней структуре циклонов и их развитии. Их использование улучшает мониторинг, моделирование и прогнозирование тропических циклонов, тем самым способствуя более точному прогнозированию их последствий и разработке эффективных стратегий реагирования.

Проблема: Отсутствие единой классификации сценариев развития тропических циклонов, основанной на всестороннем анализе спутниковых данных, ограничивает возможности улучшения параметризации в метеорологических и климатических моделях. Этот пробел препятствует точности прогнозов и глубокому пониманию процессов, определяющих траекторию, интенсивность и продолжительность этих явлений.

Цель данной работы — выявление и характеристика типичных сценариев развития тропических циклонов с использованием многоканального спутникового мониторинга. Такой подход направлен на эффективное использование спутниковых данных для улучшения нашего понимания процессов развития и повышения точности прогнозов погоды.

Глава 1. Теоретические основы и методы исследования

1.1. Физические принципы образования и эволюции тропических циклонов

Тропические циклоны, официально определяемые Всемирной метеорологической организацией как «синоптические области низкого давления без фронтальной системы, возникающие над тропическими или субтропическими водами и демонстрирующие организованную конвективную активность и циклоническую циркуляцию, более интенсивную на поверхности, чем на верхних уровнях» (ВМО, 1992), встречаются во всех океанических бассейнах, где они известны под разными названиями. Физические принципы возникновения и развития тропических циклонов основаны на нескольких фундаментальных атмосферных и океанографических явлениях, в частности, на тепловом излучении океана, высокой влажности и т. д.

В качестве первого приближения циклон можно рассматривать как гигантский тепловой двигатель. Чтобы дать представление о масштабах этой машины и затраченной энергии, приведем некоторые усредненные данные для региона, расположенного в радиусе 200 км от глаза циклона.

«Средняя скорость нагрева атмосферы за счет конденсации водяного пара между поверхностью и уровнем 100 гПа составляет порядка 25 °С/сутки».

«Соответствующая норма выпадения осадков составляет 10 см дождя в день».

«Поток скрытой теплоты от океана к атмосфере достигает значений от 1000 Вт/м^2 до 2000 Вт/м^2 в центре циклона (где приземные ветры наиболее сильны)».

«Поток явного тепла примерно в 10 раз меньше. Действительно, разница температур между поверхностью океана и атмосферой в тропических регионах редко превышает $1\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}$ ».

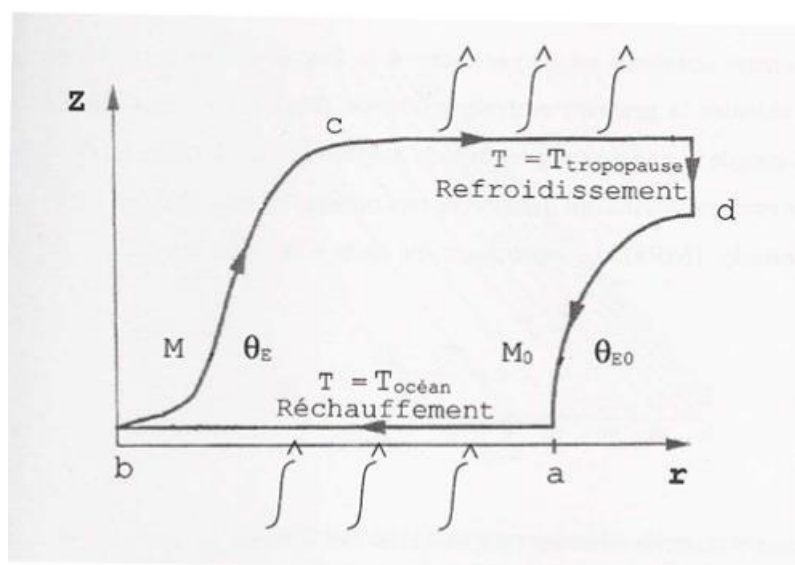


Рисунок 1.1: Функционирование тропического циклона в рамках цикла Карно (Эмануэль, 1986)

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

Оригинальный подход к описанию функционирования тропического циклона был предложен Эмануэлем (1986): цикл Карно. Циклон преобразует тепловую энергию, извлекаемую из океана, в кинетическую энергию, при этом океан и тропопауза выступают в качестве источников тепла и холода соответственно. Рисунок 1.5 иллюстрирует этот двухступенчатый тепловой двигатель, который представляет собой циклон. Этот цикл Карно включает в себя два изотермических преобразования ($a \rightarrow b$ и $c \rightarrow d$), связанных адиабатическими процессами ($b \rightarrow c$ и $d \rightarrow a$). Каждое из этих изотермических

преобразований соответствует обмену энергией с окружающей средой в виде тепла и/или работы. Система «откачивает» тепло от источника тепла, т. е. океана, и передает его источнику холода, т. е. тропопаузе.

Согласно диаграмме, на рисунке 1.5, нижние слои атмосферы получают энергию за счет декомпрессии и, особенно, за счет значительного увлажнения на пути $a \rightarrow b$. Полная энергия, измеряемая эквивалентной потенциальной температурой, затем увеличивается от θ_{E0} , значения, наблюдаемого в окружающей среде, до θ_E . Одновременно угловой момент уменьшается из-за трения о поверхность океана, переходя от M_0 , значения, наблюдаемого в окружающей среде, к значению M вблизи центра циркуляции. На пути $b \rightarrow c$ частица совершает вертикальное движение внутри стенки глаза циклона, сопровождаемое только адиабатическим расширением, при котором часть скрытой теплоты преобразуется в явную теплоту, кинетическую энергию и потенциальную энергию, а значение θ_E остается почти постоянным. Достигнув тропопаузы, частицы воздуха удаляются от центра циклона ($c \rightarrow d$), постепенно теряя энергию за счет излучения в космос (θ_E уменьшается до значения, наблюдаемого в окружающей среде, θ_{E0}) и восстанавливая угловой момент за счет взаимодействия с крупномасштабной атмосферной циркуляцией. Заключительная ветвь цикла ($d \rightarrow a$) представляет собой «виртуальное» адиабатическое сжатие вдоль линии изоуглового момента. Действительно, циклон — это открытая система, которая непрерывно обменивается массой с окружающей средой: в цикле фактически не отслеживается отдельная частица.

Преимущество этого подхода заключается в том, что он позволяет рассчитать, исходя из теоретической эффективности цикла, теоретическое минимальное центральное давление, которое может быть достигнуто при заданной паре температур горячего источника (океана) и холодного источника (тропопаузы). В этом случае циклон достигнет своей максимальной потенциальной интенсивности, или максимальной потенциальной интенсивности (МПИ). Классическая эффективность цикла выражается следующим образом:

$$\epsilon = \frac{T_s - T_0}{T_s} \quad (1.1)$$

T_s и T_0 — это температуры горячего и холодного источников соответственно. Для стандартной тропической атмосферы Δ составляет порядка 1/3. Исходя из первого закона термодинамики, который гласит, что внутренняя энергия постоянна в течение цикла (следовательно, $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$), получаем следующее соотношение:

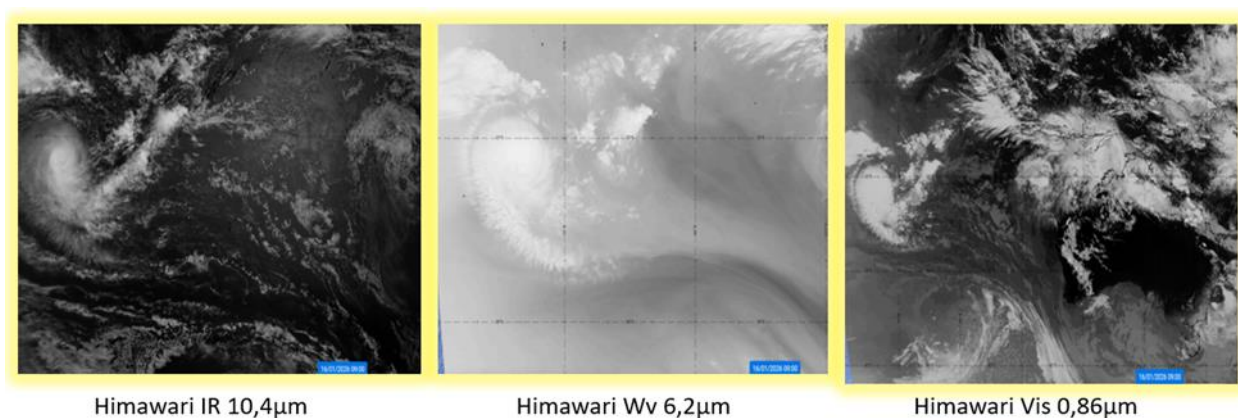


Рис 1.2: фрагмент разных каналов

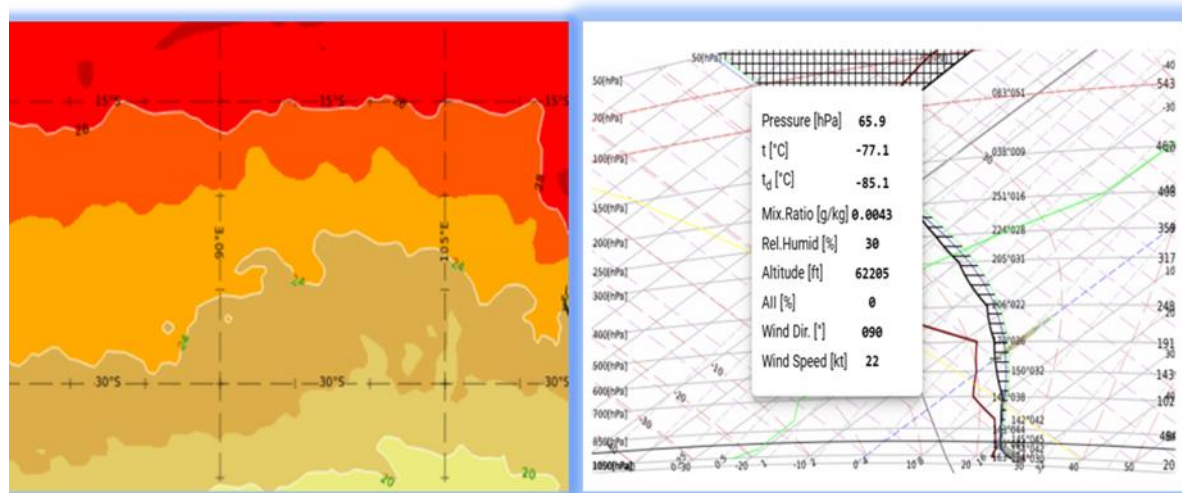


Рис1.3: Температура поверхности земли и метеорологическая диаграмма

<http://185.254.223.166/ow-maps/layers>

Перевод температур:

$$T_0 = -77,6 + 273,15 = 195,55 \text{ K}$$

$$T_s = 28 + 273,15 = 301,15 \text{ K}$$

Подставим значения в формулу

$$\epsilon = \frac{T_s - T_0}{T_s} = \frac{301,15 - 195,55}{301,15} = 0,35065$$

Чтобы выразить КПД в процентах, результат нужно умножить на 100%

$$\epsilon = 35,06\%$$

$$\Delta S T_s = R T_s \ln \frac{p_a}{p_b} + \frac{1}{4} f^2 r_a^2$$

где p_a — давление в точке а, r_a — радиус в точке а, f — параметр Кориолиса, R — универсальная газовая постоянная, а ΔS — изменение энтропии при переходе $a \rightarrow b$ (функция q_a , влажности в точке а). В этом уравнении левая часть (1) представляет собой общий теплообмен за цикл. В правой части первый член (2) представляет собой работу, совершаемую силами давления между а и b, а второй член (3) — потерю кинетической энергии (углового момента) между с и d. Общим вкладом других ветвей можно пренебречь, независимо от того, существует ли фактическая компенсация или они малы.

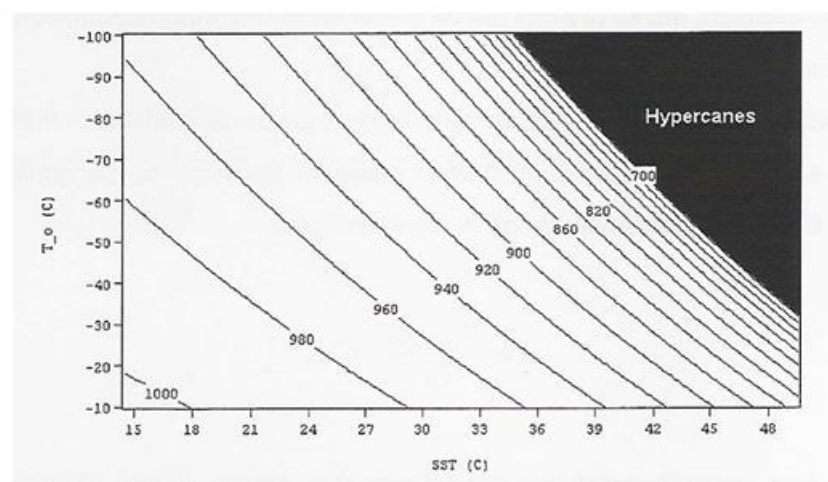


Рис 1.4: Теоретическое нормальное давление, которого может достичь циклон, в зависимости от температуры поверхности моря (SST) и температуры тропопаузы (T_0) при $p_a = 1015$ гПа и относительной влажности 75% (Эмануэль, 1991).

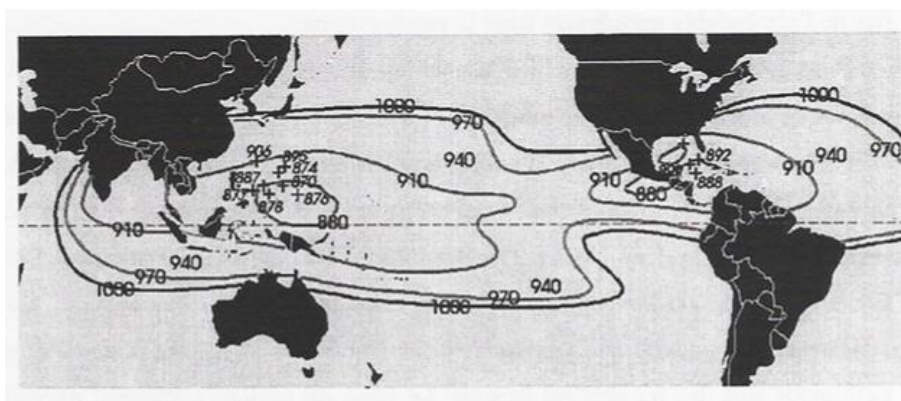
chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

Температура поверхности мирового океана это 15°C , минимальное центральное давление, которого может достичь циклон, в зависимости от температуры поверхности моря (SST) и температуры тропопаузы. Через график мы получаем 1015гПа.

Используя этот метод, если мы зафиксируем r_a , p_a , q_a , TS , T_0 и ΔS , мы можем оценить минимальное давление в центре циклона p_b . Затем мы можем построить кривые минимального давления как функцию TS и T_0 (рис. 1.4), зафиксировав p_a на стандартном значении 1015 гПа и относительную влажность на уровне 75%. Конечный результат не очень чувствителен к r_a . Максимальное изменение энтропии оценивается с использованием второго закона термодинамики вдоль пути $a \rightarrow b$, используя значения для насыщенного воздуха. Из рисунка 1.4 мы видим, что существуют режимы, при которых цикл становится неустойчивым (гипертормнадо): система тогда углубляется без ограничений. Это не обязательно реалистично, поскольку силы трения и турбулентность, вероятно, ограничивают скорость ветра (в торнадо самые высокие наблюдаемые скорости составляют порядка 500 км/ч). На основе климатологических данных из тропических регионов мы можем построить карту (рис. 1.4), представляющую минимально возможное давление в основных циклонических бассейнах. Крестиками отмечено положение некоторых измеренных центральных давлений, их значения выделены курсивом. Интересно отметить довольно хорошее соответствие между этими измеренными значениями и теоретическими значениями. Еще одно интересное наблюдение касается небольшого числа тропических циклонов, которые фактически формируются в тропических регионах, учитывая вышеупомянутые теоретические возможности. Таким образом, несмотря на океанические и атмосферные условия, обеспечивающие благоприятные температуры поверхности океана и тропосферы, тропические депрессии не систематически развиваются в интенсивные циклоны. Стоит напомнить, что такие факторы, как горизонтальный сдвиг ветра, который может препятствовать развитию вертикальной структуры циклона, могут частично объяснить это явление.

Этот термодинамический подход также помогает нам понять, что именно во время прохождения частиц воздуха над океаном (превращение $a \rightarrow b$ в цикле Карно) циклон получает большую часть своей энергии. Этот механизм характерен для тропических циклонов и отличает их от других конвективных систем, таких как шкваловые линии. Действительно, принципиальное различие между этими двумя системами заключается в том, что ядро циклона получает свою энергию за счет нагрева и увлажнения нижних слоев атмосферы, вызванных трением между воздухом и поверхностью океана, что дестабилизирует всю тропосферу. Шкваловые линии, с другой стороны, в основном питаются конвективно неустойчивым воздухом, который уже существует в пограничном слое.



chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

Хотя этот цикл достаточно точно отражает общее функционирование тропического циклона, детали его внутренней структуры гораздо сложнее. Такие факторы, как степень зрелости циклона и его взаимодействие с синоптическим контекстом, также могут влиять на его структуру и интенсивность. Таким образом, теория цикла Карно представляется как энергетический оптимум для циклонов, который фактически модулируется различными динамическими и механическими воздействиями, связанными с изменениями условий окружающей среды.

На рисунке 1.5 показаны термодинамические характеристики, наблюдаемые в области глаза зрелого тропического циклона. Влажный воздух на малых высотах образуется в результате конвергентного радиального потока, который увлажняется интенсивным испарением над океаном. Сухой воздух на больших высотах в области глаза является результатом нисходящих движений, компенсирующих сильные восходящие потоки, локализованные в конвективных облаках, окружающих глаз. Разрыв между этими двумя воздушными массами приводит к сильной температурной инверсии, высота которой колеблется в зависимости от интенсивности циклона. В периоды сильной конвекции восходящие потоки интенсивны (что приводит к усилению циклона), и компенсирующие нисходящие движения также сильны, тем самым понижая уровень инверсии. И наоборот, когда конвективная активность слаба, значительная часть влажного потока из нижних слоев достигает глаза, увлажняя и охлаждая его. В результате высота уровня инверсии увеличивается, и центральная депрессия заполняется.

Глаз циклона окружен стеной шириной от 10 до 100 км, состоящей из кучево-дождевых облаков, высота которых может достигать 15 км. Именно в этой зоне происходят наиболее интенсивные конвективные движения, выпадают самые сильные осадки и дуют самые сильные ветры, достигающие 80–90 м/с для самых мощных циклонов. Вокруг стенки глаза циклона предпочтительными зонами для развития конвекции различной интенсивности и количества осадков являются спиральные полосы. Эти полосы имеют ширину от 5 до 50 км и длину от 100 до 300 км. Они образованы в основном слоистыми осадками, но также содержат более клеточную конвективную активность в виде очень интенсивных конвективных ядер, которые постоянно обновляются (Maynard 1945, Wexler 1947, Barnes et al. 1983, Gall et al. 1998). Основная облачная полоса, имеющая форму логарифмической спирали, может соединяться с центральной частью, образуя внешнюю стенку глаза. Такая многокольцевая конфигурация конвективной стенки характерна для критических фаз изменения интенсивности, когда внутренняя стенка ослабевает, а внешняя усиливается.

Циркуляция ветра вокруг центра циклона может быть разделена на две составляющие: первичную, или тангенциальную, циркуляцию и вторичную циркуляцию (радиальную и вертикальную). Вторичная циркуляция, представленная циклом Карно, примерно на порядок менее интенсивна, чем тангенциальная циркуляция, которая является наиболее интенсивной

составляющей. Циклонический тангенциальный поток достигает максимальной интенсивности у поверхности, непосредственно над пограничным слоем трения. Выше 500 гПа ветер медленно уменьшается с высотой. Таким образом, на тропопаузе и за пределами радиуса 200 км ветер значительно ослабевает, пока не становится антициклоническим в верхней части системы, на высоте около 15 км (рис. 1.10а). Картина потока соответствует структуре с горячим ядром и максимальными температурными возмущениями приблизительно 10 К, сконцентрированными в средней и верхней тропосфере, в центре вихря (рис. 1.10б). Максимальный температурный градиент на всех высотах обычно регистрируется у стенки глаза бури, а возмущения ограничиваются верхней тропосферой за ее пределами. Важно еще раз подчеркнуть разницу с системами шкваловых линий: в последних максимальное температурное возмущение локализуется в восходящих потоках, и аномалия является прямым результатом конвекции; тогда как в циклонах возмущение возникает в основном из-за косвенного термического опускания (Willoughby 1998).

Радиус, на котором максимальная тангенциальная скорость ветра (RMW) максимальна, варьируется от 10 км до 100 км вблизи поверхности и, как правило, увеличивается с высотой. В пределах радиуса максимальной скорости ветра ядро циклона практически находится в жестком вращении, что означает, что VT пропорциональна радиусу, тогда как за пределами ядра тангенциальная скорость ветра уменьшается с радиусом, следуя приблизительно закону $r^{-1/2}$.

На рисунке 1.6 показана вторичная циркуляция (радиальная и вертикальная) внутри зрелого циклона. Она является результатом потери углового момента из-за трения о поверхность океана, выброса скрытой теплоты в атмосферу в результате конденсации в стенке глаза циклона, а также, в меньшей степени, результатом слабого, но широко распространенного охлаждения, вызванного таянием выпадающего льда (характеризующегося яркой полосой, наблюдаемой радаром), и результатом слабого, но широко распространенного нагрева, вызванного конденсацией и замерзанием в наковальне над яркой полосой. Это позволяет ветрам, следовательно, и воздушным массам, конвергентно перемещаться внутри системы в нижней тропосфере, то есть между поверхностью и первыми 5 километрами. Эти воздушные массы впоследствии поднимаются вверх в стенке глаза циклона, прежде чем окончательно расходятся на большой высоте в тропосфере. Таким образом, вторичная циркуляция обеспечивает систему энергией, необходимой для ее развития, в виде углового момента и тепловой энергии. Это позволяет поддерживать основную циркуляцию,

компенсируя потери энергии, связанные с трением и радиационным охлаждением на верхней границе атмосферы.

