

УДК 551.915.1

Воздействие крупномасштабных атмосферных потоков северо-запада Тихого океана на группу взаимодействующих циклонов

А.Э. Похил

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
pokhil@mecom.ru*

Исследуется перемещение и эволюция группы из трех тропических циклонов (ТЦ) в Тихом океане в 2016 году. Взаимодействие ТЦ между собой и с окружающей областью атмосферы анализируется с помощью спутниковой информации и серии численных экспериментов на основе баротропной модели атмосферы. Показано, что необычная траектория ТЦ Лайонрок обусловлена его взаимодействием с двумя другими циклонами. Это взаимодействие было прекращено в результате влияния полярного атмосферного фронта.

Ключевые слова: тропические циклоны, взаимодействие, спутниковая информация, баротропная модель, численные эксперименты

The impact of large-scale atmospheric circulation in the Northwest Pacific on the group of interacting cyclones

A.E. Pokhil

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
pokhil@mecom.ru*

The movement and evolution of the group of three tropical cyclones (TC) in the Pacific Ocean in 2016 are investigated. The interaction of TCs with each other and with the surrounding atmosphere is analyzed using satellite data and the series of numerical experiments based on the barotropic atmosphere model. It is shown that the unusual trajectory of TC Lionrock is caused by its interaction with two other cyclones. This interaction was terminated as a result of the influence of the polar atmospheric front.

Keywords: tropical cyclones, interaction, satellite data, barotropic model, numerical experiments

Введение

Исследования случаев необычного поведения тропических циклонов (ТЦ) и их взаимодействия с ближайшей областью атмосферы и определенными течениями в ней дают дополнительные и зачастую новые знания об эволюции и динамике ТЦ.

Иногда существует одновременно два, три и более ТЦ, развивающихся на ограниченной акватории. Довольно часто это наблюдается

в Тихом океане в Северном полушарии. В этих случаях имеет место взаимодействие нескольких одновременных вихрей.

В практике разных стран замечено, что прогнозы бинарных и множественных ТЦ сталкиваются с большими трудностями, особенно в период их взаимодействия, и ошибки прогнозов при этом значительно превышают ошибки при прогнозах одиночных ТЦ.

В [2, 4, 14] представлены результаты исследования механизмов взаимодействия тропических циклонов, а также их трансформации и регенерации. Рассматривались случаи взаимодействия пары ТЦ и полярного фронта [4, 5]. Такие взаимодействия – одна из причин, по которой ТЦ начинают перемещаться по необычным траекториям, и поведение их становится плохо предсказуемым. Впервые относительное циклоническое вращение и сближение парных ТЦ было замечено Фудзиварой [9]. Наблюдениями и исследованием перемещения бинарных циклонов занимались многие авторы. Бренд [8], например, показал, что тенденция углового вращения ТЦ относительно друг друга есть функция мощности тропических циклонов и расстояния между их центрами. В работе Бао и др. [7] найдено, что эффект Фудзивары превалирует, если расстояние между ТЦ меньше 6° , на больших расстояниях основным становится эффект фонового потока. В более поздних работах [2, 4, 5] было показано, что взаимодействие имеет место на более значительных расстояниях, и это зависит от мощности ТЦ и соотношения их характеристик. Лиу и др. [13] наблюдали, что два ТЦ не всегда притягиваются друг к другу, когда существует значительный сдвиг в окружающем их потоке. Хувер [11] обнаружил различие в поведении парных ТЦ Атлантического и Тихого океанов и предположил, что оно определяется различием крупномасштабных атмосферных потоков. В Гидрометцентре России работы по изучению взаимодействия атмосферных вихрей начались в конце 1980-х годов [3, 14]. Несколькими годами позднее Г. Холландом с соавторами [10] был проведен цикл исследований по численному моделированию траекторий ТЦ.

В [2] исследовалась эволюция серий тропических циклонов 2009 г. в Тихом океане, анализировалось необычное поведение одновременно существующих ТЦ, а также механизм взаимодействия пары тропических циклонов, имеющих различную интенсивность. Рассматривались [5] случаи тройственного взаимодействия ТЦ и полярного фронта, трансформация и регенерация ТЦ вследствие вхождения в область холодного фронта. Динамика групп реальных тропических циклонов сопоставлялась с поведением идеальных циклонических вихрей в экспериментах на численной модели.

При исследовании реальных одновременно существующих ТЦ в [2, 5] автором наблюдались интересные ситуации: при сближении двух вихревых образований одно из них исчезает; в других случаях, напротив, вблизи уже существующего ТЦ возникает новое образование; в некоторых случаях имеет место «расталкивание» пары ТЦ. Были предложены

варианты объяснения исчезновения и появления вихрей, а также петель, зигзагов и крутых поворотов при их перемещении.

Наблюдались случаи длительного «топтанья на месте» некоторых ТЦ, а также «странные» зигзаги, крутые повороты и даже возвратные перемещения ТЦ. Иногда траектории вихрей принимали форму петель. Взаимодействие вихрей между собой и с другими барическими образованиями могут привести их и к меандрирующим движениям различных пространственных и временных масштабов.

Изучение каждого случая необычного поведения ТЦ и возможных вариантов развития таких состояний является интересной научной, а также практической задачей для прогнозов.

Цель и методика исследования

Интерес в России к решению этих задач обоснован, в частности, тем, что тайфуны Тихого океана почти ежегодно выходят на территорию Приморского края. В одних случаях ТЦ быстро заполняются и затухают, в других, сливаясь с полярно-фронтальными циклонами и попадая в западный перенос умеренных широт, продолжают смещение в северо-восточном направлении [6]. Довольно часто ТЦ являются причиной катастрофических наводнений, ветров ураганной силы, нагонов и других опасных ситуаций в Приморском крае.

В данной работе исследуется перемещение и эволюция одной из групп тропических циклонов 2016 года, взаимодействие их между собой и с окружающей областью атмосферы. Один из ТЦ этой группы оказал существенное влияние на погоду Дальнего Востока России.

