

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-154-166>

УДК 551.513:311(281)

**Оценка внутренней структуры
тропосферных волн
над тропическими акваториями Атлантики
по данным реанализа**

**Э.Н. Мартинез¹, В.С. Балакин², Ю.В. Шипко²,
О.В. Колычев², М.Е. Семенов³**

¹*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
(Минобороны России), г. Воронеж, Россия;*

²*Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил
(Минобороны России), г. Москва, Россия;*

³*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия
yshipko@mail.ru*

Предметом исследования являются восточные тропические волны средней тропосферы района Атлантики, развитие которых сопровождается обширными ливнями и грозами и иногда приводит к образованию тропических циклонов. Исходный материал – срочные данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II на изобарических уровнях 850 и 700 гПа в период активности волн (июнь–октябрь) за 2018–2023 гг. Методы исследования – подходы прикладной статистики: кластерный, факторный, дискриминантный анализы. Построена факторная модель количественной оценки синоптических ситуаций. Выявлены статистически различающиеся группы объектов циркуляции, для которых даны описания с примерами типовых карт барической топографии. Представлена модель классификации синоптических ситуаций по типам, в том числе реализующих тропические волны.

Ключевые слова: тропическая волна, реанализ, геопотенциальная высота, изобарический уровень, фактор, кластер, карта барической топографии

**Estimation of the internal structure
of tropospheric waves over the tropical Atlantic
according to reanalysis data**

**E.N. Martinez¹, V.S. Balakin², Yu.V. Shipko²,
O.V. Kolychev², M.E. Semenov³**

¹*Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin
(RF Ministry of Defense), Voronezh, Russia;*

²*Central Scientific Research Institute of Air Force (RF Ministry of Defense), Moscow, Russia;*

³*Voronezh State University, Voronezh, Russia
yshipko@mail.ru*

A subject of research is the eastern tropical mid-tropospheric waves over the Atlantic region, the development of which is accompanied by heavy rains and thunderstorms and sometimes leads to the formation of tropical cyclones. The initial data are the data from the NCEP/DOE AMIP-II reanalysis of atmospheric parameters at the levels of 850 and 700 hPa during the wave activity period (June–October) for 2018–2023. The research methods are

the applied statistics approaches: cluster, factor, and discriminant analyses. A factor model for quantitative assessment of synoptic conditions is built. Statistically different groups of circulation objects are identified, for which descriptions are given with examples of typical constant pressure charts. A model is presented for classification of synoptic conditions by types, including those implementing tropical waves.

Keywords: tropical wave, reanalysis, geopotential height, isobaric level, factor, cluster, constant pressure chart

Введение

Рассматриваются так называемые тропические (или восточные, или Африканские восточные [8, 14]) волны, представляющие собой синоптические системы (возмущения в зоне пассатов, проявляющиеся обычно на уровнях 850–700 гПа [15]), локализованные в регионах Западной Африки, Атлантического и Тихого океанов в летний и осенний периоды Северного полушария. Волны оказывают влияние на формирование погодноклиматических условий обширных территорий: дают развитие мощных кучеводождевых облаков, результатом которых становятся ливни и грозы [6], вносят существенный вклад в сумму годовых осадков в Мексике, странах Карибского бассейна и Центральной Америки. Иногда восточные волны становятся источником образования тропических циклонов, выходящих на юго-восток Северной Америки (80–90 % тропических циклонов формируются в пределах 8–20° с. ш. района Атлантики [10]).

Предмету исследования уделяется большое внимание, особенно в зарубежных источниках. Данная тема не теряет актуальности: изучаются пространственно-временные характеристики волн, изменчивость, периоды, длины волн, рассматриваются условия образования циклонических объектов в регионе Западной Африки в период муссонов [10–12, 14]. Однако в существующих подходах не раскрыт вопрос автоматизированной типологизации синоптических ситуаций с проявлением случаев волновых образований. Цель данного исследования – построение методики идентификации и выявления внутренней структуры (пространственного строения) восточных тропических волн в районе Атлантики в автоматизированном режиме.