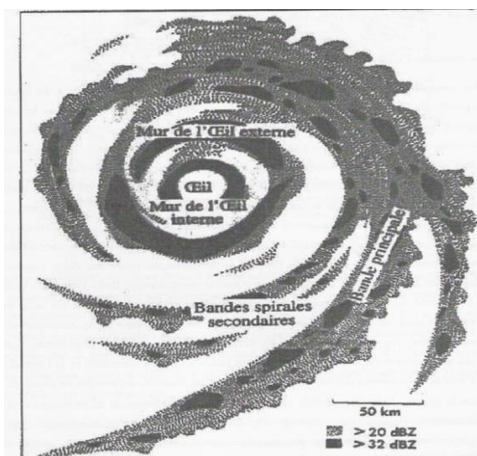


Рисунок 1.6: Схематическое изображение основных облачных и дождевых полос, связанных со зрелым тропическим циклоном (Уиллоуби, 1988).

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

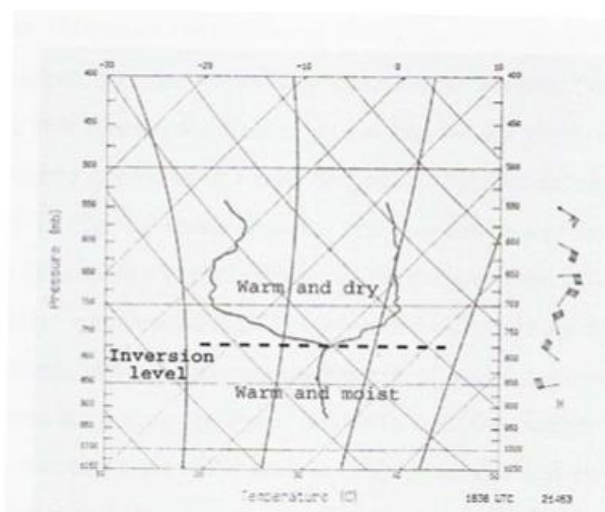


Рисунок 1.7: Эмаграмма, полученная на основе наблюдений с помощью зонда, сброшенного в глаз урагана Хьюго непосредственно перед его прибытием на Гваделупу 16 сентября 1989 года (Уиллоуби, 1998).

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

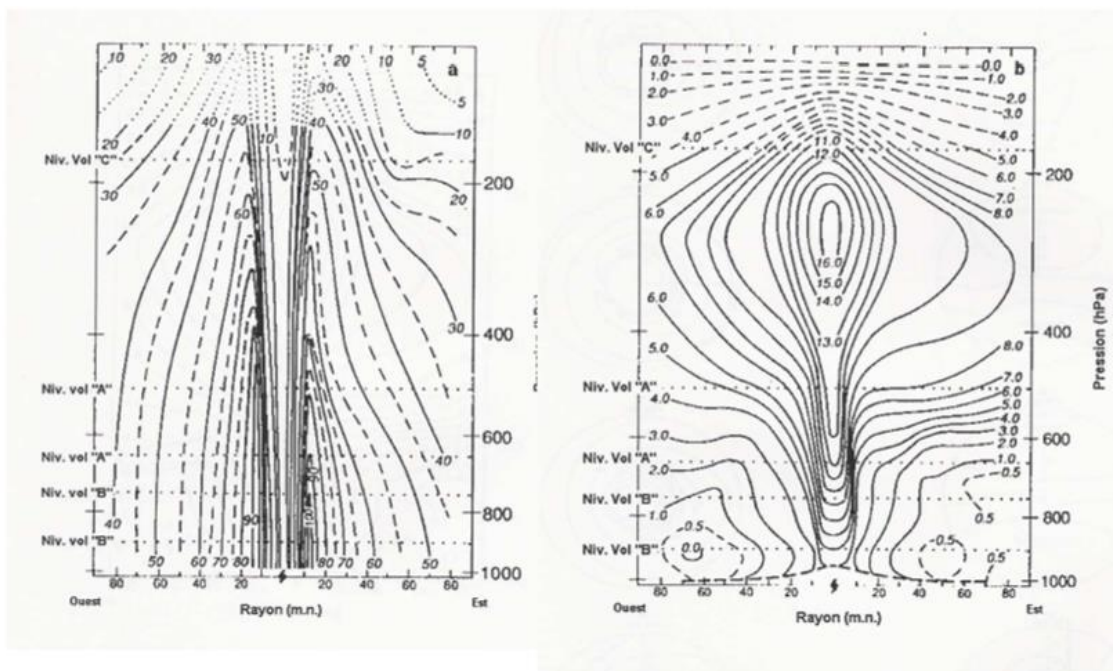


Рисунок 1.8: Вертикальное поперечное сечение (а) азимутального ветра (Кт) и (б) температурной аномалии (°К), наблюдавшихся во время урагана Хильда (1964) (Хокинс и Рубсам, 1968).

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/file/index/docid/462517/filename/2008lare0007-jolivet.pdf

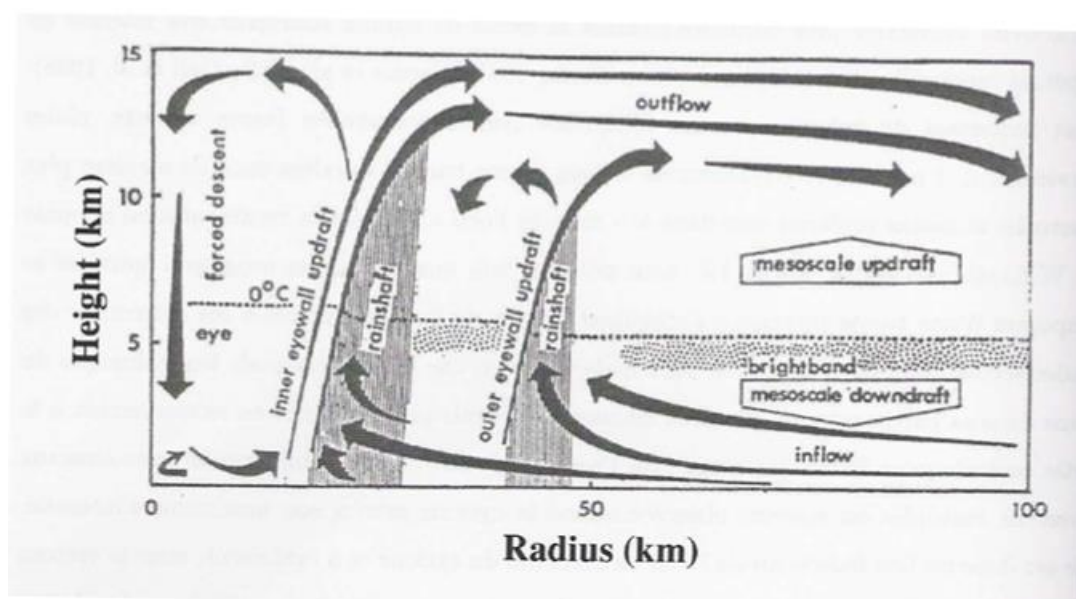


Рисунок 1.9: Схема вторичной циркуляции (радиальной и вертикальной) в ядре тропического циклона (Уиллоуби, 1988).

Другой дополнительный подход к первичной и вторичной циркуляции предполагает их разложение на две части: симметричную и асимметричную. Однако в очень интенсивных тропических циклонах тангенциальная (первичная) циркуляция может считаться высокосимметричной или осесимметричной, но может иметь локальные максимумы. По этой причине описание циклона дополняется введением асимметричной составляющей, которая, наоборот, имеет меньший порядок величины, чем симметричная циркуляция.

Формализм, основанный на предположении о равновесии «теплового ветра» (сочетание гидростатического равновесия и равновесия градиентного ветра) между температурным полем и симметричным тангенциальным ветром, позволяет идеализировать ядро зрелого тропического циклона. В циклоне циклострофическое равновесие (между градиентом давления и центробежной силой) справедливо вблизи центра вихря, где $VT_s/r \gg f$. Аналогично, геострофическое приближение (равновесие между силой Кориолиса и градиентом давления) справедливо вдали от центра, где $VT_s/r \ll f$. Из двух приближений наилучшим является приближение градиентного ветра, равновесия между градиентом давления, силой Кориолиса и центробежной силой, которое выражается следующим образом:

$$X(r, \phi, z, t) = X_z(r, z, t) + X_a(r, \phi, z, t)$$

$$Y(r, \phi, z, t) = Y_0(z) + Y_z(r, z, t) + Y_a(r, \phi, z, t)$$

Объединив уравнения (1.3) и (1.4), получаем уравнение термического ветра.

$$\left(f + \frac{2vTs}{r}\right) \left(\frac{\theta_{vTs}}{\alpha z}\right) = \left(\frac{g}{\theta_{v0}}\right) \left(\frac{\theta_{\nabla s}}{\alpha r}\right)$$

Согласно Элиассену (1951), также возможно использовать соотношения равновесия для вывода вторичной циркуляции из распределения источников тепла и углового момента. Поскольку поток вторичной циркуляции не дивергентен в плоскости rz , его можно представить функцией тока. Зная структуру вихря и распределение источников тепла и углового момента, решение уравнения Элиассена приводит к вторичной циркуляции. Это уравнение также

позволяет связать первичную циркуляцию со вторичной: из решения уравнения в виде функции тока можно рассчитать эволюцию тангенциальной скорости. Шапиро и Уиллоуби (1982) показали, что если источник тепла или углового момента расположен в радиусе максимального ветра, это приводит к увеличению тангенциальной скорости в пределах радиуса максимального ветра и, следовательно, к сужению стенки глаза циклона, связанному с его интенсификацией.

1.2. Структура тропических циклонов

Тропические циклоны зарождаются в тропических водах, где воздух влажный и где существует ранее существовавшая зона конвергенции поверхностных ветров и конвекции. Это образование может быть вызвано областями повышенной конвективной активности в зоне межтропической конвергенции (ZCIT; пояс низкого давления, который окружает Землю на метеорологическом экваторе и простирается на несколько сотен километров по широте). Конвективные скопления распадаются, превращаясь в впадины тропические и направляются в тропические широты, где они накапливают энергию. Такой прирост энергии возможен в теплой воде.

Их структура

зрелом тропическом циклоне конвективные и Грозовые облачные образования образуются и закручиваются по спирали по часовой стрелке в Южном полушарии и против часовой стрелки в северном полушарии вокруг очага циклона. Этот глаз диаметром от 20 до 100 км представляет собой стабильный столб воздуха с очень низким давлением (до 10% - ного-дефицита по сравнению с давлением окружающей среды), в котором погода довольно спокойная, небо чистое, ветры слабые и температура относительно высокая особенно на высоте.

Самые густые облака, сопровождающиеся сильнейшими, иногда грозовыми осадками и сильнейшими ветрами, возникают в области на краю глаза,

называемой глазная стенка. эта кольцевидная область вокруг ядра может достигать горизонтальной ширины от 10 до 100 км. В наиболее интенсивных циклонах иногда наблюдается цикл замещения глазной стенки, во время которого образуются концентрические стенки, постепенно заменяющие старую глазную стенку, параллельно с циклом заполнения и углубления впадины.

В спиральных полосах, которые вращаются вокруг центра низкого давления, мы можем встретить различные облака, в том числе грозовые кучево -дождевые облака, вызывающие интенсивные осадки. Облака в стенке глаза и в спиральных полосах могут простираться до тропопаузы на высоте около 15 км и даже время от времени выходить за ее пределы

После того, как тропический циклон разовьется и организуется, его диаметр может достигать от 300 до 1000 км. Зрелый тропический циклон, такой как Джованна в феврале 2012 года в южной части Индийского океана (рис. 1.1) связан с горячим сердцем и Центральной депрессией в крупномасштабном атмосферном вихре.

1.3. Классификация и стадии развития

Категории циклонов				
категория	название	узлы	Скорость Ветра, км/с	описание
0	Тропическая депрессия	33	61	Слабые облака, низкая активность
1	Тропический шторм	64-82	118-152	Умеренная облачность, грозы
2	Ураган низкой силы	83-112	153-177	Усиление облачности, сильные ветры
3	Сильный ураган	113-136	178-208	Экстремальные условия
4	Очень сильный ураган	137	252	Катастрофические разрушения



Рис 1,11: скорость ветра тропического циклона

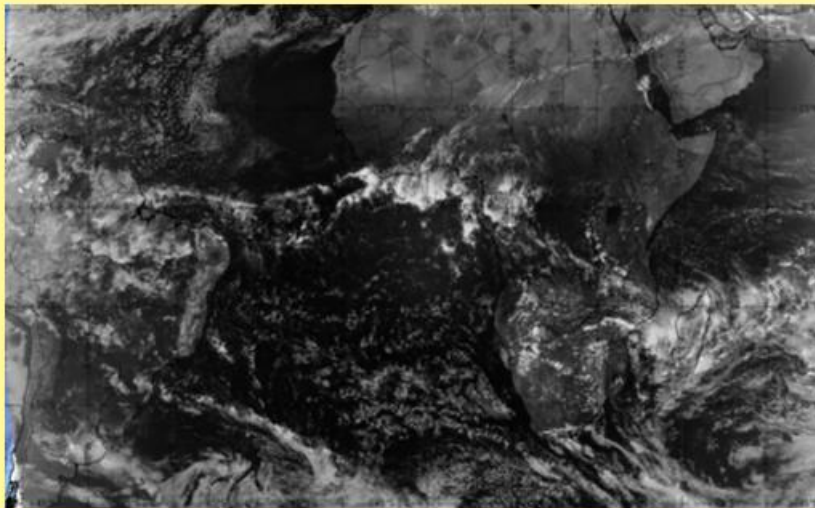
На графике показана зависимость скорости ветра тропического циклона от его интенсивности, измеренной в узлах. Данные показывают, что скорость ветра увеличивается с увеличением интенсивности циклона. При увеличении узлов от 0 до 140 скорость ветра колеблется от 50 до 250 км/с, что свидетельствует об увеличении силы циклона и его потенциальной опасности.

От 30 до 60 узлов скорость ветра растёт довольно быстро (примерно с 60 до 120).

- От 60 до 80 узлов рост продолжается, но немного замедляется (до ~150).
- От 80 до 110 узлов увеличение небольшое (примерно до ~175).
- От 110 до 140 узлов наблюдается резкое усиление ветра (примерно до ~250).

Вывод

В целом, скорость ветра в тропическом циклоне увеличивается с усилением циклона с более сильным увеличением скорости при более высоких значениях.



Тропическая депрессия
24.02.25

Рис 1.12 Тропическая депрессия 24.02.25

<http://185.254.223.166/ow-maps/layers>

Тропическая депрессия — это начальная стадия развития тропического циклона, представляющая собой организованную систему облаков и гроз с четкой приповерхностной циркуляцией.

характеристики

- 1. Скорость ветра:** Устойчивый ветер не превышает 17 м/с (до 33 узлов/38 миль в час).
- 2. Структура:** Организованная система с замкнутой, но слабой циркуляцией (одна или несколько изобар).
- 3. Осадки и штормы:** Сопровождается сильными, продолжительными дождями, грозами.
- 4. "Глаз" бури:** В отличие от тайфунов и ураганов, глаз (центральная ясная часть) обычно отсутствует.

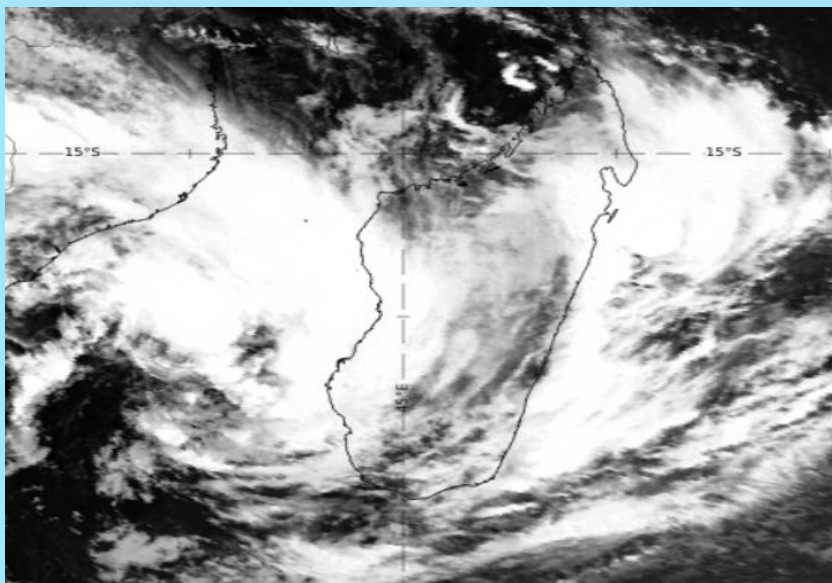


Рис 1.13 Тропический Шторм <http://185.254.223.166/ow-maps/layers>

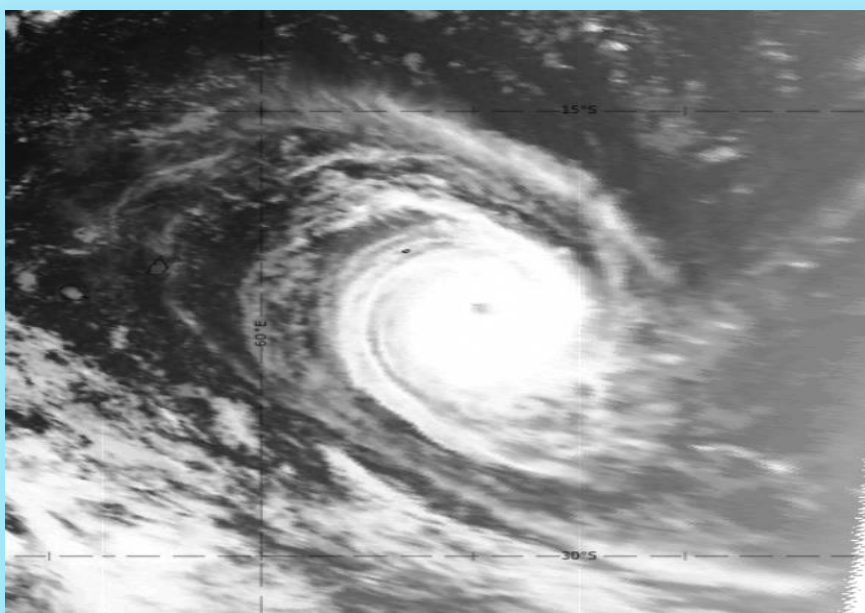


Рис 1.14 Тропический ураган <http://185.254.223.166/ow-maps/layers>

Тропический шторм — это мощный атмосферный вихрь, формирующийся над тёплыми тропическими и субтропическими морями, характеризующийся:

Характеристики:

1. Закрученной системой гроз и ветров вокруг центра низкого давления;
2. Организованной конвекцией (восходящими потоками тёплого, влажного воздуха);

3. Отсутствием фронтов (в отличие от умеренных циклонов).

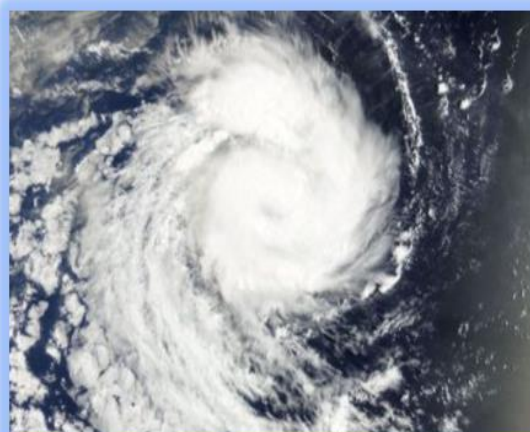
Тропический ураган — это мощный, организованный тропический циклон с максимальной продолжительной скоростью ветра 119 км/ч (74 миль/ч, 64 узла) и выше, формирующийся над тёплыми тропическими океанами и характеризующийся теплым ядром, закрученной системой гроз и низким давлением в центре.

Характеристики:

1. Ветер и давление: Скорость ветра превышает 33 м/с (119 км/ч или 64 узла). В центре фиксируется очень низкое давление, иногда опускающееся ниже 900 гПа.
2. Энергия и формирование: Тропические циклоны образуются над океанами с температурой воды выше +26,5°C
3. Источником энергии служит скрытая теплота конденсации влаги.