Необычное поведение исследуемых тропических циклонов исследуется с помощью анализа спутниковой информации и серии численных экспериментов, проведенных на баротропной модели атмосферы, основанной на уравнениях «мелкой воды» [1]. Изучалось поведение группы идеальных распределенных вихрей (во вращающемся поле), расположенных подобно реальным ТЦ. Результатом расчетов явилась картина эволюции полей завихренности ($10^{-5}c^{-1}$) и траектории взаимодействующих вихрей.

Изучение спутниковой информации дало возможность анализировать особенности эволюции, динамику поведения ТЦ и их взаимодействия с другими синоптическими объектами, а также диагностировать их дальнейшее поведение.

Анализ и обсуждение поведения реальных ТЦ в августе 2016 года

С 19 августа 2016 г. группа вихрей, состоящая из трех тропических циклонов: N9 TS Миндулл, N10 TS Лайонрок и N11 TD Компасу (TS-тропический шторм, TD-тропическая депрессия) перемещалась

по ограниченной акватории северо-запада Тихого океана (рис. 1, 5), траектории их имели необычный вид. Попробуем найти объяснение их «странному» поведению.

В таблице представлена характеристика группы тропических циклонов, оказавших влияние на Дальний Восток России в 2016 году [12, <https://twitter.com/cnn/status/767647503500058624>].

Таблица. Тропические циклоны, оказавшие влияние на Дальний Восток России в 2016 г.

Table. Tropical cyclones affected the Russian Far Eastern Region in 2016

Имя	№ в сезоне	Макс. стадия развития	Стадия при выходе на ДВР	Дата выхода на ДВР	Территория, на которую оказал воздействие
Миндулл	9	TY	STS	22–23 августа	Южные Курилы, Сахалин, север и восток Хабаровского края, Магаданская область
Лайонрок	10	TY	STS	30 августа – 1 сентября	Приморский край
Компасу	11	TS	TS	21 августа	Незначительно повлиял на Южные Курилы, вышел в Охотское море и быстро заполнился

На рис. 1 приведен снимок (IR – диапазон) японского геостационарного спутника Химавари-8 («подсолнечник», высота орбиты 35790 км), на котором нанесено положение ТЦ Миндулл, Лайонрок, Компасу (19 августа 4/00 ч РМ (7 AM UTC) 2016 г.). В момент образования центры TD Компасу и TS Лайонрок находились на расстоянии около 800 км. Центры TS Миндулл и TD Компасу несколько дальше – на расстоянии около 1200–1300 км. TS Лайонрок и TS Миндулл – на расстоянии около 1400 км (рис. 1, 5).

В этот момент эти три вихря связаны светлой полосой, охватывающей все три образования. Эта структура есть не что иное, как облачные хвосты ТЦ на муссонном потоке.

В самом начале сближению вихрей способствовал муссонный поток. Рассмотрим траектории наблюдаемых ТЦ. Тропический циклон Лайонрок имел сложную траекторию. Образовавшись недалеко от 30° с. ш. (рис. 2) циклон вначале смещался на северо-запад, затем резко развернулся и пошел на юго-запад до широты 29°. «Потоптавшись» некоторое время южнее островов Японии (о-ва Сикоку и Кюсю) и сделав небольшой зигзаг, ТЦ двинулся дальше на юго-запад (до 23° с. ш., 131° з. д.). Затем, круто повернув почти на 180°, стал перемещаться на северо-восток. Далее центр его, описав полукруг, вышел на север о. Хонсю, затем на север Японского моря и далее на Приморский край России. Он двигался, казалось бы, по очень странной траектории, образующей петлю с вращением

против часовой стрелки. Однако при внимательном рассмотрении стало понятным, что по крайней мере часть этой траектории есть результат взаимодействия ТЦ Лайонрок сразу с двумя вихрями – Миндулл и Компасу (рис. 3).

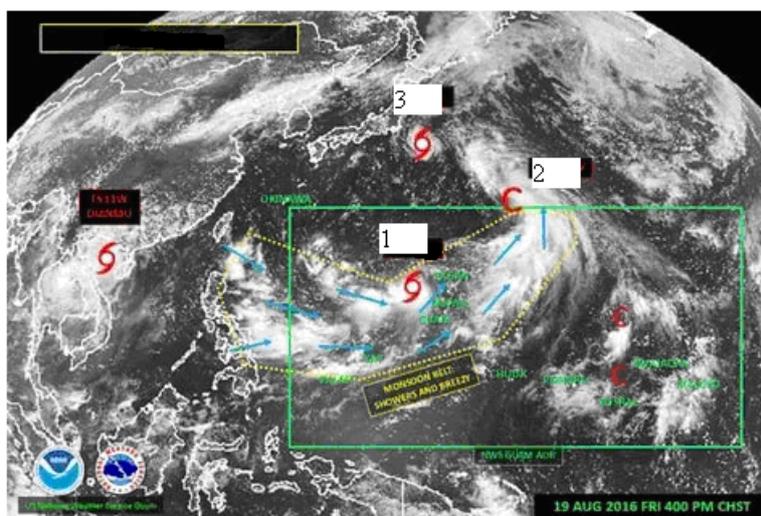


Рис. 1. Спутниковый снимок 19 августа 7.00 UTC 2016 г. с отмеченными положениями ТЦ Миндулл (1), Компасу (2), Лайонрок (3).

Fig. 1. Satellite photo dated 19 August 7:00 UTC 2016 showing the location of the TCs Mindulle (1), Kompasu (2), Lionrock (3).