Исходный материал

В качестве исходной информации в работе использованы данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II [13] в узлах регулярной сетки с шагом 2,5° на изобарических уровнях 850 и 700 гПа в сроки 00, 06, 12, 18 ч ВСВ: геопотенциальной высоты и меридиональной составляющей скорости ветра. Данные указанных параметров реанализа с таким разрешением сетки могут быть использованы для качественного анализа синоптических процессов с характерными горизонтальными масштабами порядка 1000 км [4]. Кроме того, приложение к исследованию данных реанализа диктуется отсутствием метеостанций в рассматриваемом регионе.

К расчету принят период июнь–октябрь 2018–2023 гг. (6 лет). Автоматизированная обработка файлов реанализа, расчет представленных ниже параметров атмосферной циркуляции и построение карт барической топографии проведены с использованием разработанных программных модулей на языке Python. Расчетное поле: район Атлантики 5–20° с. ш., 20–80° з. д.

Методы расчета

В настоящее время в научных исследованиях используется автоматизированная обработка файлов реанализа с процедурами программного выделения циклонов и антициклонов, поиска их характеристик (центров, ближайших к ним замкнутых изогипс, площади, интенсивности) [2–5]. Однако рассматриваемый регион относится к зоне экваториальной депрессии, которая не имеет четко выраженных центров, и в данной работе построены процедуры поиска областей пониженного давления в виде ложбин, характерных для тропических волн [8]. На массиве данных геопотенциальной высоты в узлах сетки для каждого срока производился поиск минимума по долготе в скользящей области $3 \times 7^\circ$ (долготы, широты) для уровней 850 и 700 гПа. Полагалось, что сформированная волна представляется ложбиной сразу на этих уровнях синхронно (в один срок), поэтому случаи с пересечением центров (совпадением координат узлов сетки со значениями минимумов на двух уровнях) фиксировались как «наличие волны». Для этого варианта расчетных процедур повторяемость волн в июне–октябре по выборке 2016–2025 гг. представлена относительной частотой (p) на рис. 1.

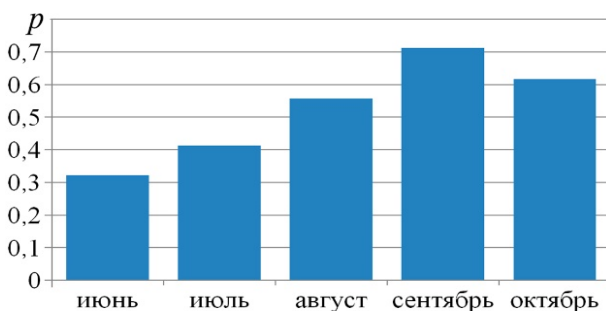


Рис. 1. Распределение относительной частоты проявления тропических волн (ложбины, прослеживающиеся синхронно на двух уровнях) по месяцам (июнь–октябрь 2018–2023 гг.).

Fig. 1. The distribution of the relative frequency of tropical waves (hollow traced synchronously at two levels) over the months June–October, 2018–2023.

Второй вариант расчета выполнен с использованием методов прикладной статистики. Во-первых, сформирован набор признаков атмосферной циркуляции, от которого сделан переход к небольшому числу

определяющих ортогональных факторов. Во-вторых, выявлены кластеры синоптических ситуаций; построено правило отнесения (классификатор) объекта к одному из выявленных кластеров.

Для количественной характеристики атмосферной циркуляции в заданной области, где узлы сетки при шаге $2,5^\circ$ вдоль широты $i = 1, \dots, n$, $n = 25$ и вдоль долготы $j = 1, \dots, m$, $m = 7$, определены следующие признаки (по каждому уровню 850 и 700 гПа).