тропическое возмущение
23.02.25



тропическая депрессия
24.02.25

Рис 1.15 тропическое возмущение и Тропическая депрессия

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=-16.4678,179.0639,7z/date=2025-02-23,pm>

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=-17.309,176.014,6z/date=2025-02-24,pm>

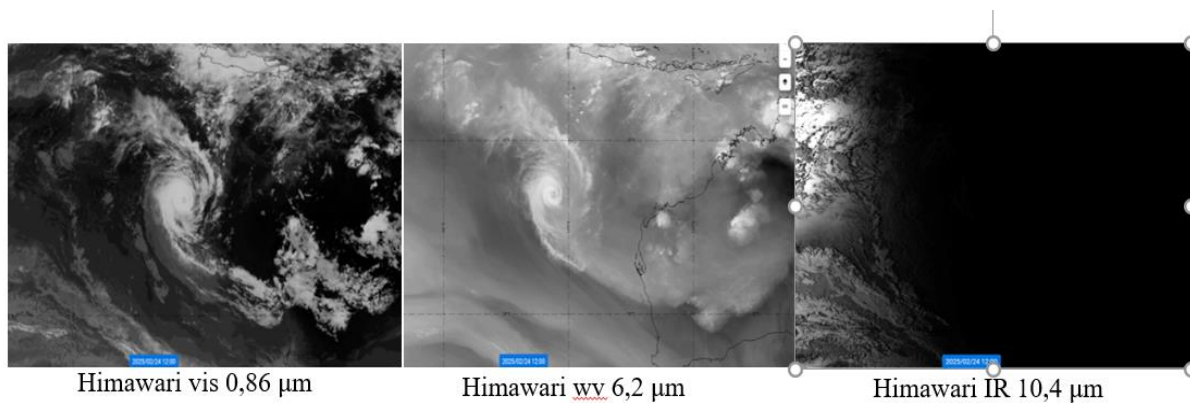
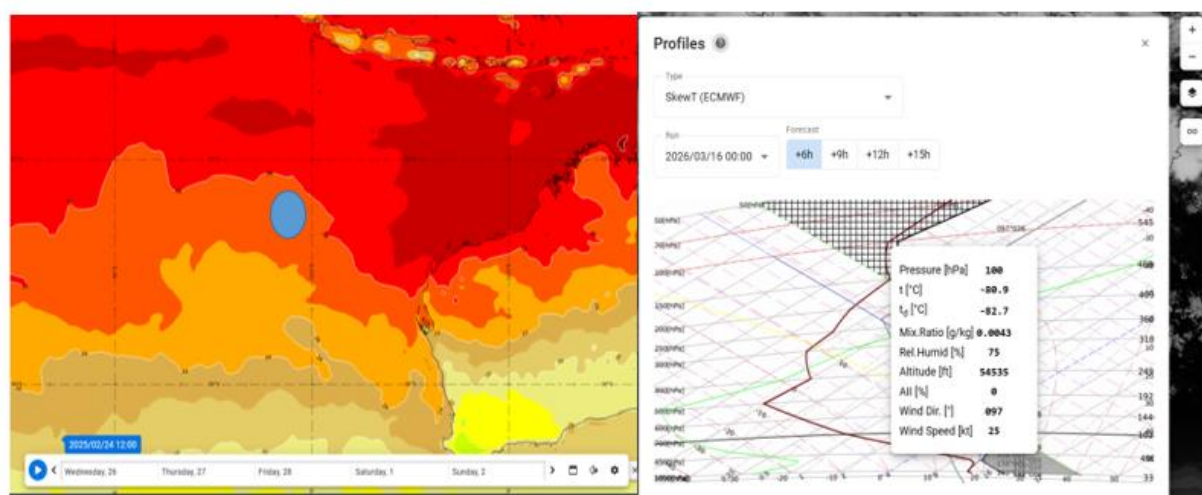


Рис 1.16: геостационарные спутники 23.02.25

<http://185.254.223.166/ow-maps/layers>



Перевод температур:

$$T_o = -80,9 + 273,15 = 192,25\text{k}$$

$$T_s = 27 + 273,15 = 300,15\text{k}$$

Подставим значения в формулу

$$\epsilon = \frac{T_s - T_o}{T_s} = \frac{300,15 - 192,25}{300,15} = 0,3594$$

Чтобы выразить КПД в процентах, результат нужно умножить на 100%

$$\epsilon = 35,94\%$$

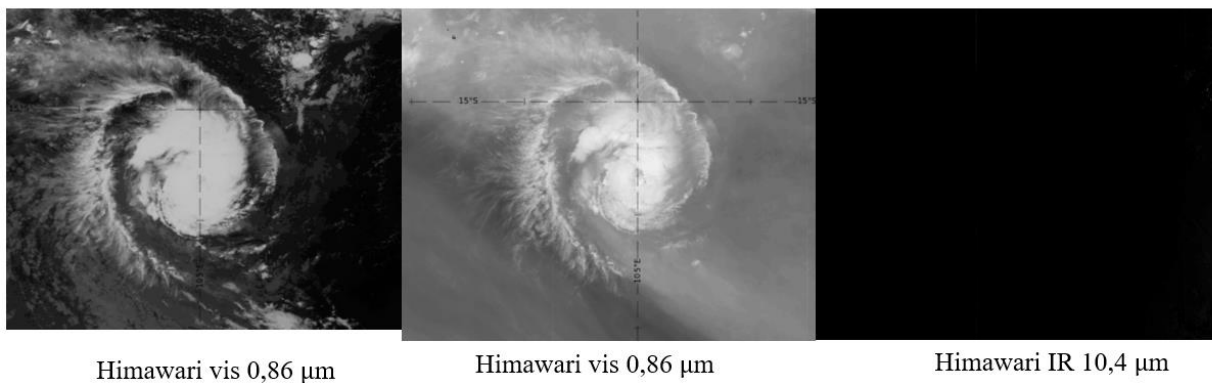
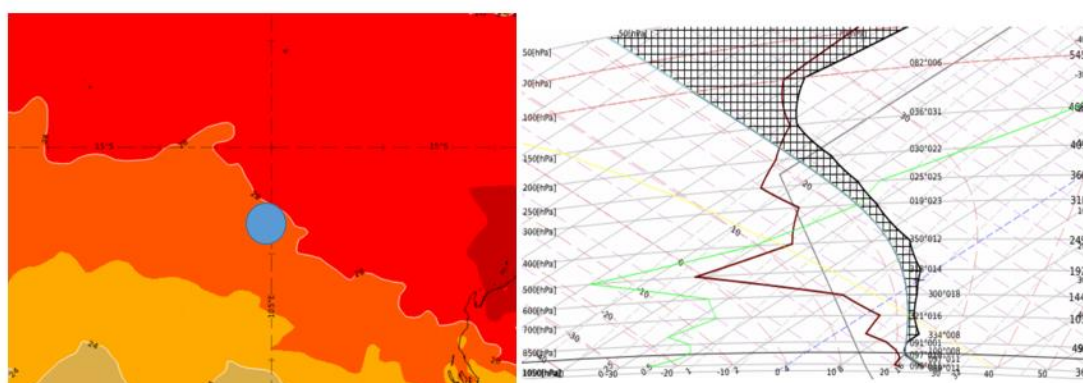


Рис 1.17: геостационарные спутники 24.02.25



Перевод температур:

$$T_0 = -79,9 + 273,15 = 193,25 \text{ K}$$

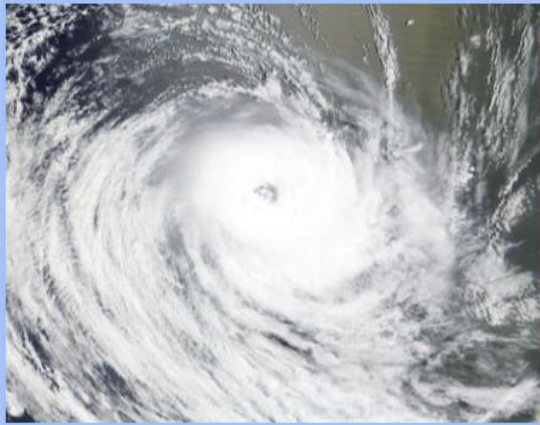
$$T_s = 27 + 273,15 = 300,15^\circ\text{C}$$

Подставим значения в формулу

$$\epsilon = \frac{T_s - T_0}{T_s} = \frac{300,15 - 193,25}{300,15} = 0,3561$$

Чтобы выразить КПД в процентах, результат нужно умножить на 100%

$$\epsilon = 35,61\%$$



тропический шторм
25.02.25

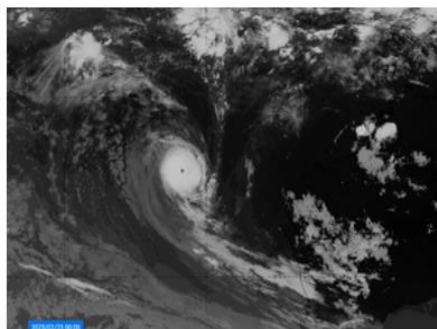


ураган (тайфун)
26.02.25

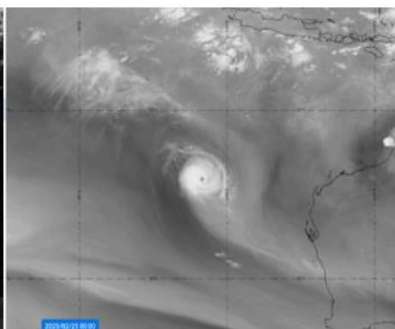
Рис 1.18 Тропический шторм и Тропический ураган (тайфун)

<https://zoom.earth/storms/bianca-2025/>

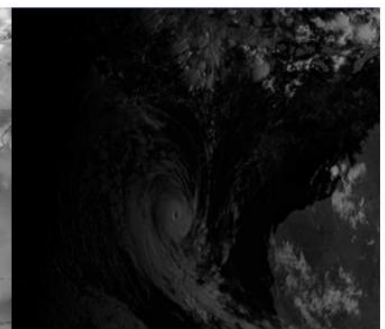
<https://zoom.earth/storms/bianca-2025/>



Himawari vis 0,86 μm

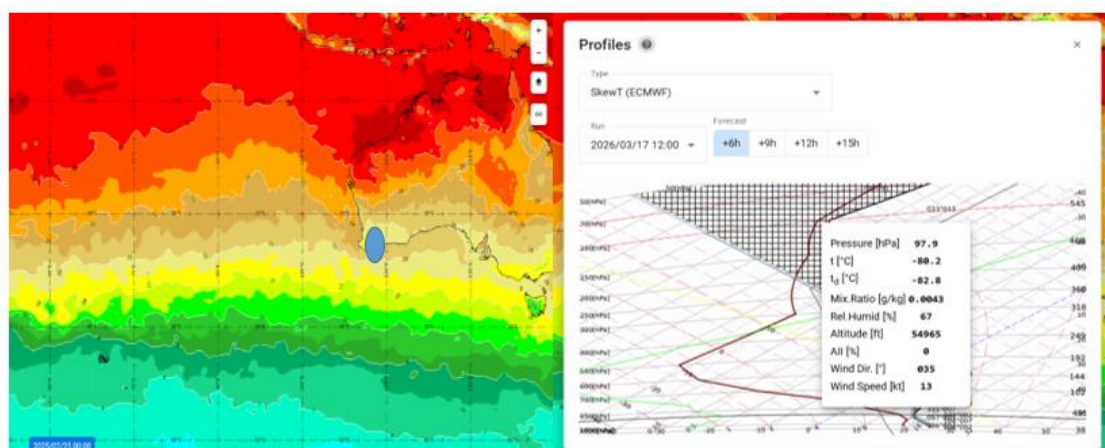


Himawari wv 6,2 μm



Himawari IR 10,4 μm

Рис 1.19: геостационарные спутники 25.02.25



Перевод температур:

$$T_0 = -80,2 + 273,15 = 192,95^\circ\text{C}$$

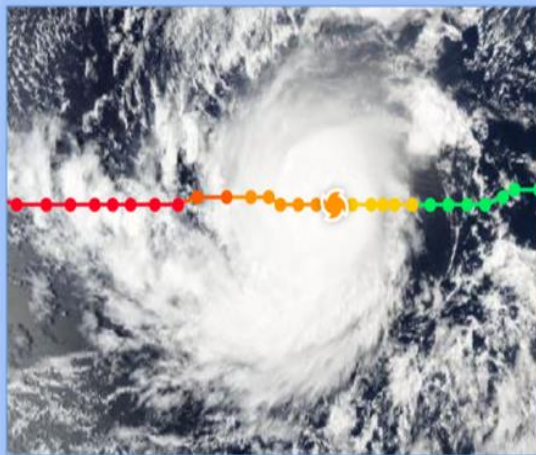
$$T_s = 26 + 273,15 = 299,15^\circ\text{C}$$

Подставим значения в формулу

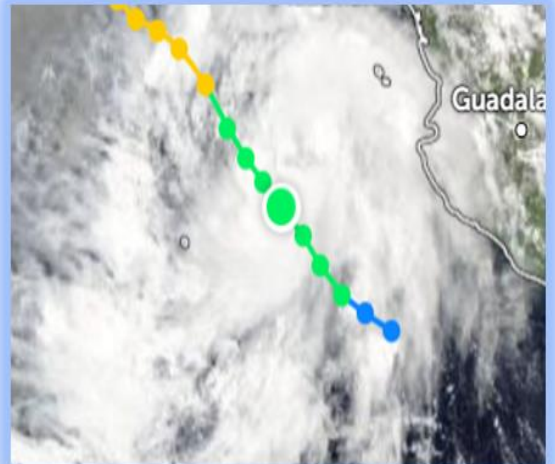
$$\epsilon = \frac{T_s - T_0}{T_s} = \frac{299,15 - 192,95}{299,15} = 0,355^\circ\text{C}$$

Чтобы выразить КПД в процентах, результат нужно умножить на 100%

$$\epsilon = 35,5\%$$



Ураган 02.09.25



Шторм 02.09.25

Рис 1.20 Тропический ураган и Тропический шторм

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=16.53,-98.23,5z/date=2025-09-02,pm>

1.4. Современные методы спутникового мониторинга

Современные методы спутникового мониторинга тропических циклонов значительно улучшили возможности отслеживания, анализа и прогнозирования этих опасных погодных явлений.

Используемые пассивные микроволновые данные представляют собой измерения, полученные с помощью датчиков SMMR (сканирующий многоканальный микроволновый радиометр) и SSM/I (специальный микроволновый имиджер), установленных на борту различных американских спутников в течение почти 25 лет. Размещенные на околополярной солнечно-синхронной орбите (всегда проходящие над областью Земли в одно и то же местное время), различные используемые спутники (Nimbus 7, DMSP -F8, -F11 и -F13) обеспечивают регулярные данные для всей планеты. Они называются околополярными орбитами, потому что спутники не проходят непосредственно над полюсами. Фактически, угол наклона, угол между плоскостью орбиты спутника и экваториальной плоскостью, составляет $98,8^\circ$. Спутники DMSP имеют среднюю высоту 833 км и движутся со скоростью 6,58 км/с. Со скоростью 102 минуты за орбитальный период они совершают 14,1 оборота в сутки (см. раздел 1.2.3.4).

Наконец, еще одна важная характеристика касается направления траекторий спутников вокруг Земли. Они называются орбитальными фазами (рис. 1.6), которые описываются как «восходящие», когда спутник переходит из Южного полушария в Северное, и как «нисходящие» в противоположном случае. Это различие важно, поскольку эти фазы характеризуются разным временем прохождения.

Датчики имеют несколько измерительных каналов. Это позволяет получить доступ к различным компонентам земной системы. Например, частота 22 ГГц особенно чувствительна к атмосферному водяному пару (Вентц и Шабель, 2000).

Пассивные микроволновые спутниковые данные и исследуемые регионы

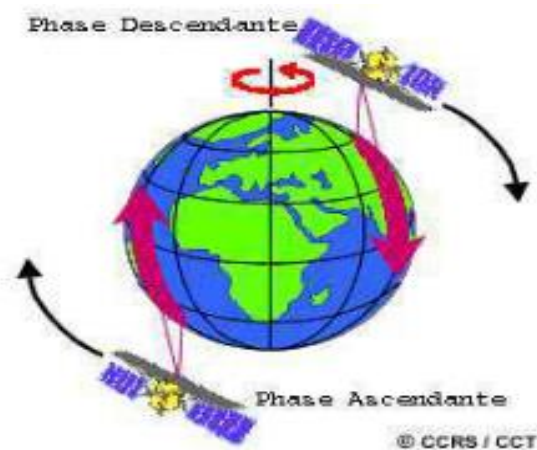


Рис. 1.21 – Орбитальные фазы спутника на полярной орбите.

<https://theses.hal.science/tel-00011322/>

Однако, чтобы изучить эти данные за максимально возможный период времени, нас интересуют только две частоты, общие для датчиков: 19 и 37 ГГц. В терминах длины волны они соответствуют:

– 19 ГГц: $\lambda = 1,58$ см; – 37 ГГц: $\lambda = 0,81$ см.

Для первой частоты наблюдается небольшая разница: SMMR проводил измерения на частоте 18 ГГц. при этом прибор SSM/I проводит измерения на частоте 19,35 ГГц.

Геостационарный спутник

Принцип: Спутники на орбите, находящиеся на фиксированной высоте над экватором, обеспечивают непрерывный мониторинг одной и той же области.

Применение: «Наблюдение за развитием циклонов в режиме реального времени».

«Визуализация облачных структур и облачного покрова с использованием изображений в видимом и инфракрасном диапазонах».

«Мониторинг развития шторма, от его первоначального формирования до затухания».

Примеры: спутники GOES (GeoGIFs Over Earth Observation System) в США, Meteosat в Европе.

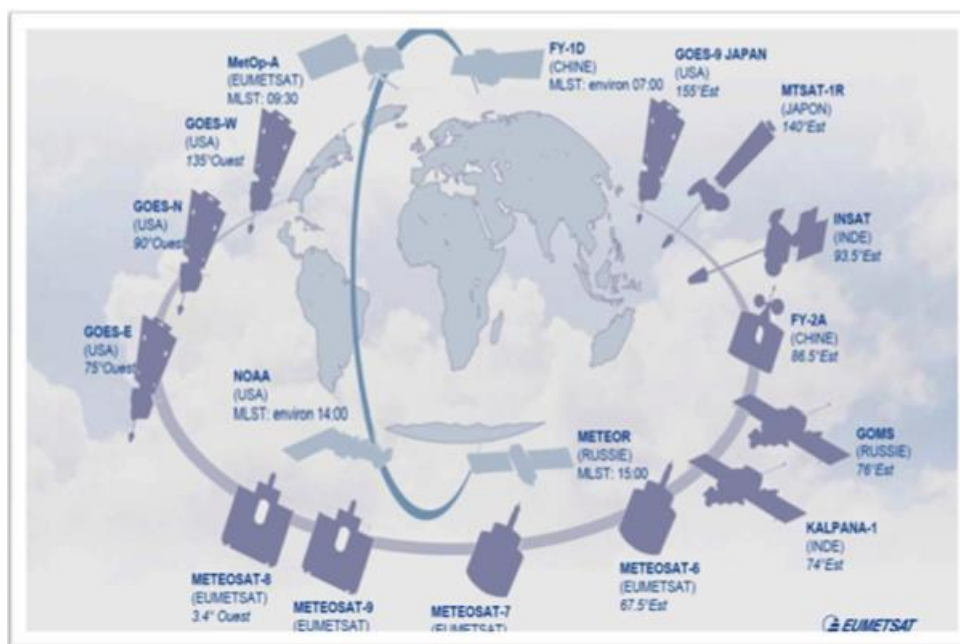


Рисунок 1.22: Всемирная метеорологическая система наблюдений.

<https://wmo.int/>

Скатометрический анализ

Принцип действия: Метод, использующий рассеяние микроволн или световых лучей при столкновении с частицами (такими как дождь или водяной пар) в атмосфере.

«Что это позволяет:»

«Измерение концентрации водяного пара и количества осадков внутри циклона».

«Выявление зон интенсивной конвекции».

Альтиметрия

Принцип: использование радиолокационных высотомеров для измерения топографии поверхности океана и высоты волн.

«Что он предоставляет :»

Оценка явления атмосферных приливов, вызванного циклоном.

«Обнаружение кривизны поверхности воды, отражающей силу и структуру циклона».

Интерес к наблюдению:

«Это позволяет нам определить силу циклона по подъему уровня воды».

«Улучшить понимание воздействия разрушительных волн на море и прогнозирование этих явлений».

Эти современные методы предлагают взаимодополняющие инструменты для комплексного, точного и оперативного мониторинга тропических циклонов. Совместное использование геостационарных съемок, микроволновой радиометрии, скатометрического анализа и альтиметрии позволяет лучше прогнозировать их траекторию, интенсивность и потенциальное воздействие.

1.5. Методика оценки скорости ветра по снимкам

Таким образом, облачная система тропических циклонов может быть охарактеризована следующими параметрами: глаз бури; полосы перистых облаков; полосы кучево-дождевых облаков; разрывы в центральном сплошном облачном массиве.

Распределение интенсивности ветра в области тропического циклона является неоднородным. В центральном облачном массиве скорости ветра достигают большой разрушительной силы, на периферии скорость ветра несколько меньше. Поэтому при анализе поля ветра в тропическом циклоне не выделяют условную область, где скорости ветра достигают 25 м/с и более. В этом отношении интересны данные о зависимости площади, занятой сильными ветрами (в процентах относительно общей площади тропического циклона), от диаметра циклона (по Е. П. Борисенкову):

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

Эти данные свидетельствуют о неоднородности скоростей поля ветра в циклоне, причем с углублением его (с увеличением центральной области облачного поля) относительная площадь, занятая сильными ветрами, уменьшается, что хорошо подтверждает схему модели тропического циклона.

Анализ последовательных стадий развития тропических циклонов позволяет проследить связь между максимальной скоростью ветра у поверхности земли и эволюцией поля облачности в этих циклонах. Используя эту связь, Л. Ф. Хьюберт предложил методику оценки максимальной скорости ветра у поверхности земли в тропических циклонах по данным анализа снимков облачности со спутника. Методика этой оценки позволяет охарактеризовать максимальную скорость ветра у поверхности земли в зависимости от величины диаметра внешнего круга, который охватывает все поле облачности, связанное с тропическим циклоном и категорией облачности этого циклона. Рассмотрим особенности структуры облачного массива тропического циклона для каждой из четырех категорий. Приведено типичное схематическое изображение всех категорий тропического циклона.

Категория 1. К этой категории относятся тропические циклоны, которые имеют облачную систему в виде слабовыраженной спирали или с нечеткими контурами. Вблизи центрального облачного массива для циклонов этой категории характерно наличие небольших полос кучевообразных облаков. Основная облачная система тропического циклона закрыта плотным покровом перистой облачности. Поэтому на снимках глаз бури не виден. Центр циклона определяется путем интерполяции во внутрь спиралевидных облачных полос.

Категория 2. Облачная система тропических циклонов данной категории обнаруживает четко выраженную вихревую структуру. На снимке эта облачность имеет яркий тон с асимметричным центром основного облачного массива. Спиралевидные полосы перистых облаков большой протяженности, контуры их закруглены. Циклоны обычно имеют одну, а иногда и две хорошо выраженные облачные полосы. «Вершина» основной спиралевидной полосы очерчивает центр. Глаз бури не виден.