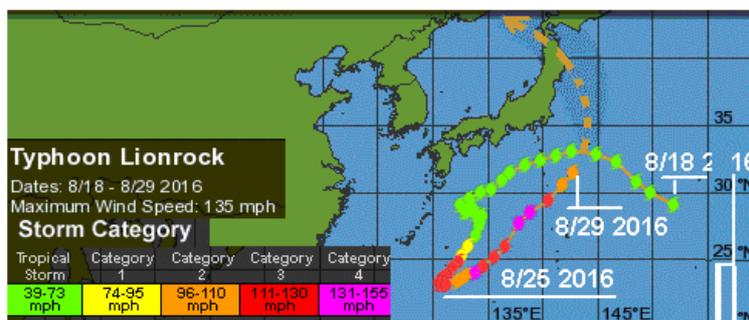
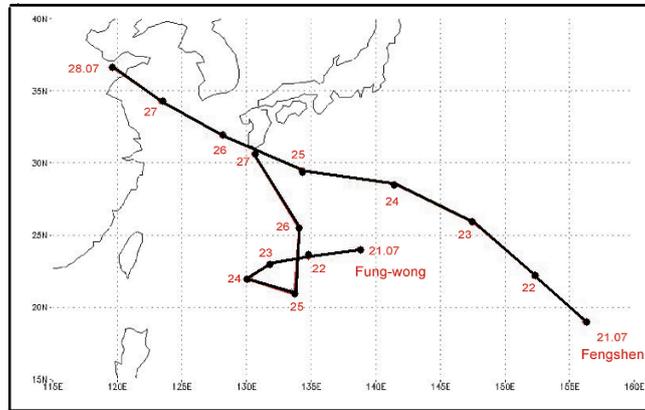


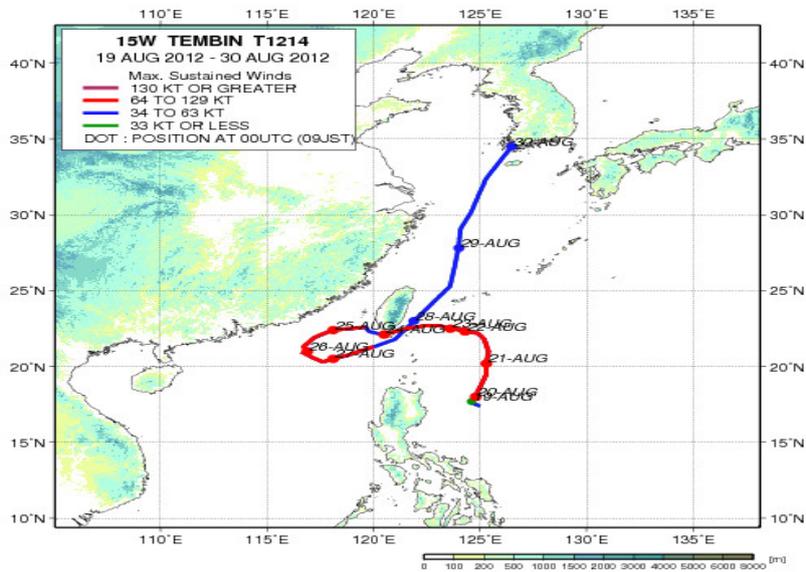
Рис. 2. Траектория ТЦ Лайонрок.

Fig. 2. The trajectory of the TC Lionrock.

Надо отметить, что в этой акватории траектории ТЦ, образующие петли, наблюдаются довольно часто. Вот пара примеров: траектория ТЦ Фанг-Вонг описала аналогичную петлю при взаимодействии с ТЦ Фенгшен 21–27.07.2002 г. (рис. 3а); похожим образом вел себя ТЦ Тембин 19–30.08.2012 г. (рис. 3б). Интересно, что во всех случаях траектории описывали петли с вращением против часовой стрелки.



а)



б)

Рис. 3. Фактические траектории тайфунов в Тихом океане: Фенгшен (21–28.07.2002) и Фанг-Вонг (21–27.07.2002) (а) и Тембин (19.08–30.08.2012) (б).

Fig. 3. Real trajectories of the TCs in the Pacific Ocean: Fengshen (21-28 July 2002 and Fung Wong (21-27 July 2002 (a) and Tembin (19-30 August 2012) (б).

Подобные петли траекторий ТЦ наблюдаются и при перемещении их по Атлантическому океану. Примером может служить ураган Ханна, эволюционирующий одновременно с ураганом Густав (рис. 4). Надо отметить, что такая петля чаще всего является результатом взаимодействия двух или нескольких вихрей.

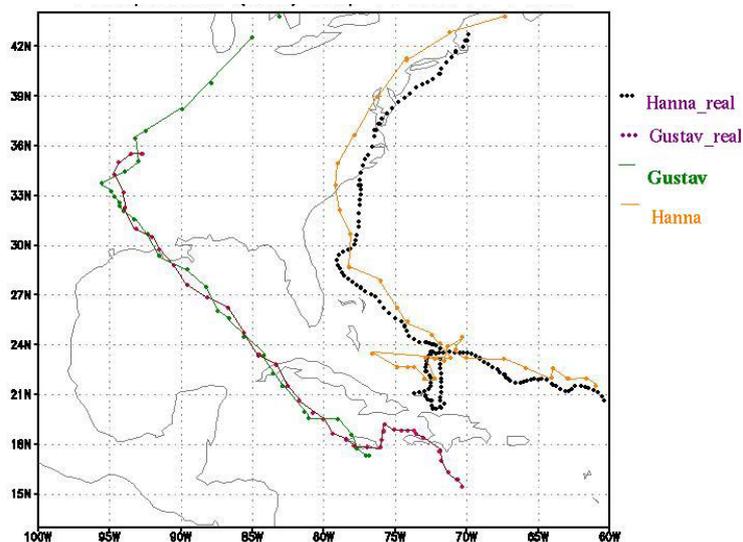


Рис. 4. Траектории одновременных и взаимодействующих ураганов Ханна и Густав в Атлантическом океане.

Fig. 4. The trajectories of simultaneous and interacting with each other hurricanes Hanna and Gustav in the Atlantic Ocean.