Вдоль меридианов выделяются пары точек и вычисляются разности геопотенциальной высоты $\Delta H_i = H_{20} - H_5$, что соответствует разности между зоной высокого значения H_{20} на широте 20° (объясняется влиянием южной периферии Азорского антициклона) и относительно низкой H_5 широты 5° (зоны экваториальной депрессии). Определяется индекс зональной циркуляции (индекс Россби), позволяющий оценить для выделенного района изменение циркуляции в определенный срок

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum \Delta H_i. \quad (1)$$

Учитывая, что волна – суть возмущение ветрового поля, в диапазоне широт $5-20^\circ$ ($j = 1, \dots, m$) определяется максимальный модуль меридиональной составляющей скорости в узлах сетки $|v|_{\max i}$. Вводится величина средней максимальной меридиональной составляющей скорости ветра как характеристики проявления ветрового возмущения (отклонения от восточного направления пассата):

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum |v|_{\max i}. \quad (2)$$

Как правило, центр циклона определяется областью пониженного давления или областью максимальной завихренности. Поэтому для оценки степени циклоничности в заданном районе вычисляется лапласиан $\nabla^2 H_{ij} = H_{i+1j} + H_{i-1j} + H_{ij+1} + H_{ij-1} - 4H_{ij}$ (без учета шага сетки), где $i = 2, \dots, 24$; $j = 2, \dots, 6$. Привлекаются только положительные величины (для циклонической циркуляции $\nabla^2 H_{ij} > 0$) числом k . В качестве признака циклонического вихря скорости определяется средний лапласиан по рассматриваемой области

$$\bar{L} = \frac{1}{k} \sum \nabla^2 H_{ij}. \quad (3)$$

С целью сжатия информации и определения структуры данных проведен факторный анализ, где применяется модель [1] описания переменных x_m ($m = 1, 2, \dots, p$) линейной комбинацией r ненаблюдаемых общих факторов $f_1, f_2, \dots, f_r$, при этом $r < p$:

$$x_m^* = a_{m1}f_1 + a_{m2}f_2 + \dots + a_{mr}f_r + e_m, \quad (4)$$

где x_m^* – центрированные и нормализованные исходные данные; a_{mi} – коэффициенты, имеющие специальное название – факторные нагрузки; e_m – остаток, или специфичный фактор для переменной x_m .

Без потери информативности проведено снижение размерности пространства признаков (с варимакс-вращением [1]) до трех некоррелированных факторов f_1, f_2, f_3 , отражающих существенные черты и взаимосвязи набора исходных признаков (1)–(3) и объясняющих 88,6 % общей дисперсии выборки. Факторные нагрузки на параметры (1)–(3) представлены в табл. 1, где выделены значения нагрузок, превышающие по модулю 0,7 [1].

Таблица 1. Факторные нагрузки после варимакс-вращения

Table 1. Factor loads after varimax-rotation

Параметр	f_1	f_2	f_3
H_{850}	-0.073303	0.952860	-0.160637
V_{850}	0.203439	-0.074569	0.877449
L_{850}	0.935505	-0.041059	0.131986
H_{700}	0.038286	0.970730	0.012006
V_{700}	0.065505	-0.086186	0.904687
L_{700}	0.938591	0.008215	0.104928

С учетом факторных нагрузок сделана содержательная интерпретация факторов:

f_1 – фактор обобщенного лапласиана (вихря скорости), основную нагрузку оказывают переменные (3) изобарических уровней 850 и 700 гПа; определяет 39,1 % общей дисперсии;

f_2 – фактор зональной циркуляции, основная нагрузка переменной (1) изобарических уровней; определяет 29,5 % общей дисперсии;

f_3 – фактор меридиональной скорости, основная нагрузка переменных (2) всех уровней; определяет 20,0 % общей дисперсии.

На базе выделенных ортогональных факторов проведена процедура иерархической (древовидной) кластеризации по методу Варда [7], где в качестве целевой функции применяется внутригрупповая сумма квадратов расстояний между каждым объектом и средней по кластеру, содержащему этот объект. Процедура кластеризации последовательно объединяет исходные объекты и соответственно уменьшает число кластеров (в начале работы алгоритма все объекты являются отдельными кластерами). Мерой сходства объектов (синоптических ситуаций) выбрано евклидово расстояние D [7].

Результаты и их анализ

Построенное в автоматизированном режиме «дерево» (дендрограмма) кластеризации отображает три хорошо различимых «ветви» (рис. 2, где по горизонтальной оси – номера ситуаций). При этом получено количество сроков/дней для каждого кластера: кластер 1 – 806/201; кластер 2 – 1335/334; кластер 3 – 1531/383 (соответственно, относительная частота синоптических ситуаций в каждом кластере следующая: кластер 1 – 0,22; кластер 2 – 0,36; кластер 3 – 0,42).