Категория 3. Снимок циклона этой категории характеризуется почти круглым, имеющим форму диска, массивом сплошной облачности, расположенным непосредственно над его центральной частью. Облачная система имеет спиралевидные полосы перистых облаков, которые слегка концентричны около видимого глаза бури. Изображение глаза бури имеет неправильную форму с неровными краями, он определяет центр тропического циклона.

Категория 4. На снимке циклона этой категории виден яркий и плотный однородный облачный массив овальной или круглой формы. Граница облачности

и отдельных полос четкая и сглаженная, рядом с основным облачным массивом наблюдаются «параллельные» полосы, сформированные из кучевообразных облаков. Хорошо выраженный глаз бури кажется маленькой черной круглой областью, окруженной ярким кольцом. Он определяет центр циклона.

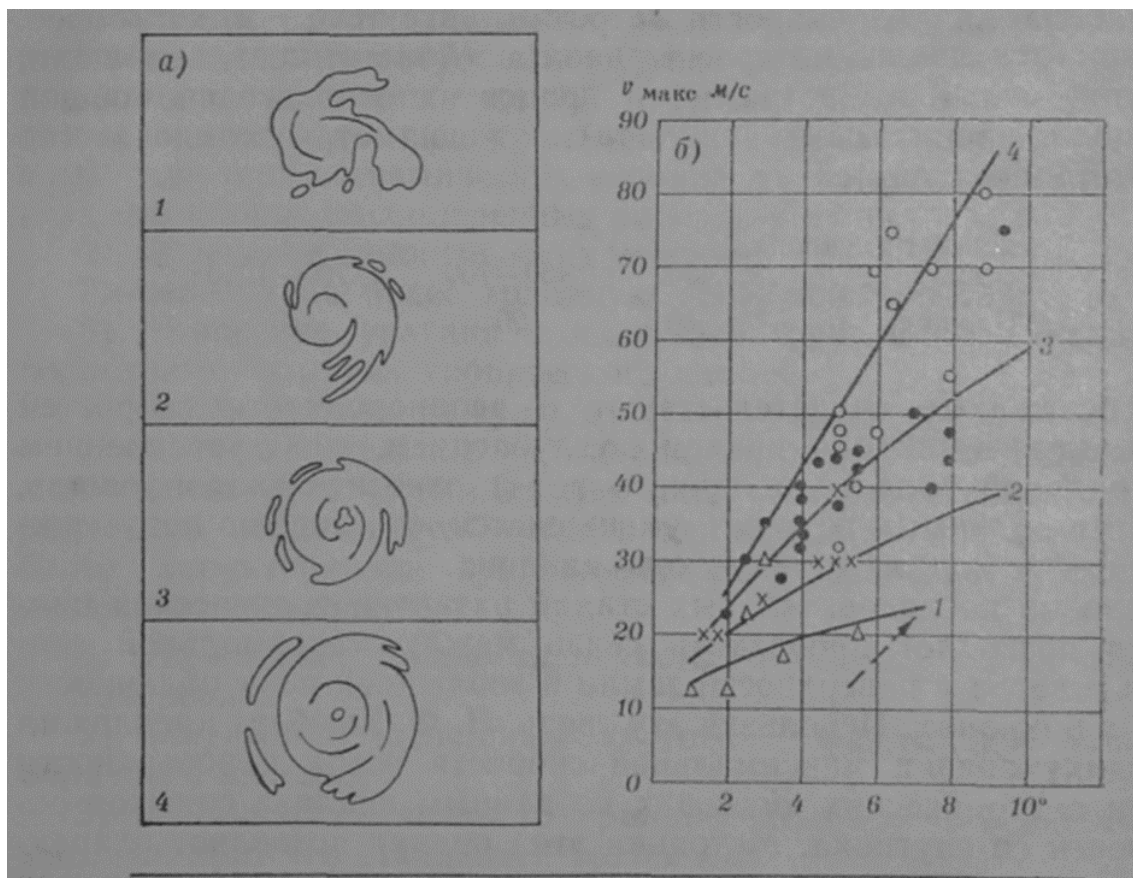


Рис 1.23: График для определения максимальной скорости ветра для четырех различных категорий тропических циклонов в зависимости от характеристики облачности <http://meteoweb.ru/img/phenom/phen030-9.gif>

а - категории циклонов; б - график для определения скорости ветра.

1.6 Метод Хьюберта

Метод Хьюберта - это эмпирический графический способ оценки максимальной скорости поверхностного ветра в тропическом циклоне на основе диаметра его центрального облачного массива и категории облаков (1-4). Метод основан на статистической зависимости, установленной между размером облачной системы, величиной уменьшения Центрального давления и

горизонтальным барическим градиентом: по мере увеличения диаметра циклона давление в центре уменьшается, градиент давления увеличивается, что приводит к усилению ветра на поверхности. Земля. Для каждой категории зависимость скорости ветра от диаметра близка к линейной, причем самые высокие скорости характерны для циклонов четвертой категории. Этот метод используется при анализе спутниковых данных для быстрой диагностики интенсивности тропических циклонов и оценки их потенциальной опасности. Поскольку метод основан на эмпирических данных, его точность зависит от правильного определения категории облачности и является самой высокой для хорошо выраженных симметричных циклонов.

Преимущества метода Хьюберта:

- Быстрая оценка: Позволяет быстро определить максимальную скорость ветра на основе спутниковых данных.
- Эмпирическая связь: Хорошо работает при наличии четко выраженных симметричных циклонов.
- Практическое применение: Полезен для оценки потенциальной опасности тропического циклона в условиях ограниченных данных.
- Отношение к категориям облачности: Учитывает категорию облаков, что повышает точность для разных типов циклонов.

Недостатки метода Хьюберта:

Недостатки метода Хьюберта: Зависимость от определения категории облаков: неточности в классификации могут снизить точность оценки. Ограниченная точность для асимметричных циклонов: этот метод лучше всего работает в симметричных системах. Эмпирический характер: основан на статистических зависимостях, которые могут варьироваться в разных условиях. Зависимость от диаметра облачной системы: при неправильной оценке диаметра точность снижается. Ограничения в слабых или незрелых циклонах: метод менее точен для менее выраженных или молодых систем.

1.7 Метод Дворжака

Метод Дворжака - это подход, используемый для оценки интенсивности тропических циклонов по спутниковым снимкам. Он был разработан для анализа облачной структуры ураганов и других атмосферных явлений. Метод включает в себя несколько ключевых этапов: Анализ структуры облаков: спутниковые снимки используются для идентификации облаков, связанных с циклонической активностью. Внимание обращается на форму, размер и распределение облаков. Классификация облаков: облака классифицируются по типам и характеристикам, что позволяет различать различные зоны интенсивности. Оценка интенсивности: на основе анализа структуры облаков и классификации облаков определяется интенсивность шторма, которая может включать использование различных индексов и шкал. Применение данных: результаты метода используются для прогнозирования поведения циклона, его траектории и потенциального воздействия на населенные пункты

Метод Дворжака имеет ряд преимуществ и недостатков, которые следует учитывать при его использовании для оценки интенсивности тропических циклонов.

Преимущества:

1. **Доступность данных:** Метод использует спутниковые снимки, которые доступны в режиме реального времени, что позволяет оперативно отслеживать изменения в состоянии циклонов.
2. **Объективность:** Оценка интенсивности основана на визуальном анализе облачной структуры, что снижает влияние субъективных факторов.
3. **Эффективность:** Метод позволяет быстро и без затрат на наземные наблюдения оценивать состояние тропических циклонов, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов.
4. **Прогнозирование:** Помогает в прогнозировании пути и интенсивности шторма, что может улучшать подготовленность к потенциальным угрозам.

Недостатки:

Ограничение условий: этот метод может быть менее эффективным в пасмурные дни или в условиях плохой видимости, когда спутниковые снимки не могут дать четкого изображения. Зависимость от технологии: точность метода зависит от качества спутниковых данных и используемых алгоритмов обработки изображений. Потребность в экспертизе: хотя метод является объективным, его применение требует определенных знаний и навыков для правильной интерпретации данных. Ограниченная точность: метод не всегда может точно отражать внутренние процессы циклонической структуры, что может привести к ошибкам в оценке интенсивности.

1.8 Анализ погрешностей метода Хьюберта по категориям циклонов

Категория циклонов	Особенности и влияние на погрешность	Основные причины погрешностей
Категория 1	Обычно менее интенсивные, с меньшими диаметрами облачных систем.	- Трудности в точном измерении диаметра. - Меньшая связь между размером и ветром. - Меньшее отличие от других систем, что затрудняет точную классификацию.
Категория 2	Умеренная интенсивность, увеличение скорости ветра, рост диаметра облачной системы.	- Более выраженная статистическая зависимость, но возможны ошибки из-за несимметрии.
Категория 3	Сильные циклоны, размеры и скорость ветра значительно увеличиваются.	- Повышенная погрешность при неправильной классификации категории облаков. - Более сложная структура системы может исказить оценки.
Категория 4	Очень мощные циклоны, максимальные скорости ветра, большие диаметры.	- Наиболее подходящая для метода категория. - Но даже здесь возможны ошибки при асимметричных или незрелых системах. - Возможна недооценка или переоценка в случае

		сильных искажений или слабых данных.
--	--	--------------------------------------

Общие выводы:

Чем выше категория, тем ниже относительная погрешность, поскольку более мощные и хорошо выраженные системы лучше соответствуют эмпирическим зависимостям метода. Для слабых и небольших систем (категории 1 и 2) погрешность выше из-за сложности точного определения диаметра и классификации. Асимметрия и пробелы в спутниковых данных увеличивают погрешность во всех категориях, особенно среди самых молодых.

1.9 Анализ погрешностей метода Дворжака по категориям циклонов

Категория циклонов	Описание и влияние на погрешность	Причины погрешностей
Категория 1	Менее интенсивные, слабые ветра, меньшие размеры.	- Трудности в точном определении параметров из-за слабых сигналов спутников. - Большая чувствительность к ошибкам в измерениях. - Менее выраженные циклоны могут исказить оценки.
Категория 2	Средняя интенсивность, более выраженные параметры.	- Возможны ошибки из-за формирования облачных и температурных градиентов. - Небольшие асимметрии и загрязнения данных влияют на результат.
Категория 3	Сильные циклоны с устойчивыми характеристиками.	- Погрешности уменьшаются, но возможны при наличии асимметрии и сложных структур. - Зависимость от точности определения центра и минимального давления.
Категория 4	Очень мощные системы, выраженные параметры.	- Наиболее точные оценки при использовании метода. - Но

		погрешности могут возникать при сильных асимметриях, нестабильных условиях или неправильной классификации.
--	--	--

Общие выводы:

Для циклонов от слабого до среднего (категории 1 и 2) погрешность чаще всего выше из-за меньших сигнатур и большей чувствительности к данным. Для надежных систем (категории 3 и 4) ошибки уменьшаются, а методы дают более стабильные оценки, особенно при хорошем качестве данных. Асимметрия, шум в данных и неправильная классификация увеличивают погрешность во всех категориях.

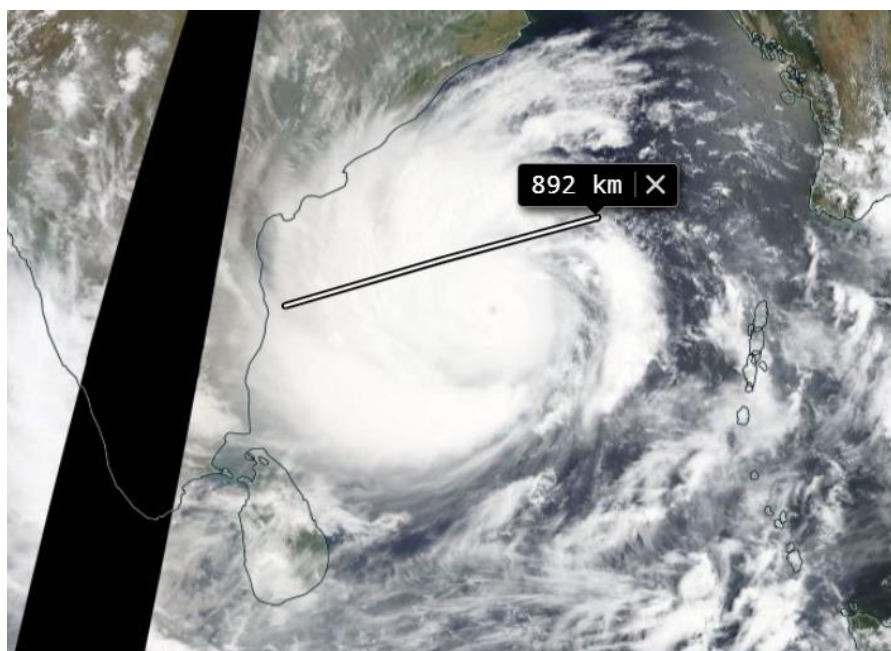


Рис 1.24: Тропический циклон (категория 4) 18.05.2020

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=10.491,82.598,6z/date=2020-05-18,am>

D= 892 KM

$$= \frac{892 \text{ KM}}{111,1^{\circ}} = 8,02^{\circ}$$

Через график мы получаем максимальную скорость

$$V = 77 \text{ м/с}$$

Возьмем тропический шторм со снимка. Его облачность относится к категории 3. Диаметр внешнего круга составляет 2 градусов. По графику Хьюберта (Рис. 1.13) получаем скорость ветра 24 м/с.



Рис 1.25: Тропический шторм (категория 3) 01.02.25

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=-17.22286,61.39685,8z/date=2025-02-01,am>

$$D = 196 \text{ KM}$$

$$= \frac{196 \text{ KM}}{111,1^\circ} = 2^\circ$$

Через график мы получаем максимальную скорость

$$V = 24 \text{ м/с}$$

Глава 2. Используемые данные и регион исследования

2.1. исследование тропические циклоны в Атлантическом океане

Тропические циклоны в Атлантическом океане являются одними из самых мощных и разрушительных природных явлений на планете. В метеорологии они классифицируются по скорости ветра от тропических депрессий до ураганов пятой категории по шкале Саффира — Симпсона.

Основным регионом формирования циклонов считается «основная зона развития», которая простирается от побережья Африки до Карибского моря. Для зарождения шторма необходимы особые условия: температура поверхности воды выше 26,5 градусов по Цельсию, высокая влажность в средних слоях тропосферы и низкий вертикальный сдвиг ветра. Сезон активности в Атлантике официально длится с 1 июня по 30 ноября, достигая пика в сентябре.

Текущие исследования сосредоточены на нескольких ключевых областях. Ученые используют данные со спутников, метеорологических зондов и специализированных истребителей ураганов для точной настройки математических моделей прогнозирования. Особое внимание уделяется явлению "взрывной интенсификации", при котором скорость ветра в центре циклона резко возрастает за короткое время, что представляет наибольшую опасность для населенных пунктов.

Статистический анализ данных за последние десятилетия указывает на изменения в характере штормов. Исследователи отмечают тенденцию к замедлению скорости движения циклонов, что приводит к увеличению продолжительности ливней на определенных территориях. Также отмечается географическое расширение активности штормов на север, за пределы традиционных тропических широт.

Влияние глобальных климатических циклов, таких как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, играет решающую роль в интенсивности каждого сезона. В фазе Ла-Нинья условия в Атлантике становятся более благоприятными для образования мощных ураганов

из-за уменьшения сдвига ветра. Изучение этих связей позволяет повысить точность сезонных прогнозов и эффективность подготовки прибрежных служб.

2.2. предсказывать путь тропических циклонов

Чтобы предсказать траекторию тропических циклонов, метеорологи используют комплексный подход, сочетающий исторические данные, физические измерения и компьютерное моделирование. Основным инструментом являются прогностические модели, которые делятся на динамические и статистические. Динамические модели решают сложные математические уравнения физики атмосферы. Они учитывают взаимодействие циклона с окружающими воздушными массами, такими как области высокого давления (антициклоны) и низкого давления. Например, антициклон с Азорских Бермудских островов часто действует как «стена», направляющая ураган вдоль его края. Глобальные модели (например, GFS или ECMWF) анализируют состояние атмосферы во всем мире, чтобы понять, какой основной поток «подтолкнет» шторм. Ансамблевое прогнозирование используется для повышения точности. Вместо того, чтобы запускать модель, ученые запускают ее десятки раз с небольшими изменениями в исходных данных. Если большинство путей в наборе совпадают, доверие к прогнозу возрастает. Если графики («спагетти-модели») сильно расходятся, это говорит о большой неопределенности. Данные прямого обнаружения играют ключевую роль. Охотники за ураганами сбрасывают специальные датчики (дропзонды) непосредственно во время шторма и вокруг него. Эти приборы передают информацию о давлении, влажности и векторе ветра на разных высотах, что позволяет уточнить текущее положение центра циклона и силы, влияющие на его смещение. Статистические методы основаны на архивных данных о подобных штормах в прошлом при аналогичных атмосферных условиях. Хотя современные суперкомпьютеры уделяют особое внимание физическому моделированию, статистический анализ важен для верификации и долгосрочных оценок. Комбинация данных со спутников, радаров и самолетов, передаваемых мощными вычислительными центрами, позволяет сегодня с высокой вероятностью предсказать путь циклона на 3-5 дней вперед.

2.3. Влияние точности предсказания траектории

На точность предсказания траектории циклона влияет комплекс факторов, связанных как с физическими процессами в атмосфере, так и с техническими возможностями метеорологов.

Основным фактором является качество начальных данных. Любые погрешности в измерениях температуры, давления или влажности на начальном этапе расчетов быстро накапливаются, что ведет к серьезным отклонениям в долгосрочном прогнозе. Для минимизации этих ошибок критически важны данные прямого зондирования, получаемые с помощью самолетов и дропзондов, так как они предоставляют наиболее точную информацию о состоянии «сердца» шторма.

Важную роль играет взаимодействие циклона с крупномасштабными атмосферными объектами. Ошибки в определении местоположения и силы окружающих антициклонов и областей низкого давления напрямую сказываются на прогнозе, так как именно эти системы направляют движение шторма.

Техническая мощность суперкомпьютеров и детальность используемых физических моделей определяют, насколько точно программа может просчитать сложные уравнения физики атмосферы. Использование ансамблевого прогнозирования позволяет оценить степень неопределенности: чем меньше расходятся линии «спагетти-моделей», тем выше достоверность предсказания.

Наконец, на точность влияет заблаговременность прогноза. Современные методы обеспечивают высокую вероятность совпадения траектории на период от 3 до 5 дней, однако при увеличении этого срока влияние хаотичных атмосферных процессов возрастает, снижая надежность расчетов.

2.4. Описание региона исследования

Основным регионом исследования является тропическая зона Малых Антильских островов, представляющая собой островную дугу в восточной части Карибского моря. Географически данная область ограничена координатами между 10° и 20° северной широты. На представленном спутниковом снимке (Рисунок 5) этот регион выделен и подробно детализирован красной стрелкой, указывающей на цепочку островов, включающую Гваделупу, Доминику, Мартинику, Сент-Люсию, Сент-Винсент и Гренадины, а также Гренаду и Барбадос. Исследование охватывает эту акваторию как зону с влажным тропическим климатом, находящуюся под постоянным воздействием пассатной циркуляции и сезонных колебаний Азорского антициклона.



Рис 1.26: к северу от дуги находится Пуэрто-Рико ($18,22^{\circ}$ с. ш., $-66,59^{\circ}$ В. Д.), В центре Гваделупа ($16,24^{\circ}$ с. ш., $-61,53^{\circ}$ В. Д.), Мартиника ($14,64^{\circ}$ с. ш., $-61,02^{\circ}$ В. Д.) (расположена в 189 км от Гваделупы), затем на юг.- Восточная часть Вест-Индской дуги-остров Барбадос ($13,1939^{\circ}$ с. ш., $-59,5432^{\circ}$ В. Д.)

Наша работа сосредоточена на тропической зоне Малых Антильских островов, расположенной в диапазоне 10° северной широты- 20° северной широты (Рисунок 5). Дуга Вест-Индских островов, на которой преобладает влажный тропический климат, находится в основном под влиянием Пассатов, восточного ветра, дующего обычно с северо-востока на юго-запад и создаваемого ежечасной циркуляцией потоков вокруг высокого давления Азорского антициклона, положение и сила которого колеблются в зависимости от погодных условий. сезонные. Тропический климат характеризуется чередованием сухого периода с февраля по середину апреля, называемого "Великий пост» (более Южный Азорский антициклон, устойчивый Пассат с северо-востока, низкие температуры), и влажного сезона с июля по ноябрь, называемого "зимовка" (более южный Азорский антициклон Север, более слабые пассаты, более высокие температуры), который охватывает большую часть сезона циклонов (июнь-ноябрь) . Два сезона разделены двумя более или менее четко определенными переходными периодами (апрель-июнь и декабрь-январь) (Энтони Чен и Тейлор, 2002)

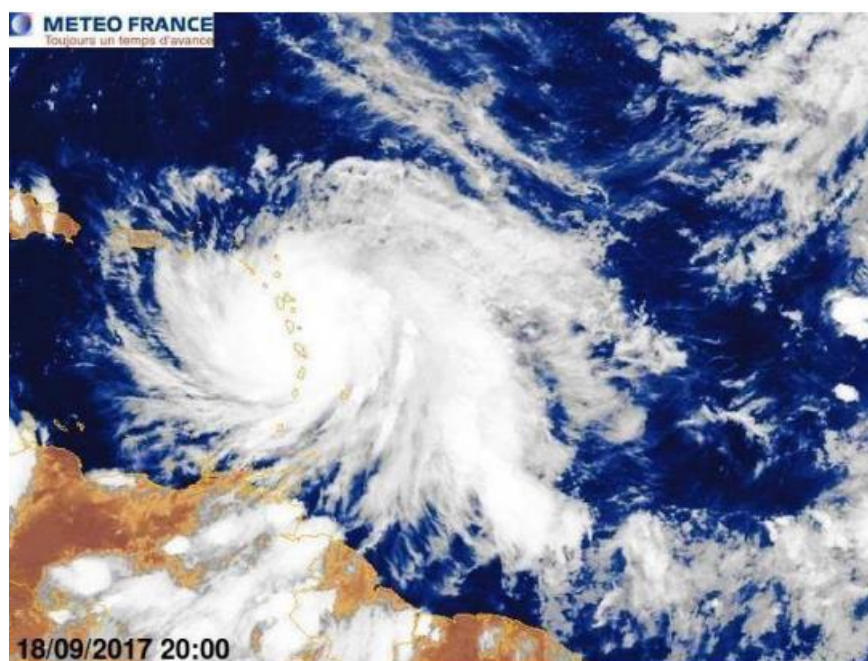


Рис 1.27: ураган Мария (класс 5), проходящий через карибскую дугу 18 сентября 2017г

Колебание NCIT между Амазонкой (в сухой сезон) и Центральной Америкой (во влажный сезон) вызывает подъем конвекционных полос. Колебания температуры

в нашей исследуемой области относительно невелики, порядка нескольких градусов (около 3°C) в течение года (в среднем $\sim 27^{\circ}\text{C}$) (Malardel, 2005).