Вихри вращались вокруг друг друга по циклонической орбите: для каждого вихря соседний вихрь являлся ведущим потоком. Взаимное вращение продолжалось до 18 ч 20 августа. Это хорошо видно при рассмотрении фильма, составленного из последовательных спутниковых IR-снимков. В этот отрезок времени группа вихрей находилась в «свободном» пространстве над океаном и никакие атмосферные структуры не мешали им «исполнять танец по-Фудзивара». Таким образом наблюдалось взаимодействие «в чистом виде». В упомянутом фильме происходит сближение центров образований при интенсивном взаимном циклоническом вращении.

При этом наблюдается «отбрасывание хвостов» всех вихрей, а на хвосте Компасу организуется довольно большое мощное образование (рис. 7г), которое определенное время принимает участие в происходящем «танце-вальсе», а затем уходит на юго-восток. Траектория ТЦ Миндулл достаточно проста – практически с юга на север до 12 ч 21 августа. Однако небольшая искривленность части его траектории к востоку есть результат взаимодействия с ТЦ Лайонорк и Компасу.

Траектории перемещения наблюдаемых с 19 по 30 августа 2016 года ТЦ представлены на рис. 5. Черными кружками отмечены моменты начала взаимодействия, крестами – моменты окончания этого процесса.

На врезке рис. 5 показаны части траекторий ТЦ во время взаимодействия вихрей. Видно, что треугольник, определяющий положение центров вихрей в конце их взаимодействия, повернут против часовой стрелки

и существенно уменьшился относительно треугольника, соединяющего центры вихрей в начале взаимодействия. Это подтверждает их сильное притяжение и взаимодействие. В дальнейшем эти вихри могли объединиться в одно мощное образование, если бы им не помешали внешние силы. Такой вариант результата взаимодействия в однородном поле имел место в эксперименте, представленном на рис. 6б.

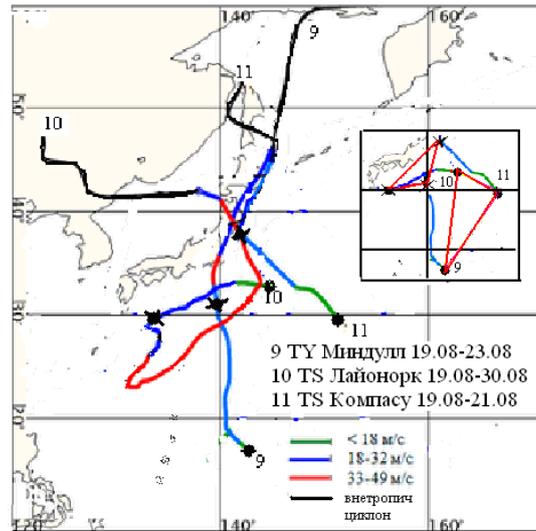


Рис. 5. Траектории ТЦ Миндулл, Лайонрок, Компасу 19–30.08.2016. Черными кружками отмечены моменты начала, крестами – моменты окончания взаимодействия вихрей.

Fig. 5. The trajectories of the TCs Mindulle, Lionrock, Kompasu 19-30 August 2016. The time of the beginning the interaction of the vortices is indicated by black circles, the time when the interaction ceased is indicated by crosses.

Описание явлений, сопутствующих эволюции этой группы вихрей, представлено в Обзоре ЕСИМО [12]: «19 августа: в Тихом океане, к востоку от берегов Японии до меридиана 155° в. д. ветер юго-восточный 13–18 м/с, с порывами до 22 м/с, высота волн достигала 4–6 м». Необходимо отметить, что в этот момент уже имели место три вихревых образования: N9 TS Миндулл с давлением в центре 994 гПа, N10 TS Лайонрок с давлением 994 гПа и N11 TD Компасу с давлением в центре 966 гПа, о которых в обзоре ничего не сказано. «20 августа в Тихом океане к востоку от Курильских островов до меридиана 166° в. д. наблюдался юго-восточный ветер 10–15 м/с, порывами до 20 м/с и, соответственно, высоты волн 1,5–3 м» [12]. В этот момент вихри (ТЦ) все еще не упоминаются.

Первое упоминание о ТЦ [12] появляется 21 августа в 06 ч: «В Тихом океане, к востоку от берегов Японии наблюдались два ТЦ Лайонрок

и Миндулл. При этом до меридиана 155° в. д. ветер юго-восточный $15\text{--}20$ м/с порывами до 25 м/с и высота волн $4\text{--}6$ м». Однако эти три ТЦ существовали уже начиная с 12 ч 19 августа, что хорошо видно по спутниковой информации.