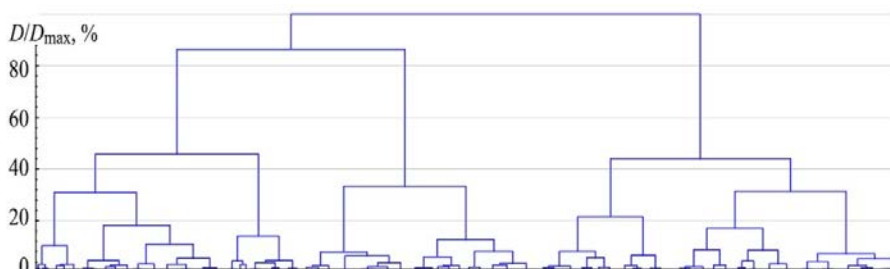


Рис. 2. Дерево кластеризации синоптических ситуаций (июнь–октябрь, 2018–2023 гг.).

Fig. 2. Clustering tree of synoptic situations (June–October, 2018–2023).

Распределения синоптических ситуаций выявленных кластеров удобно представить на факторной плоскости. Четкой границы между объектами кластеров не наблюдается, поэтому для лучшей визуализации распределений отображения даны на плоскостях общих факторов условно без одного кластера (рис. 3).

Проведено сравнение статистических распределений факторов в соответствующих кластерах с использованием непараметрического критерия Колмогорова – Смирнова, не требующего предпосылки закона распределения параметров [7]. Установлено статистически значимое (на уровне значимости 0,05) различие распределений факторов в каждом кластере. Схематическое отображение статистических характеристик (медиана, интервал попадания 50 % наблюдений, минимальное и максимальное значения) общих факторов в разных кластерах представлено на рис. 4.

Анализ циркуляционных ситуаций (полей геопотенциальной высоты), соответствующих определенным кластерам, показал, что во всех схемах с чередованием барических ложбин и гребней имелись два очага пониженного давления (с расположением областей на востоке рассматриваемого региона – в районе островов Зеленого Мыса и западного побережья Африки и на западе – в районе Панамы, Колумбии) и гребень – к северу от Венесуэлы, Гайаны. Различие определялось лишь циркуляционными особенно-

стями над океаном. Перманентный циклонический характер на западе и востоке региона в рассматриваемый период (сезон дождей) объясняется климатическими характеристиками на отмеченных территориях.

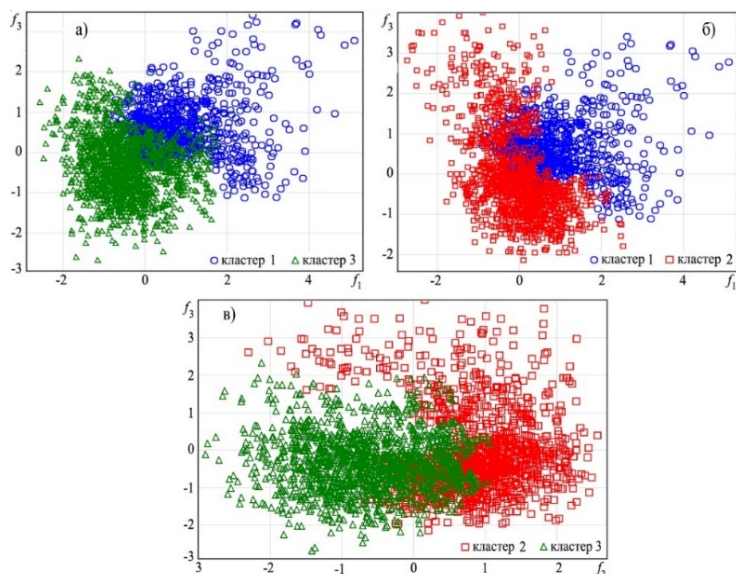


Рис. 3. Отображение выделенных кластеров на факторной плоскости (июнь–октябрь, 2018–2023 гг.).