Данные обрабатываются из базы данных Ibtrac (NOAA). Они характеризуют историческую циклоническую активность, наблюдаемую в Атлантическом бассейне. Эти данные компилируют траектории для систем

тип тропического шторма или урагана категорий 1-5 (устойчивые ветры со скоростью более 17 м/с). Для каждого возникновения циклона точкам сетки

, ближайшим к последовательным позициям центра системы, присваивается значение 1. Затухание по Гауссу радиусом 200 км позволяет присвоить значения от 0 до 1 остальной части области.

Затем плотность выражается как количество циклонических дней за 20-летний период, взвешенное по расстоянию до центров систем

2.5. Механизмы тропического циклогенеза (юго-западной части Индийского океана)

Учитывая важность опасности циклонов и учитывая риск усиления интенсивных тропических явлений, необходимо более глубокое знание процессов, связанных с образованием и усилением циклонов, для улучшения прогнозов. В этой диссертации рассматривается фаза тропического циклогенеза в юго-западной части Индийского океана.

понимания общих принципов

В юго-западной части Индийского океана процессы формирования тропических циклонов были хорошо изучены в результате многочисленных исследований и наблюдений. Эти условия способствуют возникновению и развитию циклонов за счет сочетания нескольких ключевых факторов. Во-первых, в этом регионе температура поверхности океана стабильна, температура воды на важных участках превышает $26,5^{\circ}\text{C}$. Это создает энергетическую базу,

необходимую для развития конвективных процессов и мощных вихрей. Горячая вода активно испаряет влагу, которая насыщает нижнюю атмосферу, что способствует сильной конвекции и образованию облачных систем. Кроме того, в юго-западной части Индийского океана часто встречаются участки с низким вертикальным сдвигом ветров, что улучшает условия организации вихревых систем. Турбулентные атмосферные условия, такие как неустойчивость, возникающая в результате океанских волн, различных фронтов и нерегулярных потоков теплого воздуха, являются началом формирования возмущений-небольших вихрей, которые со временем могут превратиться в полноценные циклонические системы. Ключевым фактором является развитие конвективных процессов: теплый влажный воздух активно поднимается в атмосферу, образуя мощные облака. Внутри таких систем создается низкое давление, которое притягивает ветры из окружающих областей, кружась вокруг центра возмущения. Постепенно эти завихрения усиливаются: конвекция стабилизирует структуру, а горячее ядро — область высокого давления внутри системы-продолжает нагревать конвекцию, создавая внутреннюю энергию, необходимую для роста. Важно, чтобы в центре развивалось так называемое "горячее сердце", где температура воздуха выше средней. Это способствует поддержанию высоких температур и влажности, что улучшает конвекцию и углубление низкого давления в центре циклона. В результате вихрь получает выраженную вертикальную структуру и становится способным к интенсивному усилению. Если условия остаются благоприятными — теплое море продолжает давать энергию, усиливаются ветры и развивается внутренняя динамика — вихрь достигает пороговой скорости ветра около 17 м/с, переходя в стадию тропического шторма. С непрерывным увеличением мощности ветра и внутренней энергии система превращается в полноценный тропический циклон, способный достигать значительной интенсивности. Особенности этого региона, такие как наличие теплых океанских течений (таких как Мадагаскар), сезонные муссоны и относительно низкий баротропный фон, создают благоприятные условия для частого и мощного образования циклонов. Эти особенности делают юго-запад Индийского океана одним из ключевых регионов для изучения механизмов циклогенеза тропических циклонов.

Общее представление о тропическом циклогенезе

Определение различных этапов, ведущих к циклону, дано Фрэнком (1987): это называется «циклогенезом» при переходе от возмущения к тропической депрессии, «развитием» при переходе от депрессии к тропическому шторму (ветры $\geq 17 \text{ м с}^{-1}$) и «усилением» при переходе от шторма к тропическому циклону. (ветер $\geq 33 \text{ м с}^{-1}$). в дальнейшем мы воспользуемся определением

Макбрайда (1995), в котором говорится о « циклогенезе » при переходе от возмущения к тропическому шторму и последующем « усилении». Фаза циклогенеза, описанная Тори и Фрэнком (2010), объединяет последовательность событий, которые приводят к развитию тропического вихря с теплым сердцем, сбалансированного в смысле теплового ветра, что позволяет ему поддерживаться или усиливаться только за счет взаимодействия с теплым морем внизу.. Он состоит из двух отдельных, но одновременных этапов: (1) Создание крупномасштабной среды, благоприятной для развития циклонов, и (2) формирование вихревой циркуляции с горячим сердцем в этой среде.

Шаг 1: благоприятные условия окружающей среды

Большинство циклонических циркуляций образуется в баротропных условиях, то есть в атмосфере, где горизонтальные колебания температуры и давления невелики. Тем не менее, некоторые тропические циклоны могут образовываться и развиваться в более бароклинной среде (заметное изменение температуры в зависимости от широты) в связи с температурным градиентом в нижних слоях и/или воздействием в верхних слоях тропосферы. Тогда структура становится более сложной, часто с теплым сердцем внизу, холодным сердцем сверху и несколько более асимметричной организацией.

Условия, необходимые для образования циклонов

Сегодня существует консенсус в отношении трех термодинамических условий (1-3) и четырех динамических условий (4-7), первоначально упомянутых Греем (1968, 1979, 1985), в которых образуются почти все тропические циклоны:

1. температура поверхности моря (SST) выше 26,5–27°C в сочетании со средней толщиной слоя океанической смеси около 50 м
2. достаточно влажная средняя тропосфера (относительная влажность выше 70%)
3. глубокой конвекции, организованной в области происхождения
4. сильные значения циклонического вихря в нижней тропосфере
5. сходящийся поток в нижней тропосфере в сочетании с расходящимся потоком в верхней тропосфере
6. вертикальный горизонтальный сдвиг ветра (показан на рис. 1.6) менее 12 м с-1 от 850 до 200 гПа

7. достаточная сила Кориолиса на широте более 5° (около 500 км) от экватора.

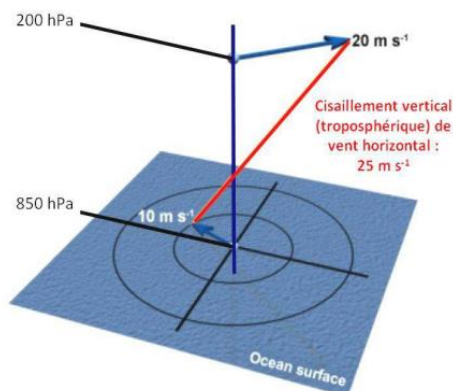


Рисунок 1.28 (источник кометы): пример расчета вертикального сдвига горизонтального ветра.

Meetoo C. C. Étude des conditions de cyclogénèse tropicale sur le sud-ouest de l'océan Indien : дис. – Université Toulouse III Paul Sabatier, 2014. Стр 21

Макбрайд и Зер (1981) и Зер (1992) подчеркивают важность циркуляций и вихрей в циклогенезе: большинство штормов образуются в областях, где антициклонические циркуляции в верхней тропосфере сочетаются с циклоническими циркуляциями в нижней тропосфере. Курихара и Тулея (1981) первыми показали, что циклогенезу способствует слабый сдвиг ветра между 850 и 200 гПа. Бистер и Эмануэль (1997), они подчеркивают необходимость влажной атмосферы в нижней и средней тропосфере для подавления негативного воздействия нисходящих потоков.

Все термодинамические условия для циклогенеза обычно складываются на обширных участках океана в течение лета в Северном и Южном полушариях. Действительно, например, температура поверхности океана, показанная на рисунке 1.7 для июня (бореальное лето) и декабря (южное лето), всегда выше порога в $26,5-27^\circ\text{C}$ в сезон циклонов. Поскольку тропический циклогенез не является частое явление, поэтому этих условий недостаточно для циклогенетического развития.

Динамические условия, которые определяют циклоническую эволюцию постоянного облачного скопления, все еще недостаточно изучены. Динамические параметры трудно наблюдать, поскольку они обладают меньшей инерцией и иногда могут значительно изменяться в пространстве и времени. Кроме того, то,

как крупномасштабные явления, такие как экваториальные волны, модулируют эти параметры, трудно изучить из-за отсутствия наблюдений *in situ* в обширных океанах, принимающих циклогенез. С некоторых пор однако в течение многих лет большая часть работы сосредоточена на этих аспектах циклогенеза с помощью новых технологических инструментов (численное моделирование, спутниковые снимки) и проведенных кампаний измерений.

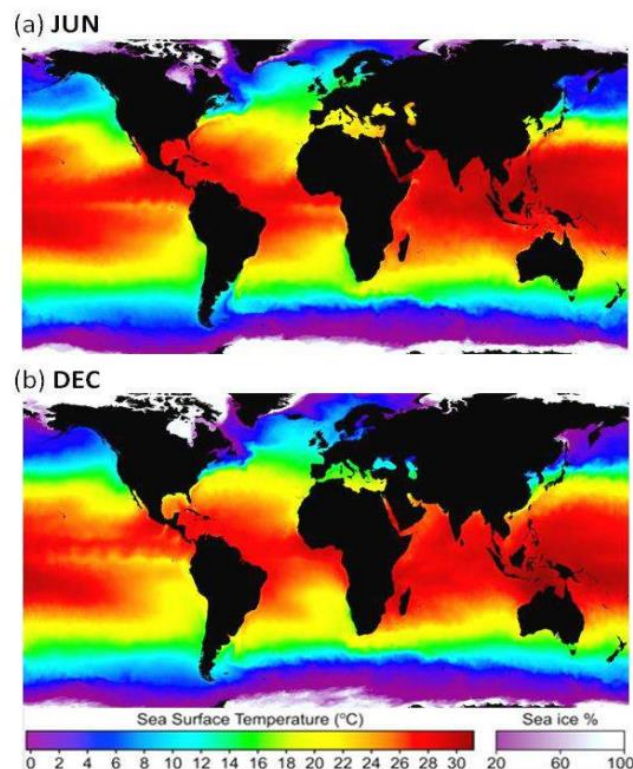


Рисунок 1.29 (источник в Остии / метеорологическом бюро): карта средних температур моря в июне (а) и декабре (б)

Meetoo C. C. Étude des conditions de cyclogénèse tropicale sur le sud-ouest de l'océan Indien : дис. — Université Toulouse III Paul Sabatier, 2014. Стр 22

2.6. Муссонная депрессия, колебания Мэддена-Джулиана и экваториальные волны

Грей (1968) первым отметил образование большинства штормов вблизи муссонной впадины, области низкого давления в зоне межтропической конвергенции (МКЗТ ; сезонные колебания которой приведены на рисунке 1.8). В этой зоне созданы благоприятные условия, отвечающие всем необходимым

условиям. Наблюдения и численное моделирование (Феррейра и Шуберт, 1997 ; Ван И Франк 1999 ; Ван И Магнусдоттир 2005, 2006) показывают, что когда муссонная депрессия сохраняется достаточно долго, она может дать начало к тропическим циклонам. Этот процесс может быть ускорен влияниями, не входящими в ЗСИТ. Некоторым случаям циклогенеза на северо-западе Тихого океана способствует влияние среднеширотной депрессии к северо-северо-западу от восточной части муссонной депрессии (Briegel and Frank 1997).

Кроме того, несколько исследований показали влияние различных типов экваториальных мод распространения на тропический циклогенез: колебание Мэддена-Джулиана (МЮ), западные экваториальные волны Россби, западные смешанные гравитационные волны Россби, восточные волны Кельвина и (5) восточные африканские волны, которые, в свою очередь, ограничены Северным полушарием. МЮ, а также экваториальные волны подробно описаны в главе 3, посвященной изучению их влияния на циклогенез. Фрэнк и Раунди (2006) предлагают что большинство циклогенетических изменений происходит во время взаимодействия этих способов размножения с муссонной депрессией, которая образует районы, где условия окружающей среды превышают необходимые условия для образования.

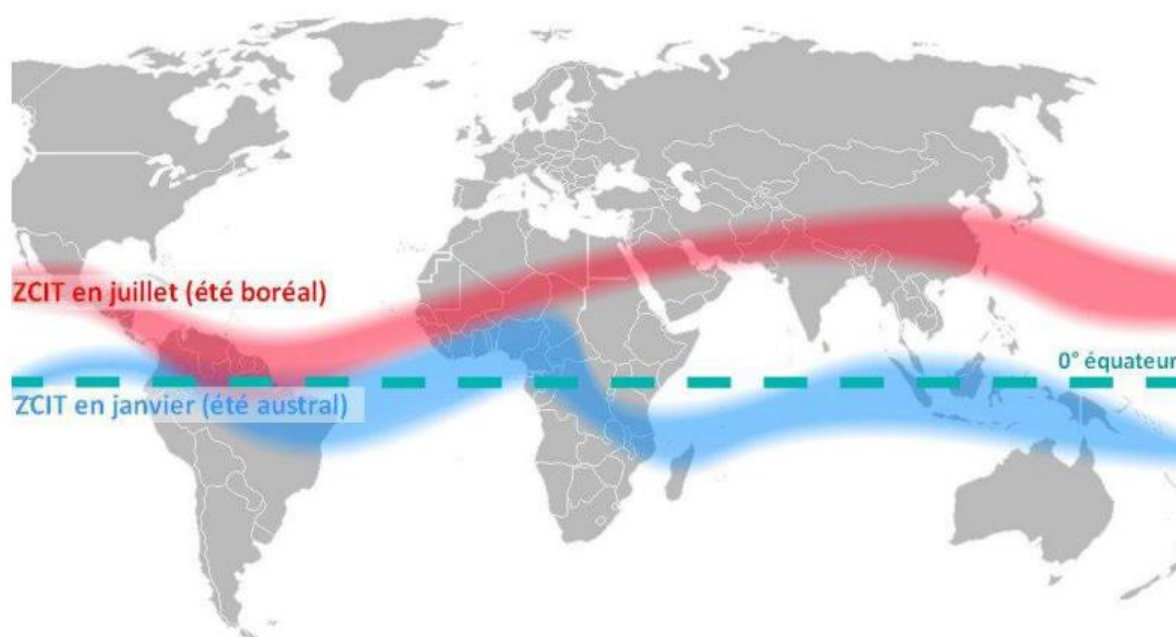


Рисунок 1.30 : расположение NCIT в течение северного лета (красным цветом) и в течение южного лета (синим цветом) по отношению к экватору (зеленым цветом).

Предшественники высоких широт

Некоторые циклонические образования могут возникать за пределами 20° широты, а иногда и за пределами 30° , особенно в северной части Атлантического бассейна. Мактаггарт-Коуэн и соавт. (2008), среди прочего, пришли к выводу, что происхождение, вызванное бароклинными возмущениями внетропического происхождения, такими как высокие тропосферные тальвеги или понижающиеся фронтальные зоны, способствовало почти 40% случаев циклогенеза в этом бассейне.

Шаг 2: построение вихря

Тропическим циклонам удастся поддерживать себя и становиться автономными, когда они достигают стадии тропической депрессии, т. е. когда энергия, получаемая за счет скрытого выделения тепла, перевешивает рассеивающий эффект трения (Rotunno and Emanuel 1987).

Формирование циклонического возмущения в пределах MCS

То, что происходит до обретения автономии на стадии депрессии, то есть то, что запускает построение вихря, до сих пор является предметом многих работ сегодня. Один из возможных путей связан с образованием циклонических циркуляций в тропических среднемасштабных конвективных системах (MCS / Мезомасштабные конвективные системы). MCS - это совокупность сильных гроз с горизонтальной протяженностью не менее 100 км, которые могут вызывать проливные дожди и ветер со скоростью более 25 м с-1. Они облака и осадки могут образовывать, например, линию зерен или дугообразное зерно. Структурно идеализированный MCS содержит относительно ограниченную область конвекции (конвергенция в нижней тропосфере; расхождение в верхней тропосфере) и более широкую стратиформную область (конвергенция в средней тропосфере ; расхождение в нижней и верхней тропосферах).

В пределах среднетропосферной конвергенции стратиформной области MCS могут возникать вихри среднего масштаба (MCV / Мезомасштабная конвективная Вихри). По балансу теплового ветра существует аномалия холода ниже одного ССЗ (в нижней тропосфере) и теплая аномалия выше (в верхней тропосфере).

Три теории «слияния сверху вниз», "нисходящего душа сверху вниз » и "снизу вверх» пытаются объяснить, как один (или несколько) ССЗ могут привести к образованию и/или усилению вихря на поверхности. Эти теории были выведены на основе наблюдений и результатов моделирования идеализированных или реальных конкретных случаев.

В первой теории (слияние сверху вниз), предложенной Ричи и Холландом (1997) и Симпсоном и соавт. (1997), в стратиформной области МКС существует два или более ССВ средней тропосферы. Эти MCV сливаются в более крупный вихрь, эффект которого усиливается и ощущается на большей толщине атмосферы, тем самым влияя на развитие на поверхности.

Во второй теории (Верхний Нижний душ), предложенной Эмануэлем (1993) и Бистером и Эмануэлем (1997), в этом районе существует сердечно-сосудистая система средней тропосферы слоистая форма MCS. Продолжительные осадки в сочетании со слоистыми облаками вызывают постепенное насыщение относительно сухого слоя под облаком, вызывая охлаждение в нижних слоях и образование нисходящего потока, который выходит из циклонического вихря на поверхность. Охлаждение приводит к расширению циркуляции из средней тропосферы вниз. Постепенное потепление нижних слоев поверхностью океана способствовало бы развитию конвекции в нижних слоях, что впоследствии привело бы к конвергенции и циклонической циркуляции.

В третьей (восходящей) теории, вдохновленной Зером (1992) и предложенной Монтгомери и Энагио (1998) и Энаджионо и Монтгомери (2001), потенциальная вихревая аномалия (PV / потенциальная завихренность), возникающая независимо, выравнивается в соответствии с Сердечно-сосудистые заболевания с помощью конвективных восходящих потоков. Взаимодействие между аномалией PV и MCV приводит к усилению вихря в нижней тропосфере, тем самым изменяя циркуляцию под MCV и создавая конвергенцию в нижних слоях.

Синтез теорий

Все эти теории образования ядра циклона, обобщенные на рис.1.9, вносят вклад в тропический циклогенез. Достаточно сильная циклоническая циркуляция (слияние сверху вниз, насадка для душа сверху вниз) в сочетании с достаточной влажностью нижней тропосферы (насадка для душа сверху вниз) позволяет поддерживать водоворот, связанный с глубокой конвекцией (снизу вверх) на довольно большой площади, что необходимо для поддержания циркуляции. усиление вихря.

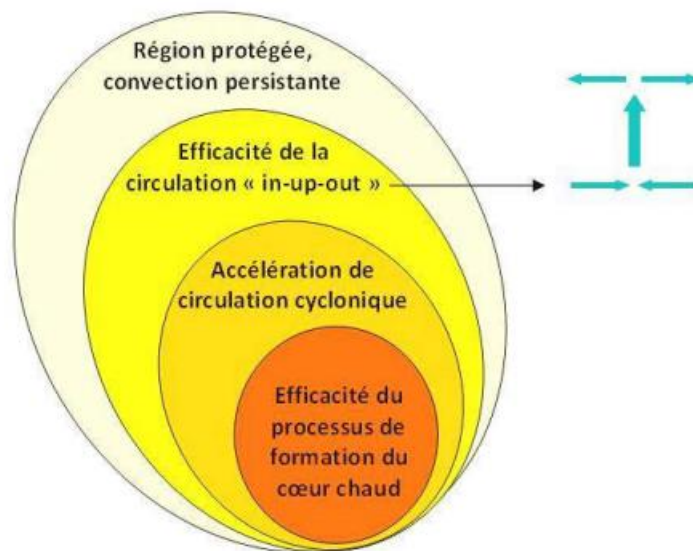


Рисунок 1.31: схема процессов, ведущих к образованию ядра циклона.

Meetoo C. C. Étude des conditions de cyclogénèse tropicale sur le sud-ouest de l'océan Indien : дис. — Université Toulouse III Paul Sabatier, 2014. Стр 25

2.7. Характеристика использованных данных

Данные, полученные в результате моделирования климатической модели арпеджио. Они характеризуют разницу между будущей циклонической активностью в период 2031-2080 гг. (сценарий МГЭИК RCP 8.5) и исторической циклонической активностью в период 1965-2013 гг. Эти данные компилируют траектории для систем типа тропических штормов или ураганов категорий 1-5 (сильные устойчивые ветры со скоростью 17 м/с). Для каждого возникновения циклона точкам сетки, ближайшим к последовательным позициям центра

системы, присваивается значение 1. Распад Гауссова шкала радиуса 200 км позволяет присваивать значения от 0 до 1 остальной части области. Затем плотность выражается как количество циклонических дней за 20-летний период, взвешенное по расстоянию до центров систем. Наконец, плотность, соответствующая историческому периоду, вычитается из плотности, соответствующей будущему сценарию.