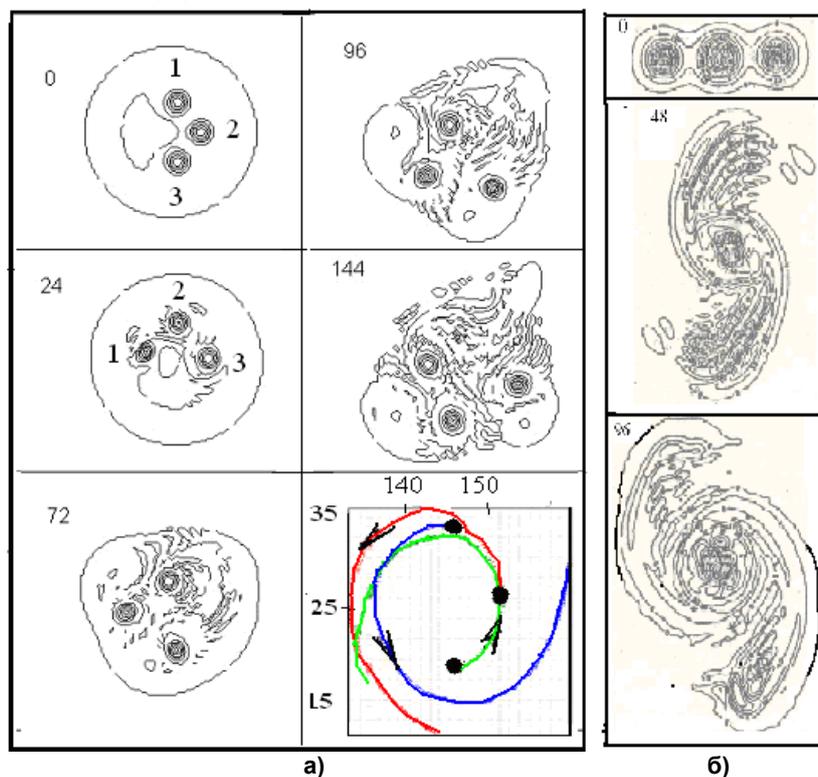


Рис. 6. Эволюция полей завихренности (10^{-5}с^{-1}) и траектории трех взаимодействующих идеальных распределенных вихрей на модели, расположенных аналогично реальным ТЦ (время интегрирования 144 ч) (а); вихри расположены на одной широте (время интегрирования 96 ч) (б).
Fig. 6. The evolution of the vorticity fields (10^{-5} s^{-1}) and the trajectories of three interacting perfect distributed vortices according to the model, where the TCs are located analogously to real TCs (the integration time is 144 h) (a); the vortices are located in the same latitude (the integration time is 96 h) (b).

Численный эксперимент по тройственному взаимодействию вихрей

На баротропной модели атмосферы, основанной на уравнениях «мелкой воды» [1], проведена серия численных расчетов поведения группы идеальных распределенных вихрей во вращающемся поле, расположенных подобно реальным ТЦ. Результатом расчетов явилась картина эволюции полей завихренности (10^{-5}с^{-1}) и траектории взаимодействующих вихрей в течение 144 ч интегрирования, представленная на рис. 6а.

Вращение центров модельных вихрей показано на врезке рис. 6а. Оно идентично поведению реальных ТЦ в фильме, составленном из последовательных спутниковых снимков.

(В представленном эксперименте не существует муссонного потока, который в начале наблюдения вводит определенную коррекцию в перемещение реальных вихрей, поэтому имеет место расталкивание, а не сближение вихрей, как это имело место в реальной ситуации.)

Рис. 6б представляет идеальную ситуацию, когда вихри расположены на одной широте. Соотношение характеристик и расстояний между вихрями в этом эксперименте задано таким образом, что большой центральный вихрь накручивает на себя периферийные, и в определенный момент образуется большой объединенный вихрь. Этот эксперимент интересен и тем, что на рисунке, представляющем последний этап интегрирования (96 ч), хорошо видны небольшие вторичные вихри, образовавшиеся на южном хвосте объединенного вихря. Рис. 6б можно сравнить с рис. 1, где также видны вторичные вихревые образования (отмечены красными полукругами), находящиеся в наблюдаемый момент на юго-востоке от интересующего нас ансамбля вихрей.

Взаимодействие тропических циклонов с полярным фронтом и обстановка в близлежащей акватории океана

Что происходит дальше с этой группой вихрей и что помешало дальнейшему их взаимодействию? Каким образом влияют окружающие потоки на поведение взаимодействующих вихрей? Вращение по циклонической орбите продолжается до момента, когда с северо-запада подходит полярный фронт (ПФ). На рис. 7а, представлен момент, когда Компасу приближается и притягивается к одной из ветвей ПФ. Между 18 ч 20 августа и 00 ч 21 августа Компасу садится на подошедший достаточно близко к нему ПФ. Под его влиянием круто (почти на 90°) поворачивает, сливается с ним и быстро движется в его потоке на северо-восток.

Менее чем через сутки (в 12 ч 21 августа) Миндулл также поворачивает на северо-восток к близко подошедшему полярному фронту и около 02 ч 22 августа садится на ПФ, приблизившийся с востока, и «разрывает» его.

При этом на оторвавшейся части ПФ организуются несколько небольших, но достаточно интенсивных образований. Возможно, эти структуры – начинающиеся образовываться вихри (рис 7в, г). Некоторое время Миндулл с большой скоростью движется на север-северо-восток вдоль траектории прошедшего Компасу (рис. 5), следуя за ведущим потоком, каковым являются остатки фронта. Пересекает северную часть о. Хонсю и в 18 ч 22 августа выходит на о. Хоккайдо, принося много дождей. Далее, трансформировавшись во внетропический циклон, уходит по Охотскому морю, затем на север и выходит на Магадан.

ТЦ Лайонрок после прекращения взаимодействия с Миндулл (в 12 ч 21 августа, рис. 5) движется к Восточно-Китайскому морю.