Fig. 3. Imaging selected clusters on factor plane (June–October, 2018–2023).

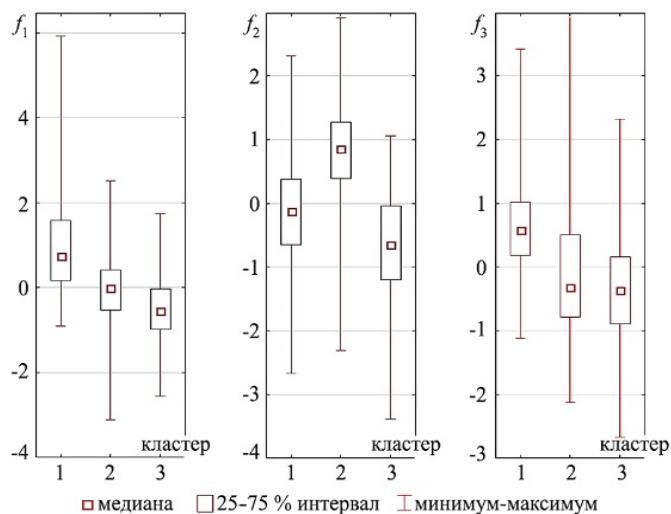


Рис. 4. Схема сравнения распределений факторов в кластерах (июнь–октябрь, 2018–2023 гг.).

Fig. 4. Comparison scheme of factor distributions in clusters (June–October, 2018–2023).

Чтобы дифференцировать ситуации, относящиеся к разным типам, выбирались случаи (сроки), когда значения общих факторов в комплексе были близки к медианным значениям в соответствующем кластере. Результаты оформлены на совмещенных картах АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀, где для детального представления картины циркуляции изогипсы нанесены через 1 гПа (черным цветом показаны изогипсы уровня 850 гПа, красным – уровня 700 гПа).

Схему циркуляции кластера 1 (обозначим как тип 1) можно характеризовать следующим образом: три очага пониженного давления и два разделяющих их гребня, что условно можно обозначить Н-В-Н-В-Н (рис. 5).

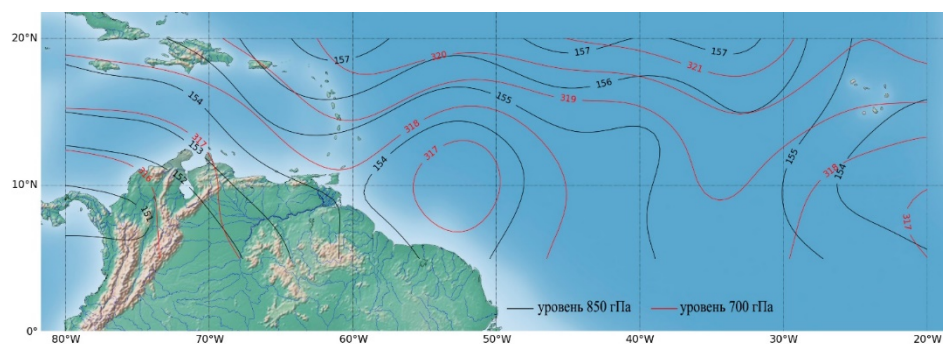


Рис. 5. Синоптическая ситуация 27.08.2018, 12 ч ВСВ на совмещенных картах АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

Fig. 5. Synoptic situation 27.08.2018, 12 h UTC on combined maps АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

К этому типу можно отнести и синоптические ситуации, предшествующие формированию тропического урагана Флоренс 31 августа 2018 г. [9] (например, рис. 6).