Данные, полученные в результате моделирования модели WAVEWATCH3, которые характеризуют среднее историческое состояние моря во время пика сезона циклонов (19 августа-26 сентября). Они получены путем усреднения значительных высот волн (в среднем одной трети самых высоких волн), моделируемых моделью ежечасно по всем 30 пикам сезона циклонов в период 1985-2014 годов. Волновая модель формируется под воздействием поверхностных ветров, возникающих в модели арпеджио-климат, и отдаленных волн, возникающих в модели MFWAM. Эти данные охватывают Вест-Индскую дугу и территории Французской Вест-Индии.

Данные, полученные в результате моделирования модели WAVEWATCH3, которые характеризуют разницу в среднем состоянии моря между периодом 2051-2080 гг. (сценарий IPCC RCP 8.5) и периодом 1984-2013 гг. Расчет ограничен пиком сезона циклонов: 17 августа-18 сентября для будущего и 17 августа-15 сентября для исторического. Эта карта получается путем вычитания среднего значения значимых высот исторических волн (см. таблицу значимых высот волн, смоделированную на французских Антильских островах) из среднего значения значимых высот волн в будущем сценарии.

Глава 3. Результаты анализа и типизация сценариев

3.1. Анализ траекторий и плотности циклонов

Прогноз плотности траекторий на следующие 50 лет основан на текущих климатических моделях, которые указывают на несколько ключевых тенденций в Атлантическом океане. Ожидается, что зоны активности распространятся на более высокие широты. Из-за повышения температуры на поверхности океана тропические циклоны смогут дольше сохранять свою энергию, перемещаясь дальше на север и Восток. Это означает, что области с высокой плотностью

траекторий (желтые и оранжевые области на карте) могут приближаться к побережьям Западной Европы и северных штатов США. Вероятен застой или замедление скорости движения штормов. Исследования показывают, что в будущем циклоны могут чаще «пролетать» над определенными участками суши или моря, что приведет к увеличению количества «циклонических дней» в определенных местах, даже если общее количество штормов существенно не изменится. Это значительно увеличивает риск экстремальных наводнений. Район происхождения штормов у побережья Африки может стать более активным и стабильным. Ожидается, что "основной регион развития" (MDR) в тропической Атлантике расширится, создав более плотный циклонический коридор к Малым Антильским островам и Карибскому морю. Прогнозируется увеличение доли сильных штормов (категории 4 и 5) с возможным сокращением общего числа слабых тропических систем. Для карты плотности это означает появление более выраженных "узких коридоров" с чрезвычайно высокими значениями активности в местах, где условия океана наиболее благоприятны для быстрой интенсификации.

Основная зона прохождения циклонов, часто называемая "проходом ураганов", традиционно расположена в тропической Атлантике. Он начинается у западного побережья Африки, пересекает Карибское море и направляется к Мексиканскому заливу или вдоль восточного побережья Соединенных Штатов. В этой зоне сосредоточена наибольшая плотность траекторий, поскольку сочетаются идеальные условия: высокая температура воды и благоприятные воздушные потоки. На картах плотности этот "коридор" обычно выделяется яркими цветами, обозначающими пути, по которым исторически шло большинство тропических систем. Смещение этой области даже на несколько градусов может радикально изменить климатическое давление на прибрежные районы, увеличивая частоту штормов там, где они ранее были редкостью. Изучение этих коридоров позволяет более точно определить наиболее уязвимые участки суши и адаптировать инфраструктуру к будущим вызовам.

На представленной карте долгосрочного прогноза к 2080 году (анализ изменений за 20-летний период) видны ключевые изменения в распределении циклонической активности в Северной Атлантике.

Синие зоны с диагональной штриховкой указывают на наиболее значительное снижение количества «циклонических дней» (со статистической значимостью более 95%). Эта зона охватывает значительную часть Карибского бассейна,

Мексиканский залив и центральные тропические широты Атлантики. Это может означать, что общее число слабых и средних штормов в этих традиционных регионах уменьшится.

Красные зоны, напротив, демонстрируют области прогнозируемого роста активности. Особое внимание привлекает область у берегов Западной Африки и обширная зона в Центральной и Северо-Восточной Атлантике, направленная в сторону Европы. Это указывает на возможный сдвиг траекторий штормов на север и восток. Штормы могут чаще зарождаться в более теплых водах у Африки и уходить по более крутым траекториям в открытый океан или в сторону Азорских островов и Европы.

Штриховка (90–95% и более 95%) подтверждает, что эти изменения не являются случайными колебаниями, а представляют собой устойчивый тренд, вызванный изменением атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана к концу века. Таким образом, к 2080 году привычная «аллея ураганов» может стать менее активной в своей западной части, но при этом расшириться в сторону более высоких широт.

Смещение этой зоны на север может быть вызвано изменением температурного градиента между экватором и полюсами. По мере прогрева планеты Арктика нагревается быстрее, чем тропические широты, что ослабляет температурную разницу, которая традиционно удерживает струйные течения на определенных широтах.

Сравнение 1.17 и 1.19

сравнивая две карты прогнозов на 2080 год. Левая сторона: карта плотности траекторий тропических циклонов за 50-летний период (2030-2080 гг.), показывающая частоту штормов, проходящих через определенные регионы, с цветовой шкалой от синего до ярко-желтого. Правая сторона: прогностическая модель аномалий давления и температуры океана на 2080 год, показывающая смещение траекторий штормов на север.

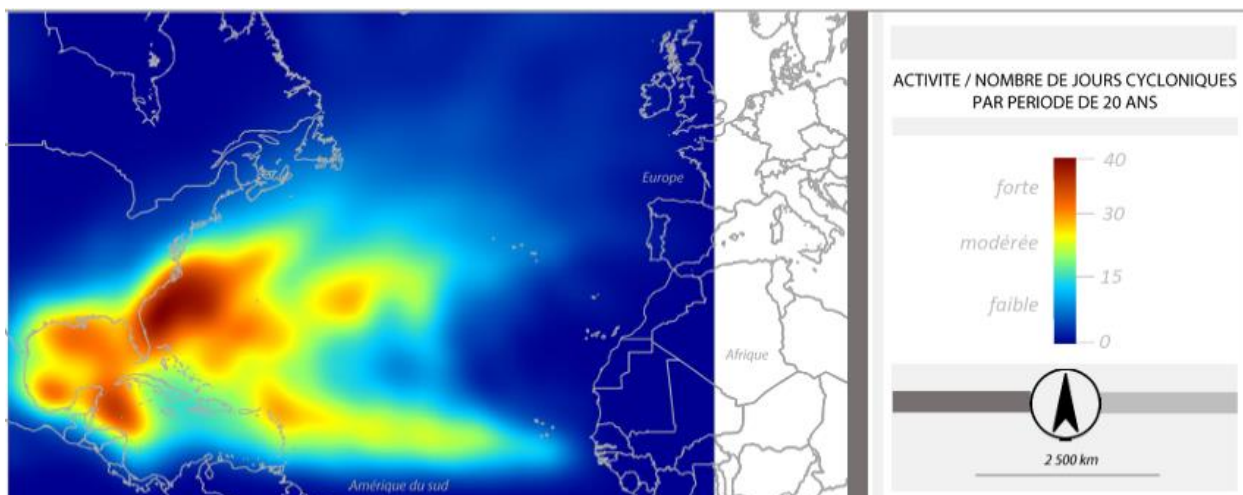


Рис 1.32: Пространственный контроль: Атлантический бассейн Период : 1965 - 2014 гг. Источники: Метеофранс, 2018.

На представленном изображении показана карта активности циклонов в Северной Атлантике, выраженная в количестве «циклонических дней» за 20-летний период. Основываясь на тепловой карте, мы можем выполнить следующий анализ. Наибольшая концентрация циклонической активности (темно-красная, соответствующая 30-40 дням) сосредоточена в западной части Атлантического бассейна. Основной очаг находится в северо-восточной части Карибского бассейна и движется вдоль восточного побережья Соединенных Штатов. Это классический путь тропических циклонов из Северной Атлантики, которые усиливаются над теплыми водами Гольфстрима. Второй ярко выраженный центр активности наблюдается в Мексиканском заливе и Карибском море. Это районы зарождения и усиления ураганов, которые часто обрушиваются на Центральную Америку и южные штаты Соединенных Штатов.

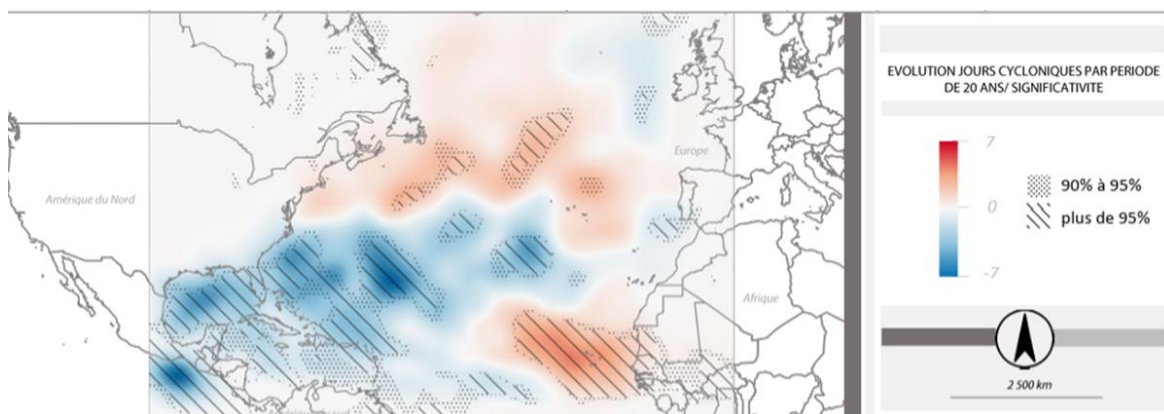


Рис 1.33: Пространственный контроль : Атлантический бассейн Период: 1965-2013/ 2031 - 2080 Источники: Метеофранс, 2018.

Карта показывает динамику количества циклонических дней в Атлантическом океане за 20-летний период. Цветовая шкала отражает изменения: красные тона указывают на увеличение количества таких дней, а синие-на уменьшение.

В Западной и центральной частях тропической Атлантики, включая Карибское море и побережье Северной Америки, существует отчетливая голубая зона. Это указывает на значительное уменьшение количества циклонических дней в этом регионе. В этом случае наличие штриховки «более 95%» указывает на высокую статистическую значимость этих изменений. Напротив, в некоторых частях Центральной и Восточной Атлантики, а также ближе к побережью Африки и в более высоких широтах видны оранжевые и красные области. Это указывает на усиление циклонической активности в этих районах.



Рис 1.34: Пространственный контроль : Вест-Индская Дуга / французские Антильские острова Период : 1984-2013/2051 - 2080 Источник: Метеофранс, 2019.

На этом изображении показана карта изменения высоты волн в Малых Антильских островах, Карибском море и прилегающей части Атлантического океана. Анализ данных показывает следующее: В рассматриваемом регионе преобладает синий цвет. Согласно цветовой шкале справа, это указывает на отрицательную аномалию — уменьшение средней высоты волн до -5 см. la наиболее выраженное снижение (темно-синие тона) наблюдается в открытом море к востоку от Наветренных островов (Гваделупа, Мартиника). Большая часть акватории покрыта косыми штриховками. Подпись гласит, что это означает «более 95%» статистической значимости.

3.2. Результаты кластеризации сценариев эволюции.

3.2.1 Сценарий 1: Быстрая интенсификация над теплым ядром

2017 году мощный ураган по имени Мария обрушился на Карибские острова и южные штаты США. Это был один из самых сильных штормов в истории Атлантики — ураган 5 категории с максимальной скоростью ветра 280 км/ч. Сформированный в сентябре 2017 года, он оставался активным более двух недель и вызвал крупномасштабные разрушения. Больше всего пострадало Пуэрто-Рико: вся страна была лишена электроснабжения из-за повреждения электросетей, тысячи домов были разрушены, а связь и транспорт были серьезно нарушены. Последствия для Пуэрто -Рико были катастрофическими-ущерб оценивался более чем в 90 миллиардов долларов, а восстановление заняло много лет. По оценкам, около 3000 человек погибли и сотни тысяч остались без крова. Также пострадали Гваделупа, Доминиканская Республика и другие острова Карибского бассейна. Впоследствии ураган обрушился на южные штаты США, такие как Флорида, Южная Каролина и Вирджиния, вызвав сильные наводнения, повреждение инфраструктуры и массовую эвакуацию. В некоторых районах поднялись водоемы, что привело к наводнениям и разрушению дорог. Гуманитарные кризисы включали перебои с водой, электричеством и продовольствием. Многим людям пришлось временно покинуть свои дома, а спасательные операции и международная помощь продолжались в течение длительного времени. Восстановительные работы были отложены, несмотря на огромную поддержку правительства США и других стран. Этот ураган вошел в историю как один из самых мощных и разрушительных штормов в Атлантике, нанесший

сокрушительный удар по Карибским островам и южным штатам Соединенных Штатов.

Физический механизм: (подробное описание процессов) образование и усиление ураганов в связи с теплом океана.

Теплота морской воды: образование и усиление ураганов сильно зависят от температуры воды в океане. Когда температура превышает примерно $26,5^{\circ}\text{C}$, тепло переносится в атмосферу за счет увеличения скорости испарения.

Создание конвекционного цикла: тепло, накапливаемое в воде, вызывает интенсивное испарение. Водяной пар поднимается, конденсируется в грозовые облака, выделяя скрытое тепло, которое питает циклон, усиливая его интенсивность.

Основная часть урагана (глаз): тепло продолжает накапливаться в атмосфере, создавая зону низкого давления в центре. Воздух быстро вращается вокруг этой области низкого давления из-за вращения Земли (силы Кориолиса), которая образует циклон.

Роль Кориолиса: сила Кориолиса необходима для обеспечения циклонического вращения. Без этой силы шторм не смог бы превратиться в структурированный ураган.

Эффект усиления температуры океана: в теплое время года, например в сентябре 2017 года, океанское тепло достигает максимума, обеспечивая энергию, необходимую для превращения тропического шторма в ураган категории 5, такой как Мария.

Итог: тепло, накапливаемое в океане, действует как резервуар энергии, который подпитывает тропическую конвекцию и позволяет урагану усиливаться до экстремальных уровней.

в разных спутниковых каналах: ИК, видимый этот сценарий выглядит так:

Инфракрасный (ИК):

Термография показывает горячее сердце (понижение температуры облаков в их центре). Структура видна по-черному или темному пятну в центре, что указывает на сильную конвекцию и четкий глаз. Низкие температуры могут указывать на очень горячий центр (температура ниже -70°C).

Видимый:

Шторм выглядит как концентрированная облачная структура с ясным глазом, часто видимая в ясный день. Характерно образование спиральных облачных полос. Яркость зависит от плотности и толщины облаков, при этом центральная область обычно темнее или ярче в зависимости от освещения.

Количественные критерии

Критерий	значения
Температура облаков	Менее -70°C в глазу, что свидетельствует о высокой интенсивности
Скорость ветра	≥ 119 км / ч для классификации как тропический циклон, скорость до ≥ 280 км / ч для категории 5
Центральное давление	< 920 ГПа (для категории 4-5)
Количество штормов с такими порогами	Менее 20% всех циклонов достигают силы категории 5.

Статистика встречаемости

Процент атлантических циклонов, достигающих различных категорий: Слабые циклоны (категория 1-2): около 70-75% Сильные (категория 3-4): около 20-25% Очень сильный (категория 5): менее 5% (около 3-4%) Процент циклонов, достигающих критерия высокой интенсивности (ветер > 200 км / ч и давление < 940 гПа): около 10-15%.

3.2.2 Сценарий 2: Ослабление из-за сильного сдвига ветра

Тропические циклоны часто возникают в зоне межтропической конвергенции, но также могут образовываться из низких депрессий, когда стратификация атмосферы нестабильна и воздух близок к насыщению, что способствует конвективному подъему и скрытому выделению тепла. И наоборот, антициклонические вихри образуются в зонах повышенного атмосферного давления, где ветры дуют в направлении, противоположном циклонам (по часовой стрелке в Северном полушарии и против часовой стрелки в Южном полушарии). Эти системы обычно встречаются реже и менее интенсивны в тропиках, проявляясь в основном в виде субтропических антициклонов, которые доминируют в определенных районах океана, таких как Азорские острова или Гонолулу. Антициклоны способствуют осадждению воздуха, ограничивая конвекцию и нестабильность атмосферы, что снижает образование облаков и количество интенсивных осадков. В жизненном цикле тропических циклонов развиваются циклонические вихри, проходящие через формирование, развитие, созревание, а затем ослабление. Ослабление может быть вызвано сильным сдвигом ветра, который нарушает симметрию циклона, смещает его центр конвекции и повышает температуру верхних слоев облаков.

Физический механизм (подробное описание процессов)

В сценарии показывает, что происходит ослабление тропического циклона при сильном сдвиге ветра. Основная причина этого связана с следующими процессами:

Усиление вертикального сдвига ветра: Это означает, что ветры на разных высотных уровнях атмосферы начинают значительно различаться по скорости и направлению. При сильном сдвиге ветров верхние слои очень сильно сдвигаются быстрее или в другом направлении по сравнению с нижними слоями.

Нарушение симметрии и стабильности циклона: Циклон – это в основном симметричная система, где теплообмен и конвекция сосредоточены в центре. Усиление вертикального сдвига ветра разрушает эту симметрию, перемещая центр конвекции и мешая устойчивому развитию структуры.

Разрушение внутренней циркуляции: Из-за сильного вертикального сдвига ветра конвективные процессы и тепло насыщенные облака смещаются, что

приводит к снижению интенсивности циклона. Температуры верхних слоев облаков повышаются, а асимметрия усиливается.

Рост температуры вершины облаков: В результате смещения центра и разрушения структурных связей температура вершины облаков растет, что свидетельствует о разрыве циркуляции и недостатке созревания системных элементов циклонной структуры.

Итог: Ослабление и даже разрушение циклона

Усиление вертикального сдвига ветра ведет к увеличению асимметрии, смещению центра конвекции и уменьшению организации системы, что в конечном итоге вызывает ее ослабление или полное разрушение.

в разных спутниковых каналах: ИК, видимый этот сценарий выглядит так:

Инфракрасный (ИК):

Визуализирует температуру облаков; теплый центр с холодным ядром (плотные облака) указывает на интенсивную область. Очень холодный облачный круг (синий или фиолетовый) сигнализирует о зрелом циклоне.

Видимый:

Позволяет увидеть видимую структуру облаков при дневном свете; циклон выглядит как облачная спираль с четким глазом в центре, окруженная прямолинейными или спиральными облачными полосами.

Количественные критерии

Критерий	значения
Температура облаков	Очень холодные облака (например, $> -70^{\circ}\text{C}$) указывают на интенсивную конвекцию.
Скорость ветра	<17 м/с : тропическое возмущение ; 17-20 м/с : депрессия ; 20-38 м/с : тропический шторм ; >39 м / с : тайфун или ураган.
Центральное давление	Обычно ниже 980 гПа для значительного циклона. Экстремальные условия (ураган) часто около 950 гПа или меньше.
Структурированный	Четкий глаз, организованные полосы, характерная циклоническая симметрия.

Статистика встречаемости

Сценарий	% встречаемости в Атлантике
Формирование в результате тропического возмущения	Около 70-80 %
Формирование из специфической слабой депрессии	10-15 %
Трансформация без специфического внешнего воздействия	Остаются редкими (5-10 %)
Отсутствие образования за пределами зоны с теплой водой (менее 27°C)	Практически 0 %

3.2.3. Сценарий 3: Циклическая смена (обновление) стенки глаза

При сильных тропических циклонах (категории 3-5) может происходить процесс внутренней реструктуризации, называемый циклом обновления глазной стенки. Во-первых, вокруг основной (внутренней) стенки глаза образуется второе внешнее кольцо интенсивной конвекции.

На спутниковых снимках это проявляется в появлении двойного (концентрического) глаза. Внешняя стенка постепенно укрепляется и начинает перехватывать приток теплого влажного воздуха, который ранее подавался на внутреннюю стенку.

По мере укрепления внешнего кольца внутренняя стенка ослабевает, разрушается, и глаз временно теряет четкость. В этот период циклон обычно немного ослабевает: максимальная скорость ветра уменьшается, структура становится менее симметричной. После завершения процесса внешняя стенка становится новой основной стенкой глаза. Формируется более широкий и устойчивый глаз, восстанавливается симметрия, и циклон может снова усилиться. В этом случае зона сильных ветров часто расширяется, даже если максимальная скорость ветра не превышает предыдущих значений. (рис 1.36).

Физический механизм (подробное описание процессов)

Это явление, часто называемое "циклом обновления глаза", представляет собой сложный динамический процесс, включающий термодинамические, радиационные и механические взаимодействия. Вот краткое изложение: Образование второго внешнего конвективного кольца: когда циклон достигает значительной интенсивности (категории 3-5), вокруг глаза развивается интенсивная конвекция. Иногда появляется новое внешнее конвекционное кольцо, образующее двойной концентрический глаз. Укрепление внешней стенки : это внешнее конвекционное кольцо улавливает и обменивает тепло с более теплой и влажной средой над океаном, укрепляя стенку глаза. Циклоническая циркуляция вокруг этого кольца усиливается, еще больше задерживая теплый влажный воздух. Ослабление внутренней стенки: потребление энергии (скрытого тепла, выделяемого в результате конденсации) этим внешним кольцом снижает температуру и давление внутри глаза. Внутренняя стенка ослабевает, становится тоньше и в конечном итоге разрушается, что приводит к временному увеличению ширины глаза и потере его четкости на спутниковых снимках. Временная потеря

симметрии и ослабление: потеря согласованности во внутренней структуре приводит к снижению максимальных ветров, увеличению сложности конструкции и некоторой дезорганизации. Восстановление и обновление: в конечном итоге усиленная внешняя стенка становится новой основной структурой, образуя более широкий и устойчивый глаз. Зона сильных ветров расширяется, но максимальная скорость не обязательно меняется, что в конечном итоге позволяет перейти к новой фазе усиления. Этот процесс связан с состоянием динамического квазиравновесия, когда циклон колеблется вокруг переходного состояния внутренней структуры.