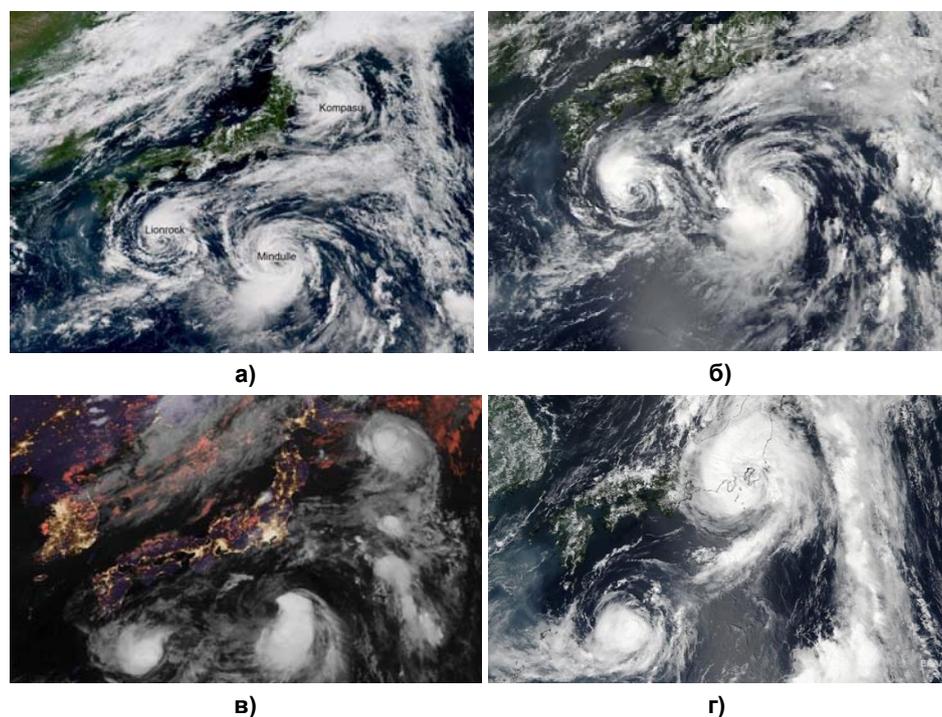


Рис. 7. Спутниковый снимок Миндулл, Лайонрок и Компасу в 00 ч 21.08.2016 (видимый диапазон). Хорошо видны облачные структуры, соединяющие вихри (а); Миндулл (правый) и Лайонрок 04 ч 21.08.2016 (Компасу вышел за урез снимка) (б); тайфуны Миндулл (средний), Лайонрок (левый) и Компасу в 12 ч 21.08.2016. Хорошо видны небольшие образования южнее Компасу. Это части «хвоста, отброшенные» вихрем (ИК-диапазон, данные NASA) (в); тайфуны Миндулл (верхний) и Лайонрок в 2 ч 34 мин 22.08.2016 (видимый диапазон) (г).

Fig. 7. Satellite photo of Mindulle, Lionrock and Kompasu at 00:00 21.08.2016 (visible range). Cloud structures connecting the vortices are well seen (a); Mindulle (on the right) and Lionrock at 04:00 21.08.2016 (Kompasu is already beyond the photo area) (б); the typhoons Mindulle (in the middle), Lionrock (on the left/ the left one) and Kompasu (on the right) at 12:00 21.08.2016. Rather small formations to the south of Kompasu are well seen. These are parts of the “tail” created by the vortex Kompasu (infrared range, according to NASA data) (в); the typhoons Mindulle (above) and Lionrock at 02:34 22.08.2016 (visible range) (г).

На рис. 7г хорошо видно образование (восточнее вихрей), простирающееся с севера на юг. Это часть фронта, опустившегося на юг, на который «сел» Компасу, и его «отброшенный хвост».

На рис. 8 представлен практически тот же момент в ИК-диапазоне. Одно из образований, появившихся после разрыва фронта, имеет в центре ярко-красную структуру, что подтверждает его значительную интенсивность.

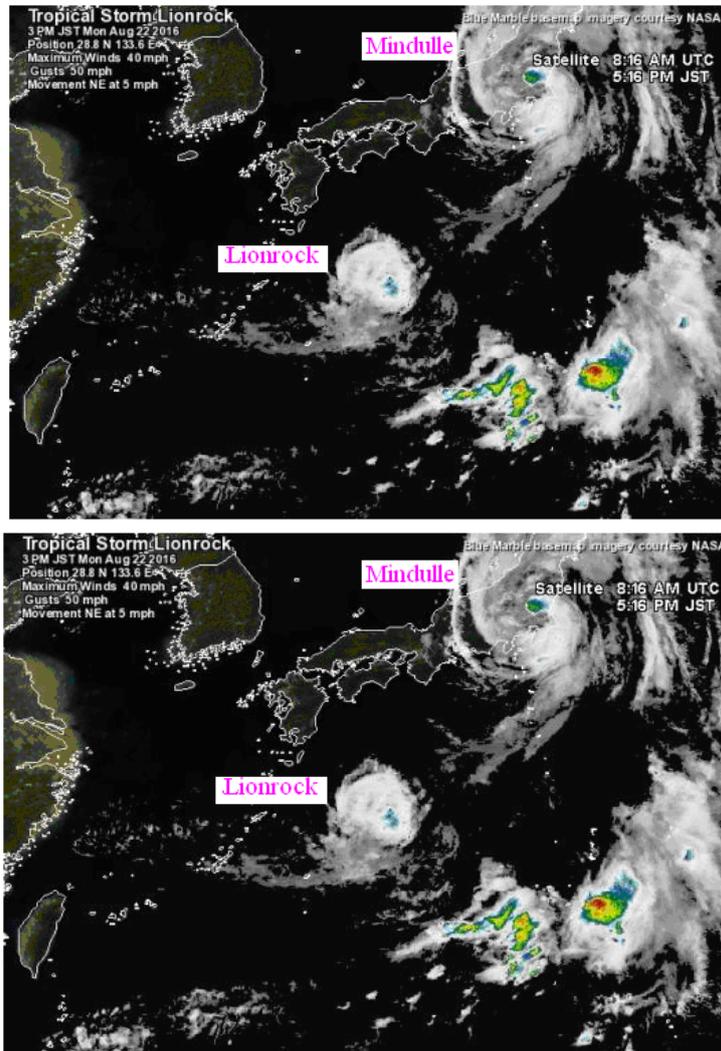


Рис. 8. Спутниковый снимок (NASA) ТЦ N10 Лионрок, N9 Миндулл (3 ч 16 мин 22.08.2016) около южного побережья о. Хоккайдо (wunderground.com.).

Fig. 8. Satellite photo (NASA) of the TC No. 10 Lionrock, No.9 Mindulle (03:16 22.08.2016) near the southern coast of the island Hokkaido (wunderground.com.).

Далее, 25 августа в 18 ч вблизи $23,5^{\circ}$ с. ш., Лайонрок встречается с полярно-фронтальной депрессией. «ТЦ под влиянием этого высокого циклонического образования меняет свое направление почти на 180° , движется на северо-восток, огибая высокий циклон с востока» [6]. 27 августа скорость его перемещения увеличивается. 28 августа на теплом ядре воды тайфун углубляется до давления в центре 940 гПа, 45–65 м/с.