в разных спутниковых каналах: ИК, видимый этот сценарий выглядит так:

Спутник канала	Визуальный аспект циклона, продолжающегося в течение всего процесса
ИК (инфракрасный)	Появление двойного кольца холодной конвекции (подчеркнутые области кучевых облаков); глаз может казаться размытым или частично скрытым. Разница температур между глазом и стенкой становится более размытой в переходный период.
Видный	Визуализация двойного концентрического глаза с двумя светящимися кольцами и более темной центральной областью. Структура становится менее симметричной с временным расширением или сужением глаза.

Количественные критерии

Критерий	Порог или типичное значение	Описание / Комментарий
Температура облаков в ИК-диапазоне	$< -50^{\circ}\text{C}$ до -60°C	Представляет собой интенсивную конвекцию.
Максимальная скорость ветра	Обычно снижается на 5-20 км / ч в фазе слабых мест.	Может колебаться, но часто остается > 120 км / ч.
Центральное давление	Временно увеличивается на 2-10 гПа	Из-за перераспределения энергии.
Размер глаза	Значительной протяженности, часто > 50 км.	Ширина глаза увеличивается во время цикла.
скорость колебаний	Продолжительность этой фазы обычно составляет от 12 до 36 часов.	Может варьироваться в зависимости от начальная интенсивность.

Статистика встречаемости

Циклоны, которые подвергаются такому процессу обновления глаз, составляют ограниченную, но значительную часть очень интенсивных циклонов: Расчетный процент: примерно 15-25 % атлантических циклонов категорий 3-5 (очень сильные циклоны) могут иметь эту фазу цикла обновления. Влияющие факторы: наличие теплого слоя в нижних слоях, атмосферные условия, благоприятные для интенсивной конвекции, и хорошо организованная исходная структура увеличивают шансы на это развитие.

3.2.4. Сценарий 4: Разрушение структуры при взаимодействии с орографией

Основным регионом исследования в данном сценарии является Центральное нагорье (Высокое плато) Мадагаскара, а также прилегающий к нему восточный береговой склон.

Сценарий: влияние горного рельефа Мадагаскара на разрушение структуры циклона (на примере циклона Джованна, 2012 г.) При выходе мощного тропического циклона на восточное побережье Мадагаскара его структура начинает быстро меняться под влиянием сложного горного рельефа острова.

Центральная часть Мадагаскара представляет собой возвышенное плато с горными хребтами высотой более 1000 метров. Когда циклон, такой как ураган Джованна, движется по острову, происходит несколько ключевых процессов.

Во-первых, трение о поверхность Земли резко возрастает. Это замедляет циркуляцию на поверхности и ослабляет поле ветра. Приток теплого влажного воздуха, который привел в действие циклон над океаном, нарушен.

Во-вторых, горные массивы искажают вихрь низкого уровня. Воздушные потоки вынуждены обходить высоты и подниматься вверх, что приводит к нарушению симметрии циклона. Центр циркуляции может сместиться, и вертикальная структура вихря может разрушиться.

В-третьих, существует несоответствие между нижним и верхним уровнями атмосферы. Когда нижний центр циркуляции ослабевает и смещается из-за рельефа, верхняя часть циклона теряет устойчивую опору. Это приводит к разрушению стенки глаза и нарушению организованной конвекции.

В конечном счете: глаз циклона размыт или полностью исчезает, кольцевая структура облачности распадается, максимальные ветры быстро ослабевают, система становится асимметричной.

Физический механизм (подробное описание процессов)

Это явление в основном связано с топографическим взаимодействием с циклоном в фазе рассеивания или деградации, вызванным воздействием сложного горного рельефа Мадагаскара : Повышенное поверхностное трение: когда циклон проносится над гористой местностью, шероховатая поверхность увеличивает трение воздуха о землю. Механическое сопротивление замедляет циркуляцию на

уровне поверхности, что снижает скорость ветра. Происходит рассеивание поверхностной конвекции, перекрывая подачу влаги и тепла, необходимых для поддержания циклонической конвекции. Вихревая деформация из-за орографии: горные массивы ограничивают и искажают воздушные потоки, особенно на малых высотах. Вихрь, который обычно является симметричным, становится деформированным, его центрированная циркуляция может смещаться или становиться неорганизованной. Восходящий поток теплого воздуха вдоль склонов поднимается на большую высоту, нарушая вертикальную структуру циклона. Разделение между нижним и верхним уровнями: низменная зона, ослабленная трением и деформацией, быстро дезорганизовывается. Организованная конвекция вокруг глаза затухает, поскольку термодинамическая поддержка уменьшается. Верхняя часть циклона, которая зависит от поверхностной энергии, остается без устойчивой опоры, что приводит к рассеянию глаза и потере его кольцевой структуры. Постепенное затухание: шторм становится асимметричным, максимальные ветры ослабевают, а антициклоническая структура в верхней части исчезает. Вся система распадается на неорганизованный вихрь, часто связанный с депрессией или областью плохой организации.

в разных спутниковых каналах: ИК, видимый этот сценарий выглядит так:

Спутниковый канал	Описание визуальная эволюция
Инфракрасный (ИК)	Центральная структура размыта или разрушена, зона интенсивной конвекции уменьшается, и глаз становится нечетким или исчезает. Температура облаков в верхней части конвекции падает, сигнализируя об ослаблении. Наблюдается отход от глубокой конвекции.
Видный	Четкая кольцевая структура циклона стирается, силуэт становится искаженным или размытым. Область плотных облаков расширяется, глаз исчезает, оставляя диффузное изображение с нечетко очерченным центром. Комплементарность с ИК-излучением показывает потерю подлинной конвекции.

Количественные критерии уничтожения

Критерий	Типичные пороговые значения (приближения)	Записки
Температура облаков (ИК)	$> -20^{\circ}\text{C}$	Повышение температуры указывает на уменьшение глубокой конвекции.
Максимальная скорость ветра	$< 65 \text{ км / ч}$ (классификация по депрессии)	Ниже этого значения циклон находится в фазе рассеяния.
Центральное давление	$> 990 \text{ гПа}$	Чем выше поднимается давление, тем больше рассеивается циклон.
Высота конвекции	Верхние уровни ($> 8 \text{ км}$)	Повышение температуры указывает на уменьшение глубокой конвекции.

Статистика встречаемости для этого сценария в Атлантике

Из всех циклонов в Атлантике около 20-25% испытывают сильное топографическое влияние при прохождении через горные или континентальные районы. Большинство циклонов, которые сталкиваются с очень высокой местностью (например, с горным хребтом), демонстрируют структурную деградацию, аналогичную этому сценарию, но в точном процентном соотношении она остается переменной. Рассеивание проявляется особенно в условиях, когда начальная скорость умеренная (менее 150 км/ч), а контакт с рельефом длительный.

3.3. Иллюстрация выделенных сценариев на примерах тропических циклонов

3.3.1. Ураган Мария (2017)

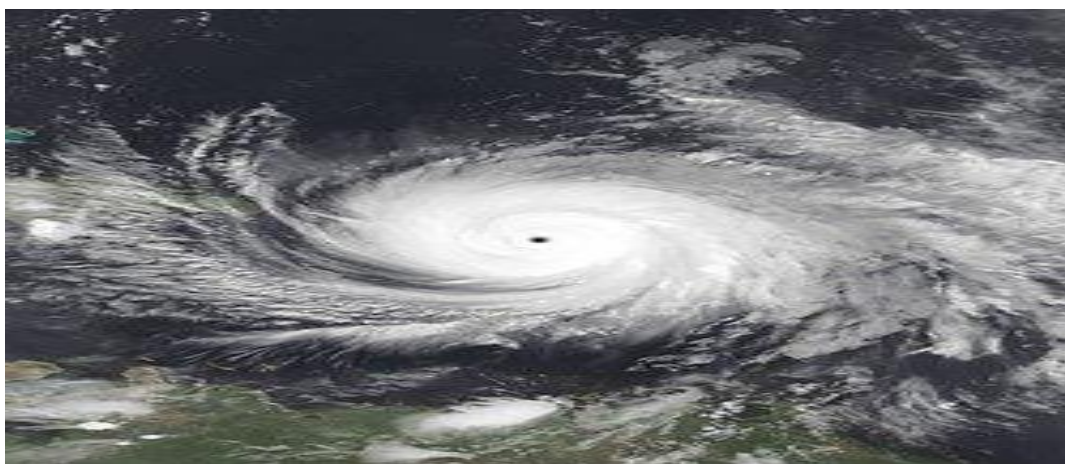


Рис 1.35 Ураган Мария (2017)

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Maria_2017-09-20_0238Z_\(Coastline-less\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Maria_2017-09-20_0238Z_(Coastline-less).jpg)

На снимке показан мощный тропический циклон в Атлантическом бассейне, по своим характеристикам ураган Мария в фазе максимальной интенсивности.

В центре хорошо виден глаз урагана — почти идеальная круглая область с низкой облачностью. Такая структура указывает на чрезвычайно сильную и хорошо организованную систему. Вокруг глаза находится плотная "глазная стенка" (глазная стенка), на которой сосредоточены максимальные скорости ветра и наиболее интенсивные осадки. Четкая симметрия облачного поля и однородная спиральная структура указывают на минимальный вертикальный сдвиг ветра и благоприятные условия для поддержания высокой интенсивности. Облачные спирали закручиваются против часовой стрелки, что соответствует циклонам в Северном полушарии. Внешние полосы дождя (rainbands) хорошо развиты и покрывают большую площадь, что указывает на значительную протяженность шторма. По визуальным признакам система находится в стадии пика или близка к пику своей мощности. Подобная структура характерна для ураганов категории 4-5 по шкале Саффира-Симпсона. Вероятно, в центре очень низкое давление, а скорость ветра

достигает экстремальных значений. В нижней части изображения видна суша, предположительно с Карибских островов, соответствующая траектории урагана Мария, который прошел через Малые Антильские острова и Пуэрто-Рико, вызвав крупномасштабные разрушения.

Таким образом, на изображении показан классический пример высокоорганизованного и чрезвычайно интенсивного атлантического урагана Мария с хорошо выраженным глазом, мощной конвекцией и большой зоной воздействия.

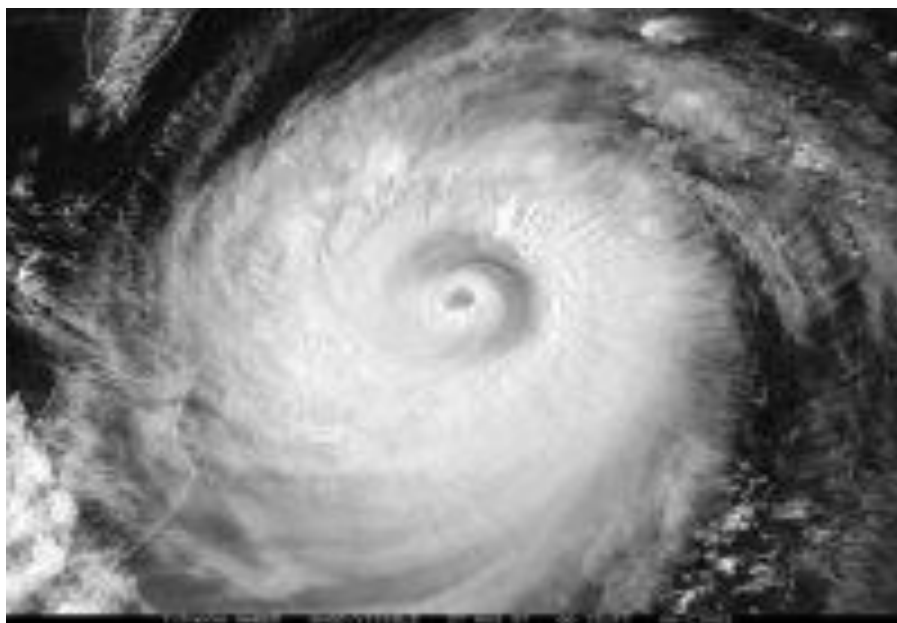


Рис 1.36 тропический циклон есть стенка глаза

<http://meteoweb.ru/img/phenom/phen072-11.jpg>

На снимке показан спутниковый снимок мощного тропического циклона. По характерной структуре облаков можно определить, что это развитый и хорошо организованный ураган. Такие атмосферные системы образуются над теплыми водами океана, когда теплый влажный воздух поднимается вверх, создавая зону пониженного давления. В результате начинает формироваться большая вращающаяся система облаков и гроз.

В центральной части циклона хорошо виден так называемый «глаз» — небольшая круглая область с меньшим количеством облаков. На фотографии он выглядит как светло-серый круг с темной точкой в центре. Око - это относительно спокойная зона ураганов, где ветер значительно слабее, чем в прилегающих районах. Диаметр глаза обычно составляет от 20 до 50 километров. Вокруг глаза находится

самая мощная часть циклона — стенка глаза. Он представлен плотным кольцом светящихся облаков.

Именно здесь наблюдаются самые сильные ветры, сильные ливни и грозы. В этой зоне скорость ветра может достигать более 200 км / ч. плотность и яркость облаков на изображении указывают на сильную конвекцию и сильную силу шторма. Широкие спиральные полосы облаков отходят от центральной части урагана. Они вращаются вокруг центра и постепенно расширяются к периферии. Эти полосы состоят из грозовых облаков и приносят с собой сильные осадки, порывистый ветер и нестабильную погоду. Иногда в таких полосах могут образовываться локальные вихри и торнадо. Структура циклона на снимке выглядит довольно симметричной: облачные спирали равномерно распределены вокруг центра. Такая симметрия обычно указывает на то, что ураган находится в стадии зрелости и достиг высокой интенсивности. Четко очерченный глаз также является признаком сильного и продолжительного шторма. Направление вращения облаков указывает на вращение против часовой стрелки, характерное для тропических циклонов в Северном полушарии. Это связано с действием силы Кориолиса, возникающей в результате вращения Земли. Таким образом, на изображении показан мощный тропический циклон с хорошо сформированным глазом, плотной стеной облаков вокруг центра и развитой системой спиральных полос дождя. Такая структура указывает на сильный ураган, который может вызвать опасные погодные явления, включая разрушительные ветры, проливные дожди и наводнения в районах, которые проходят через него.

3.3.2. Ураган Флоренс (2018) и циклон Бени (2003)



Рис 1.37 Ураган Флоренс 22 сентября 2018

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/97/Florence_2018-09-10_Suomi_NPP.jpg/500px-Florence_2018-09-10_Suomi_NPP.jpg

На этом спутниковом снимке показан мощный тропический циклон в Атлантическом бассейне в фазе высокой интенсивности. Центральная часть системы имеет четко очерченный "глаз бури" — область низкого давления с относительно ясным небом, характерная для ураганов более высокой категории по шкале Саффира — Симпсона. Вокруг центра видна плотная облачная стена, где наблюдаются самые высокие скорости ветра и интенсивные осадки. Спиральные облачные полосы (силовые полосы) простираются на сотни километров от центра, закручиваясь против часовой стрелки, что подтверждает наличие циклона в Северном полушарии. В контексте Атлантического бассейна такие системы обычно образуются над теплыми тропическими водами, где температура поверхности океана превышает $26,5^{\circ}\text{C}$. Изображение показывает, что циклон занимает обширную акваторию, перекачивая тепловую энергию океана в энергию атмосферы.

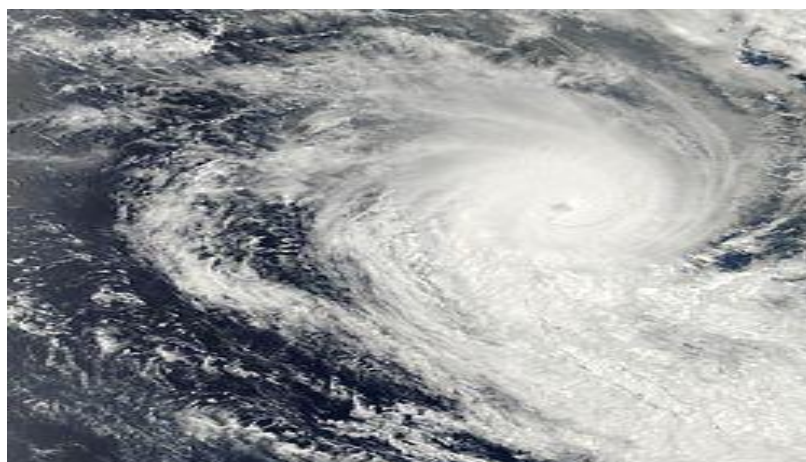


Рис 1.38 циклон Бени (2003)

https://en.wikipedia.org/wiki/File:TC_Beni_29_jan_2003_0315Z.jpg

На снимке показан спутниковый снимок тропического циклона — мощной атмосферной системы, формирующейся над теплыми водами океана. Такие системы возникают в результате интенсивного испарения воды и подъема теплого влажного воздуха, что приводит к образованию зоны пониженного давления и развитию вращающейся облачной структуры.

В центре циклона видимая область может рассматриваться как глаз урагана. Он выглядит как относительно небольшая круглая область с меньшим количеством облаков по сравнению с окружающими областями. Глаз - это центральная часть шторма, где атмосферное давление самое низкое. В этой зоне погодные условия могут быть относительно спокойными, но вокруг нее находится наиболее активная часть циклона. Непосредственно вокруг глаза образуется так называемая глазная стенка — кольцо плотных и высоких грозовых облаков. Именно здесь наблюдаются самые сильные ветры и сильные осадки. На спутниковом снимке эта область выглядит как яркая плотная облачная масса, окружающая центральную часть циклона. Спиральные полосы облаков отходят от центральной части урагана. Эти полосы образуют характерный закрученный узор и постепенно простираются на значительное расстояние от центра шторма. Они состоят из грозовых облаков и сопровождаются проливными дождями, сильными ветрами и нестабильной погодой. Структура облаков на изображении показывает, что циклон имеет хорошо выраженную циркуляцию и развитую облачную систему. При этом заметна определенная асимметрия облачного покрова: в одной части циклона облака более плотные и массивные, чем в другой. Эта характеристика может быть связана с влиянием внешних атмосферных условий, таких как направление ветра в верхних слоях атмосферы или взаимодействие с другими погодными системами. В целом, изображение показывает развитый тропический циклон с мощной облачной системой и признаками интенсивной циркуляции воздуха. Такие штормы могут вызывать сильные ветры, обильные осадки и опасные погодные явления, особенно в районах, расположенных на их пути.

3.3.3. Циклон Джованна (2012)

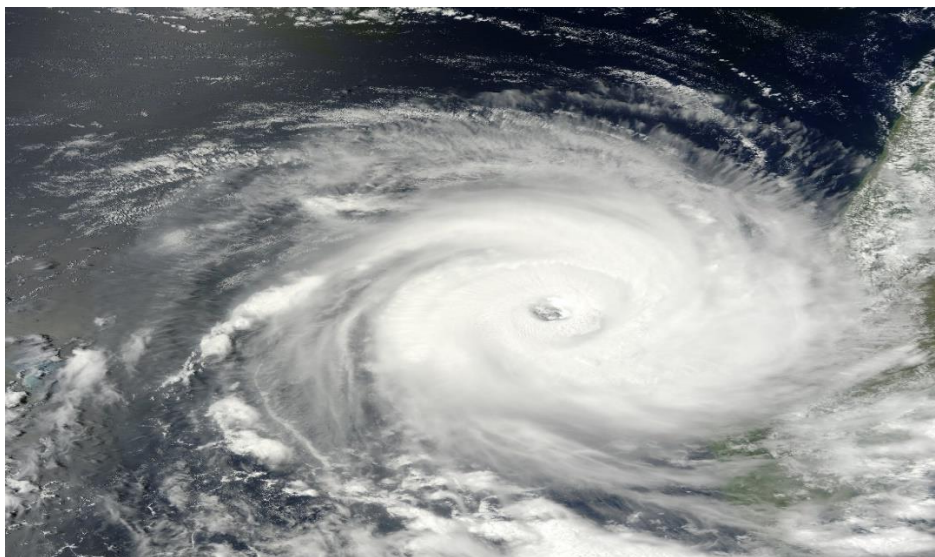


Рис 1.39: Циклон "Джованна" Мадагаскар (2012)

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Giovanna_2012-02-13_0630Z.jpg



Рис:1.40 .Тропический циклон

Особенность строения тропического циклона – наличие глаза бури. Глаз бури – область затишья в центре вихря, имеющая диаметр в нижней части около 30 км (в разрушительных 60–70 км) и расширяющаяся кверху до нескольких сотен километров (на высоте 10–12 км). Образование глаза бури связывают с тем, что силы барического градиента, центробежной и Кориолиса, в этой части циклона уравниваются и воздух остается почти неподвижным. От циклонов умеренных широт, тропические циклоны отличаются: меньшими размерами (их поперечник больше 1000 км). Также большими градиентами давления (минимальное давление, из зарегистрированных, составило 855 ГПа, а в центре одного из ураганов «Тип» на уровне моря – 870 ГПа) и, соответственно, большими скоростями ветра (до 100 м/с); обильными ливнями (400 мм в сутки); сильными грозами.

Типичная траектория тропического циклона напоминает параболу с вершиной, обращенной к западу. От очагов образования тропические вихри 138 движутся сначала с востока на запад в направлении общего переноса воздуха в тропической зоне, затем в обход субтропических антициклонов, в Северном полушарии – на северо-запад, в Южном – на юго-запад. Если тропический циклон достигает умеренных широт, направление его изменяется в соответствии с западным переносом воздуха в этих широтах (в Северном полушарии с северо-западного на северо-восточное). Точка траектории, в которой направление перемещения циклона меняется с северо-западного на северо-восточное, называется точкой поворота.

Тропические циклоны переносят большое количество энергии из низких широт в более высокие широты, но пока их влияние на процессы, происходящие в атмосфере, недостаточно изучено, так же как еще недостаточно ясен механизм их образования.