В таком направлении (на северо-восток) он продолжает перемещение почти прямолинейно до 6 ч 29 августа. Далее, в 12 ч 29 августа антициклон, усилившийся на востоке, вынудил ТЦ Лайонрок круто повернуть (почти на 90°) на северо-запад в направлении фронта. Утром 30 августа Лайонрок находится в районе Токио с давлением в центре 945 гПа. В это время он представляет самостоятельное образование. 30 августа почти до 12 ч ТЦ (965 гПа) продолжает перемещаться над Японскими островами; сближается с «хвостом» полярного фронта, вплотную приближается к полярно-фронтальному циклону, и начинается их взаимодействие.

Часть своей энергии Лайонрок передает фронту (усиление фронта хорошо видно на спутниковой информации) и далее двигается вдоль фронта, усилившегося за счет энергии ТЦ. При этом фронт приобретает форму волны. Далее эта система перемещается на северо-запад.

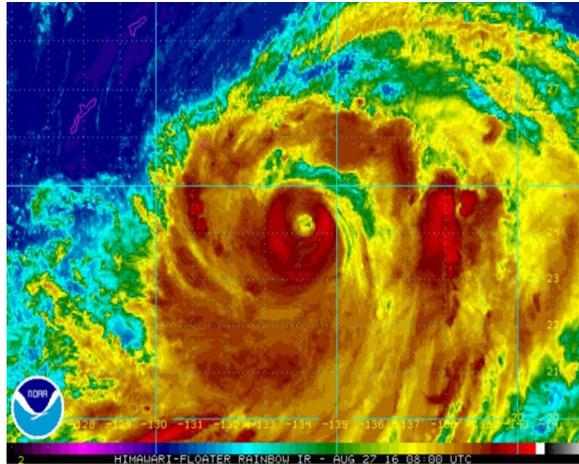
Во второй половине 30 августа ТЦ слился с циклоном на ПФ, образовав сильный асимметричный циклон с хорошо развитым теплым сектором, и двинулся на запад к Приморью. Утром 31 августа над всем Приморьем наблюдался один, хорошо развитый циклонический вихрь [6].

Описание сопутствующих процессов дано в [12]: «22 августа в 06 ч тропический шторм Лайонрок находился в точке с координатами $28,8^\circ$ с. ш., $133,6^\circ$ в. д., максимальная скорость ветра 23 м/с, порывами до 33 м/с. ТЦ Миндулл находился в точке с координатами $34,8^\circ$ с. ш., $139,7^\circ$ в. д., максимальная скорость ветра 33 м/с порывами до 48 м/с. 23 августа в 03 ч тропический шторм Лайонрок находился в точке с координатами $27,8^\circ$ с. ш., $134,2^\circ$ в. д. Максимальная скорость ветра 25 м/с, порывами до 35 м/с. 24 августа в 06 ч тайфун Лайонрок находился в точке с координатами 25° с. ш., $132,5^\circ$ в. д. Максимальная скорость ветра достигла 38 м/с с порывами до 52 м/с. 25 августа в 03 ч тайфун Лайонрок переместился в точку с координатами $23,4^\circ$ с. ш., $131,1^\circ$ в. д. Максимальная скорость ветра к этому моменту составляла 53 м/с порывами до 65 м/с». 27 августа в Тихом океане, к юго-востоку от Японии и Курильских островов до меридиана 180° , ветер западный 7–12 м/с порывами 17 м/с, высота волн 2–5 м».

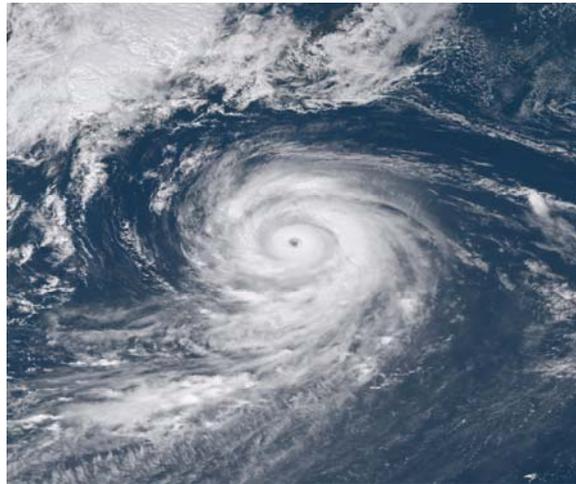
На рис. 9а представлен ТЦ Лайонрок в стадии тайфуна (945 гПа, 45–65 м/с) после крутого поворота в 00 ч 27.08.2016 г. На рис. 9б ТЦ Лайонрок в 03 ч 50 мин 28.08.2016 г. (940 гПа, 45–65 м/с) находится в Тихом океане южнее Японских островов.

Описания сопутствующей обстановки в Тихом океане в зоне действия тайфуна не существует. Но существуют данные о состоянии атмосферы и океана к юго-востоку от Курильских островов: до 165° в. д. ветер северо-западный 15–20 м/с, порывы 25 м/с, высота волн 7–9 м.

На Японские острова, Корейский п-ов и Приморье наиболее серьезное влияние из этих трех тропических циклонов оказал тайфун Лайонрок.



а)



б)

Рис. 9. ТЦ Лайонрок в стадии тайфуна после крутого поворота в 00 ч 27.08.2016 (по данным Himawari-floater REINBOW IR) (а); ТЦ Лайонрок в стадии тайфуна в 03 ч 50 мин 28.08.2016 (видимый диапазон) (по данным University of Wisconsin–Madison) (б).

Fig. 9. The TC Lionrock in the stage of a typhoon after its sharp turn at 00:00 27.08.2016 (according to the data of Himawari-floater REINBOW IR (a); the TC Lionrock in the stage of a typhoon at 03:50 28.08.2016 (according to the data of the University of Wisconsin-Madison) (б).

Заключение

1. Необычную траекторию ТЦ Лайонрок удалось объяснить взаимодействием его с двумя ТЦ Миндулл и Компасу, существующими одновременно с первым.

2. Численный эксперимент с группой из трех идеальных распределенных вихрей подтвердил гипотезу о причине петлеобразного перемещения ТЦ Лайонрок.

3. Воздействие полярного фронта на перемещение ТЦ Миндулл и Компасу привело к прекращению взаимодействия этих ТЦ и тайфуна Лайонрок.

4. Понимание процессов, приводящих к необычному поведению ТЦ, дает надежду на улучшение прогнозов перемещения ТЦ в сложных ситуациях и уменьшению ошибок прогнозов бинарных ТЦ, значительно превышающих ошибки при прогнозах одиночных ТЦ.

Список литературы

1. Зленко В.А. Гидродинамическая схема расчета траекторий тропических циклонов // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 5. С. 56-61.
2. Похил А.Э. О взаимодействии ТЦ в Тихом океане // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 6. С. 60-67.
3. Похил А.Э., Ситников И.Г., Зленко В.А., Полякова И.В. Численные эксперименты по исследованию взаимодействующих атмосферных вихрей // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 4. С. 21-28.
4. Похил А.Э., Глебова Е.С., Смирнов А.В. Расчет на мезомасштабных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM) взаимодействия тропических циклонов с полярными фронтами и струйными течениями // *Труды Гидрометцентра России*. 2011. Вып. 346. С. 87-102.
5. Похил А.Э., Глебова Е.С., Смирнов А.В. Исследование взаимодействия ТЦ и струйных течений по данным расчетов на численных моделях // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 3. С. 5-15.
6. Семенов Е.К., Петров Е.О., Соколичина Н.Н., Татаринич Е.В. Трансформация тайфуна в умеренных широтах как фактор катастрофического наводнения в Приморье осенью 2016 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 9. С. 104-113.
7. Bao C., Juan J., Zhu Y. Fujiwhara effect and environmental flow field affecting the rotation of binary typhoons // *Kexue Tongbao*. 1986. Vol. 31, no. 1.
8. Brand S. Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean // *J. Appl. Meteorol.* 1970. Vol. 9, no. 3. P. 433-441.
9. Fujiwhara S. The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1921. Vol. 47.
10. Holland G.J., Dietachmayer G.S. On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. III: Continuous barotropic vortices // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1993. Vol. 119. P. 1381-1398.
11. Hoover E.W. Relative motion of hurricane pairs // *Mon. Weather Rev.* 1961. Vol. 89, no 7.
12. Обзор ЕСИМО о текущей обстановке в океанах и морях. <http://meteoinfo.ru>
13. Liu D.L., Wang S.T. Case study of interactions of Pacific Ocean typhoons // *Quart. J. Weather Forecast Anal., Nat. Taiwan Univ.*, 1978.
14. Sitnikov I., Falkovich A., Pokhil A., Zlenko B. Numerical modeling of tropical cyclone track for Northern and Southern Hemispheres in the Hydrometeorological Centr of the USSR // *Int. Conf. on Tropical Meteorology, Brisbane, Australia, July 1988*.

References

1. Zlenko V.A. Hydrodynamic scheme for calculating Tropical cyclone trajectories. *Meteorologiya i gidrologiya [Soviet meteorology and hydrology]*, 1987, no. 5, pp. 45-49. [in Russ.].

2. Pokhil A.E. Interaction of Tropical cyclones in the Pacific ocean. *Meteorologiya i gidrologiya* [Soviet meteorology and hydrology], 1990, no. 6, pp. 48-54. [in Russ.].
3. Pokhil A.E., Sitnikov I.G., Zlenko V.A., Polyakova I.V. Numerical experiments on interaction of atmospheric vortices. *Meteorologiya i gidrologiya* [Soviet meteorology and hydrology], 1990, no. 4, pp. 16-22. [in Russ.].
4. Pokhil A.E., Glebova E.C., Smirnov A.V. Calculation of tropical cyclones' and polar fronts and jet-streams interaction on mesoscale models of atmosphere ETA and WRF (NMM). *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2011, vol. 346, pp. 87–102 [in Russ.].
5. Pokhil A.E., Glebova E.C., Smirnov A.V. Studying an interaction between tropical cyclones and jet streams using the numerical simulation data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 38, no. 3, pp. 141–149, doi: 10.3103/S1068373913030011.
6. Semenov E. K., Petrov E. O., Sokolikhina N. N., Tatarinovich E. V. Typhoon Transformation in Mid-latitudes as a Factor of the Catastrophic Flood in Primorye in Autumn of 2016. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, no. 9, pp. 104-113. [in Russ.].
7. Bao C., Juan J., Zhu Y. Fujiwhara effect and environmental flow field affecting the rotation of binary typhoons. *Kexue Tongbao*, 1986, vol. 31, no. 1.
8. Brand S. Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean. *J. Appl. Meteorol.*, 1970, vol. 9, no. 3, pp. 433-441.
9. Fujiwhara S. The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1921, vol. 47.
10. Holland G.J., Dietachmayer G.S. On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. III: Continuous barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1993, vol. 119, pp. 1381-1398.
11. Hoover E.W. Relativ motion of hurricane pairs. *Mon. Weather Rev.*, 1961, vol. 89, no 7.
12. Obzor ESIMO o tekushchey obstanovke v okeanakh i moryakh. Available at: <http://meteoinfo.ru/> [in Russ.].
13. Liu D.L., Wang S.T. Case study of interactions of Pacific Ocean typhoons. *Quart. J. Weather Forecast Anal.*, Nat. Taiwan Univ., 1978.
14. Sitnikov I., Falkovich A., Pokhil A., Zlenko B. Numerical modeling of tropical cyclone track for Northern and Southern Hemispheres in the Hidrometeorological Centr of the USSR. Int. Conf. on Tropical Meteorology, Brisbane, Australia, July 1988.

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.

Received by the editor 31.01.2019.