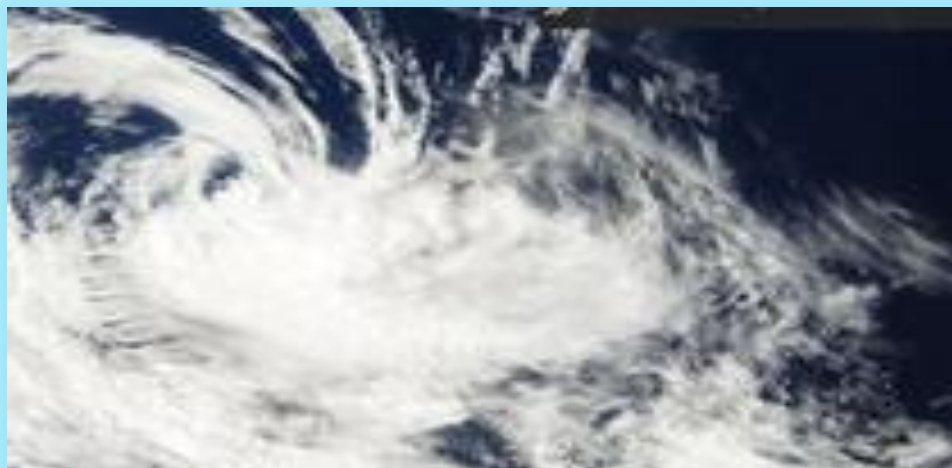


Рис 1.41: циклона тайфуна 26.02.25

<https://zoom.earth/maps/satellite-hd/#view=-23.634,98.773,6z/date=2025-02-26,am>

26 февраля 2025 года в водах теплого океана развивается мощный тропический циклон (тайфун). Система образовалась в зоне пониженного давления над водой с температурами выше +26 °С, что способствовало активной конвекции и постепенной организации облачной структуры в ярко выраженную спираль.

Во время пика интенсивности давление в центре может составлять около 920-950 ГПа, а максимальные порывы ветра достигают 45-60 м/с. Диаметр облачной системы составляет несколько сотен километров. Ожидаются сильные осадки-до 200-300 мм в сутки, штормовой нагон воды и высота волн в открытом море до 8-14 метров.

Прогнозируемое смещение системы - в Северо - западном или северо — восточном направлении, в зависимости от влияния субтропического антициклона и высотных течений. Покидая более холодные воды, можно постепенно ослабеть и перейти в стадию внетропического циклона. Основными рисками являются прибрежные наводнения, повреждение линий электропередач, нарушение работы транспорта и опасность оползней в горных районах. После прохождения пика интенсивности ожидается постепенная потеря симметрии облачной структуры и уменьшение скорости ветра.

4.1. Связь циклонов с циркуляцией атмосферы (Северо-Атлантическое колебание, Эль-Ниньо)

В систему общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии входят четыре круглогодичных (стационарных) центра действия атмосферы: Исландский и Алеутский минимумы, Азорский и Северо-Тихоокеанский (Гонолульский) минимумы, а также два сезонных (зимних) максимума: Сибирский и Северо-Американский.

Если генерализовать особенности распределения давления в Северном полушарии в контрастные сезоны (зима, лето), то их можно свести к следующему. В связи с малой повторяемостью циклонов и снижением их интенсивности Исландская депрессия на карте среднего давления воздуха на уровне моря летом проявляется слабо, а Алеутская почти пропадает совсем, поскольку практически весь Азиатский регион занимает депрессия, которая образуется за счет сильного прогрева материка в субтропических районах.

Летом большей интенсивностью обладают Азорский и Тихоокеанский (Гонолульский) антициклоны, которые постоянно регенерируют при вхождении в их области ядер высокого давления, перемещающихся к юго-западу в тылу циклонических серий. Повторяемость подвижных антициклонов в июле в Атлантическом секторе существенно выше, чем в Тихоокеанском.

Особенно много подвижных антициклонов перемещается на восточную часть Европы вдоль 50-60 меридианов, захватывая Уральский регион. Морфометрические характеристики центров действия (давление в центре, широта и долгота) приводятся в многочисленных работах. Здесь мы коснемся только узкого круга вопросов, имеющих отношение к оценкам тесноты связи указанных центров действия атмосферы с типами циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому, многолетними колебаниями индексов атмосферной циркуляции в Атлантическом и Тихом океанах (Северо-Атлантическое колебание (САК) и Многолетнее Тихоокеанское колебание (МТК)). Здесь же фрагментарно будет рассмотрена связь морфометрических характеристик центров действия атмосферы с температурой и осадками в разных районах Земного шара.

В Атлантическом секторе важнейшей колебательной системой является Северо-Атлантическое колебание. Существуют разные методы расчета индекса САК. Одним из самых простых методов оценки индекса Северо-Атлантического колебания является разность аномалий приземного давления в центрах Исландского минимума и Азорского максимума. Специальный индекс САК рассчитывается как разность нормированных значений давления, измеренного на станциях, характеризующих условия Азорского максимума и Исландского минимума.

В положительной фазе Северо-Атлантического колебания наблюдается более высокое, чем обычно, давление к югу от 55° с. ш. (усиление Азорского максимума) и одновременно более низкое давление над Северной Атлантикой (углубление Исландского минимума). Отрицательная фаза САК характеризуется изменениями давления в центрах действия атмосферы противоположного знака. При этом происходит уменьшение барического градиента в результате ослабления как Азорского, так и Исландского центров действия атмосферы.

Индекс Северо-Атлантического колебания имеет тесную связь ($r = 0,55$) с колебаниями температуры внетропических широт Северного полушария. Низкие температуры в основном сопровождаются отрицательными аномалиями САК. Другие индексы имеют менее тесную связь с температурой внетропических широт Северного полушария. Климат Северной Атлантики и прилегающих к ней Северо-Американского континента и Европы в значительной степени определяются характером атмосферной циркуляции в указанных регионах. Для Северо-Атлантического колебания характерны циклы около 60, 7-8 и двух лет. Указанные циклы в изменении САК более ярко проявляются зимой. Полной ясности относительно характера изменения морфометрических характеристик Исландского минимума и Азорского максимума пока нет. Предположение о южном смещении Исландского минимума и северном смещении Азорского максимума не подтверждается. Авторы указанной работы склоняются к миграции единой циркуляционной системы «Исландский минимум и Азорский максимум» либо в северном, либо в южном направлении относительно своего среднего положения, что в какой-то мере подтверждается сравнительно устойчивой отрицательной корреляцией температуры вблизи восточных и западных берегов Северной Атлантики.

Известно, что при увеличении значений индекса Северо-Атлантического колебания температура воздуха увеличивается на юго-западе Северной Атлантики, Северо-Европейском бассейне и в целом в северной полярной области. В то же время на северо-западе Атлантики температура понижается.

Образование тропических циклонов и влияния атмосферных колебаний

Рост зимних осадков на Восточном побережье Атлантики и Северо-Европейском регионе с увеличением индекса Северо-Атлантического колебания (САДК) указывает на усиление атмосферной активности в этих регионах, что способствует формированию более активных циклонов и ураганов. Энергетика и динамика циркуляции в регионе, как показано в данных, связаны с периодами усиления или ослабления Северо-Атлантического колебания, что может объяснить циклы активности, такие как колебания в интенсивности арктических вторжений и изменение температуры.

Различия в циркуляционных режимах между Атлантическим и Тихоокеанским регионами

Указано, что изменения давления и меридиональные градиенты в Атлантике более выражены и более интенсивно передают воздушные массы, чем в Тихом океане. Это приводит к более сильной динамике циркуляции в Атлантическом секторе, что влияет на увеличение зимних осадков в регионе и на образование штормов, связанных с Атлантическим циклоном. В Тихом океане более слабая циркуляция обусловлена рельефом и протяженностью региона, что способствует формированию муссонных климатов — уникальной особенности, отсутствующей в Атлантике.

Циклическая смена активности и влияние крупных климатических феноменов

Данные о колебаниях активности, таких как 60-летние циклы циркуляции, связаны с влиянием Северо-Атлантического и Северо-Тихо-океанского колебаний. Влияние «Эль-Ниньо — Южное колебание» объясняет, почему изменения в Тихом океане могут влиять на климатические условия в других регионах — как в Европе, так и в Северной Америке. Периоды усиления и ослабления циркуляции, а также связанные с ними потепление и потери ледников, прямо коррелируют с описанными сценариями циклов активности.

Влияние климатических изменений на ледовый покров, арктические вторжения и осадки

Заметное снижение ледовитости в Беринговом и Японском морях, начавшееся еще в 60-х, соответствует сценариям изменения атмосферных потоков и давления, что влияет как на формирование циклонов, так и на распространение арктических вторжений. Эти процессы, в свою очередь, связаны с изменением условий формирования атмосферных фронтов, являющихся элементами циклов, описанных в сценариях.

Изменение давления в Алеутском минимуме влияет на формирование и развитие тропических циклонов. Понижение давления способствует созданию более благоприятных и нестабильных условий в области субтропического фронта, что увеличивает вероятность возникновения сильных ураганов. Колебания давления в минимуме связаны с сдвигами ветровых полей. Эти изменения, в свою очередь, влияют на стабильность и силу тропических и средних широтных вихрей, ухудшая или усиливая их активность. Циклы в Алеутском минимуме (например, 2,2; 4,6; 8,9 лет) могут приводить к периодическим изменениям активности циклонов в Тихом океане. Это влияет на интенсивность и развитие штормов, создавая циклические колебания в их активности. Изменения давления могут усиливать или ослаблять взаимодействие воздушных потоков с рельефом. Особенно в северных широтах, такие взаимодействия влияют на динамику формирования атмосферных систем, что может менять характер циклонов и штормов.

Связь Северо-Атлантического колебания (САК) с сценариями развития тропических циклонов

1. Максимальное развитие, сильные и продолжительные циклоны

Во время позитивных фаз САК (особенно в положительном состоянии) Атлантический океан характеризуется более теплой поверхностью воды и усилением атмосферных циркуляционных систем. Это создает благоприятные условия для формирования и усиления мощных тропических циклонов в Северной Атлантике и прилегающих районах. В такие периоды вероятность появления очень сильных и долгоживущих систем увеличивается, что способствует сценарию максимального развития.

2. Ослабление и сдвиг ветров, сдвиг условий для развития

При отрицательной фазе САК давление в Атлантике повышается, а температурный фон и циркуляция меняются в неблагоприятную сторону для развития сильных циклонов. Усиливаются вертикальные сдвиги ветров, тормозящие рост и усиление систем, что ведет к ослаблению или неразвитию потенциально опасных циклонов. В таких условиях развитие систем идет по более слабым сценариям.

3. Циклическая смена структур (обновление стенки глаза)

Положительная или негативная фаза САК вызывает изменения в структуре атмосферы, что влияет на циклы обновления внутренней структуры циклонов. В периоды активных фаз, особенно положительной, возникают условия для частых изменений и обновлений стенки глаза, а циклоны могут демонстрировать более

динамичные процессы внутри системы, что характерно для сценария циклической смены структуры.

4. Взаимодействие с орографией и столкновения с берегами

Изменения в циркуляции, вызванные САК, могут смещать траектории циклонов, делая их более или менее склонными сталкиваться с береговыми или гористыми регионами. В периоды активной фазы САК, траектории склонны смещаться в северную или западную сторону, что увеличивает вероятность столкновения систем с гористыми островами или берегами и, следовательно, сцены разрушения структуры при взаимодействии.

Глобальное явление Эль-Ниньо оказывает значительное влияние на развитие и траектории тропических циклонов, поэтому его роль можно связать с каждым из описанных сценариев.

А. Интенсивное развитие циклонов

Во время Эль-Ниньо в западной части Тихого океана развитие мощных циклонов часто подавляется усиленным вертикальным сдвигом ветров. В то же время в центральных и восточных регионах океана температуры поверхности воды повышаются, создавая благоприятные условия для формирования очень сильных ураганов. Таким образом, в годы Эль-Ниньо вероятность появления особенно мощных циклонов возрастает в некоторых регионах, а в других — снижается. Это может привести к большему количеству сильных систем с высоким потенциалом разрушения.

В. Ослабление и смещение циркуляции и ветров

Эль-Ниньо вызывает усиление сдвига ветров на высших уровнях атмосферы, что препятствует развитию и укреплению циклонов, особенно в атлантическом регионе. В результате многие циклоны могут быстрее ослабевать или вообще не достигать высокой интенсивности. В Тихом океане же, в зависимости от региона, условия могут стать более благоприятными или менее, что влияет на устойчивость уже сформировавшихся систем.

С. Циклическая смена структуры (обновление стены глаза)

В условиях Эль-Ниньо более мощные и продолжительные циклоны чаще достигают значительных размеров и живут дольше. Это увеличивает вероятность, что процессы циклического обновления стенки глаза, такие как появление двойных колец или изменение симметрии, происходят более часто. В целом, стабильная и сильная циркуляция становится более распространенной, что

способствует периодам активного “перестраивания” внутренней структуры циклона.

Д. Разрушение структуры циклона при взаимодействии с орографией

Эль-Ниньо может изменить траекторию циклонов, заставляя их двигаться по другим маршрутам, чаще сталкиваясь с горными и высокогорными регионами. Эти взаимодействия усугубляются в годы Эль-Ниньо, поскольку изменяются основные дорожки циклонов. В результате увеличивается вероятность, что мощные системы столкнутся с гористыми островами или берегами, что быстро разрушает их структуру, вызывает размытие глаза и приводят к падению ветров.

Глобальные механизмы формирования и развития тропических циклонов, а также их взаимодействие с атмосферной циркуляцией и особенностями рельефа определяют траектории и силу этих систем во всем мире, а также их влияние на климатические условия.

Особенно важно учитывать, каким образом местные особенности рельефа, например, горный рельеф Мадагаскара — Центральное нагорье и восточное побережье — существенно влияют на разрушение циклонических структур. Эти факторы могут усилить разрушительное воздействие тропических циклонов на горы, особенно в периоды глобальных климатических колебаний.

В годы Эль-Ниньо траектории тропических циклонов часто меняют маршруты, сталкиваясь с горными хребтами. Это приводит к разрушению систем и значительным изменениям ветровых условий. В этих условиях температурные аномалии и циркуляция Мирового океана из-за Эль-Ниньо и районов с высоким энергетическим потенциалом создают условия, способствующие образованию, движению и разрушению циклонов.

Кроме того, усиление арктических процессов зимой и межгодовые колебания атмосферной циркуляции влияют на активность тропических циклонов и их взаимодействие с рельефом. Эти глобальные изменения увеличивают вероятность экстремальных погодных явлений и определяют поведение циклонов в определенных географических условиях.

Таким образом, глобальные климатические процессы создают общие условия, а местные географические особенности, такие как горы Мадагаскара, изменяют развитие и разрушение тропических циклонов на этом участке.

Заключение

В ходе выполненного исследования была разработана система типизации сценариев развития тропических циклонов на основе анализа спутниковых данных. В процессе работы были собраны и обработаны различные спектральные изображения, что позволило выделить характерные признаки и параметры, определяющие динамику и структуру циклонов.

Созданная классификационная система позволяет не только дифференцировать типы тропических циклонов по ключевым характеристикам, но и прогнозировать возможные сценарии их развития, что является важным шагом в совершенствовании методов мониторинга и предупреждения. Использование спутниковых данных продемонстрировало свою эффективность и перспективность для быстрого и точного анализа сложных погодных процессов.

Практическая ценность работы заключается в возможности внедрения разработанных методов в автоматизированные метеорологические системы, что повысит качество и своевременность прогнозов. В дальнейшем перспективно расширять алгоритмы за счет применения методов машинного обучения и нейросетевых технологий, а также интегрировать дополнительные источники данных.

Таким образом, выполнение данной работы позволило внести вклад в развитие методов мониторинга и прогнозирования тропических циклонов и способствует повышению уровня безопасности и устойчивости населения и инфраструктур в районах с высоким риском возникновения этих природных явлений.

Прогнозы климатических моделей указывают на значительные изменения в траекториях и характеристиках тропических циклонов в Атлантическом океане в течение следующих 50 лет. Ожидается, что зоны активности переместятся в более высокие широты, замедлят движение штормов с усилением локальных воздействий и увеличат интенсивность циклонов. Расширение зоны формирования штормов у побережья Африки еще больше усилит активность в Карибском регионе. Эти изменения создают новые проблемы для прибрежных районов, что требует адаптации систем предупреждения и мер по снижению риска экстремальных погодных явлений.

Анализ долгосрочных прогнозов до 2080 года показывает значительные изменения в распределении циклонической активности в Северной Атлантике. Уменьшение количества циклонических дней в традиционных районах Карибского бассейна и Мексиканского залива сопровождается повышенной

активностью у побережья Западной Африки и расширением зоны ураганов на Европу и Азорские острова. Эти устойчивые изменения, вызванные глобальным изменением климата, указывают на необходимость адаптации мер защиты и планирования в прибрежных районах, подверженных новым и изменяющимся рискам, возникающим в результате сильных штормов и ураганов.

В рамках данного анализа было рассмотрено всего четыре сценария:

Сценарий 1

Ураган Мария 2017 года был одним из самых мощных в истории Атлантики, нанеся значительный ущерб Карибским островам и югу Соединенных Штатов. Катастрофа затронула многие районы, унесла жизни тысяч людей и серьезно разрушила экономику и инфраструктуру. Восстановление заняло много лет и потребовало значительной международной помощи и усилий.

Сценарий 2

Ослабление тропических циклонов происходит из-за сильного сдвига ветра, который нарушает их симметрию, смещает центр конвекции и повышает температуру верхних слоев облаков. Эти процессы снижают мощность штормов и влияют на их развитие и исчезновение. Взаимодействие между циклоническими и антициклоническими вихрями в атмосфере играет важную роль в динамике тропических циклонов, и изучение этих механизмов позволяет прогнозировать поведение штормов и минимизировать их последствия.

Сценарий 3

Сильные тропические циклоны могут проходить через цикл внутренней реструктуризации, когда образуется двойной глаз и изменяется структура вихря. Этот процесс временно ослабляет шторм, но после завершения обновления образуется более устойчивый и широкий глаз, что способствует повторному усилению и расширению зоны сильных ветров.

Сценарий 4

Взаимодействие сильных тропических циклонов с горным рельефом Мадагаскара приводит к быстрому разрушению их структурной целостности. Горы увеличивают трение и деформируют вихри, что приводит к ослаблению центра циркуляции, исчезновению глаза и распаду облачной системы, что снижает интенсивность и организацию циклона.

Список литературы

1. Mialon A. Étude de la variabilité climatique des hautes latitudes septentrionales basée sur des observations satellitaires par micro-ondes: disque. - Université Joseph Fourier-Grenoble I; Université De Sherbrooke, 2005.
2. Jolivet S. Modélisation mésoéchelle des cyclones tropicaux dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien avec Mésos-NH : дис. – Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105 Modélisation mésoéchelle des cyclones tropicaux dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien avec Mésos-NH. Cas d'étude DINA. par Samuel Jolivet en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Réunion (spécialité Physique de l'Atmosphère) Soutenue le 15 juillet 2008 Directeur de Thèse: M. Fabrice Chane-Ming (MCF HDR, Université de La Réunion, 2010.
3. Roux F., Viltard N. Les cyclones tropicaux //La météorologie. – 1997. – T. 1997. – №. 18. – С. 9-33.
4. Duranthon J. P. Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance des sites naturels instables //BLPC-Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. – 2000. – №. 228. – С. pp 47-57.
5. Dulac W. Méthodes pour l'évaluation de l'activité cyclonique tropicale en changement climatique : дис. – Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2023.
6. Euphrasie-Clotilde L. CLIMATOLOGIE DU TRANSPORT DES AEROSOLS DESERTIQUES AU-DESSUS DE L'ATLANTIQUE VERS LA REGION CARAÏBE : дис. – Université de Lille, 2018.
7. Tory K. J., Frank W. M. **Tropical cyclone formation** // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. – 2010.
8. Tinard P. Caractérisation et modélisation des déplacements du sol associés à l'activité volcanique du Piton de la Fournaise, île de La Réunion, à partir de données interférométriques. Août 2003–Avril 2007 : дис. – Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2007.
9. Borisenkov E. P. Анализ полей ветра в тропических циклонах. – Метеорология и гидрология.

10. **Meetoo C. C.** Étude des conditions de cyclogénèse tropicale sur le sud-ouest de l'océan Indien: дис. ... канд. наук. — Université Toulouse III Paul Sabatier, 2014. — 214 p
11. **Chen A. A., Taylor M. A.** Investigating the link between early season Caribbean rainfall and the El Niño+1 year // International Journal of Climatology. — 2002. — Vol. 22. — № 1. — P. 87–106.
12. Акимов В. А., Соколов Ю. И. Наиболее крупные чрезвычайные ситуации в России и в мире в 2003 году // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. — 2013. — Т. 3. — №. 2. — С. 363-461.
13. **Willoughby H. E.** Tropical Cyclone Eye Dynamics // Monthly Weather Review. — 1998. — Vol. 126. — P. 3053–3067. 14. Probst P. et al. Tropical Cyclone GIOVANNA. Madagascar, February 2012. — 2012.
15. Le Sommer J. Modélisation numérique pour l'étude de la variabilité et des interactions d'échelles dans l'océan : дис. — Université Grenoble Alpes, 2021.
16. Сидорова Л. П. Метеорология и климатология // ЛП Сидорова—Урал: УрФУ. — 2015.
17. Meetoo C. C. Étude des conditions de cyclogénèse tropicale sur le sud-ouest de l'océan Indien : дис. — Université Toulouse III Paul Sabatier
18. Planche C. Développement et évaluation d'un modèle tridimensionnel de nuage mixte à microphysique détaillée: application aux précipitations orographiques : дис. — Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2011.
19. Логинов В., Лысенко С. Современные изменения глобального и регионального климата. — ЛитРес, 2020.
20. Топтунова О. Н., Анискина О. Г., Горшкова А. П. Динамика изменения циклонических режимов северного и южного полушарий и ее связь с основными индексами циркуляции атмосферы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2016. — №. 42. — С. 178-187.
21. Dvorak V. F. **Tropical cyclone intensity analysis using satellite data.** — NOAA.