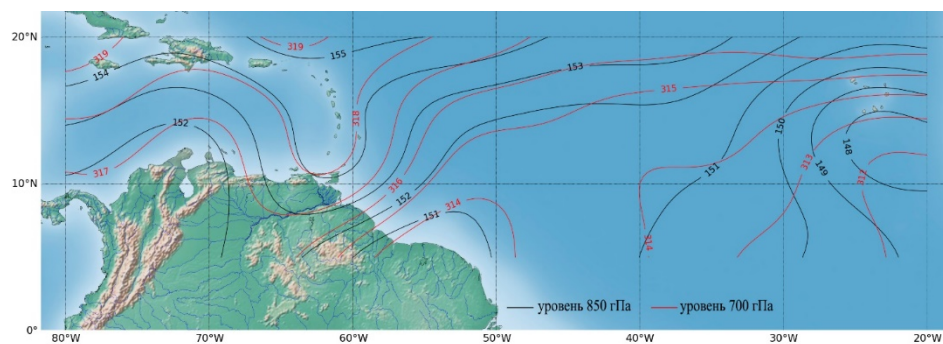


Рис. 6. Синоптическая ситуация 31.08.2018, 06 ч ВСВ на совмещенных картах АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

Fig. 6. Synoptic situation 31.08.2018, 06 h UTC on combined maps АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

Как отображено на рис. 6, над западным побережьем Африки появилось частное падение давления (31 августа, 06 ч), это барическое образование имело одну замкнутую изогипсу на 850 гПа и развитую ложбину на уровне 700 гПа. В 18 ч ВСВ сформировался циклон (рис. 7). К этому времени все частные циклоны и ложбины, расположенные западнее островов Зеленого Мыса до Южной Америки, были заполнены и вытеснены гребнем. Как показал анализ предыдущих синоптических ситуаций третьей декады августа, все случаи чередования развития барических ложбин и формирования частных циклонов закончились их заполнением, что дало эффект накопления энергии неустойчивости.

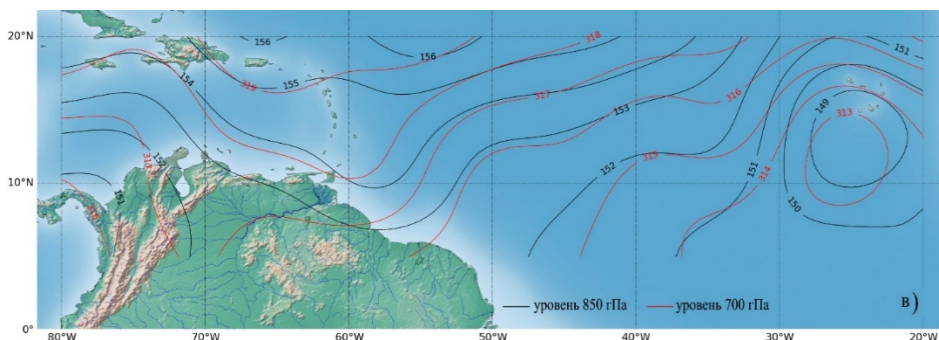


Рис. 7. Синоптическая ситуация 31.08.2018, 18 ч ВСВ на совмещенных картах AT₈₅₀ и AT₇₀₀.

Fig. 7. Synoptic situation 31.08.2018, 18 h UTC on combined maps AT₈₅₀ и AT₇₀₀.

Синоптические ситуации типа 2 отличаются от типа 1 тем, что нет хорошо выраженного гребня, разделяющего центры низкого давления, расположенные на Западе Африки и в Атлантическом океане. Эти центры объединяются в одну обширную область пониженного давления (депрессию) от берегов Африки до северного побережья Южной Америки. Такую схему циркуляции обозначим как Н-В-Н-Н, где обозначение Н-Н условно характеризует размытую область пониженного давления (рис. 8).

Для процесса типа 3 характерно два очага низкого давления у западного побережья Африки и в районе севера Южной Америки (Колумбия), а между ними обширный гребень (малоградиентное барическое поле высокого давления). Обозначение Н-В-Н (рис. 9).

Расчеты показали, что при каждом типе синоптической ситуации относительное число «проявления волновых образований» (когда центры циклонических образований регистрируются одновременно на двух изобарических уровнях) следующее: тип 1 – 0,74; тип 2 – 0,48; тип 3 – 0,53. Таким образом, можно сделать вывод, что возникновение волновых ситуаций наиболее часто при типе 1 синоптической ситуации, а при типах 2 и 3 – примерно одинаковое: в половине случаев. Графическое представление

объектов отмеченных кластеров и случаев реализации «волн» дано на рис. 10.

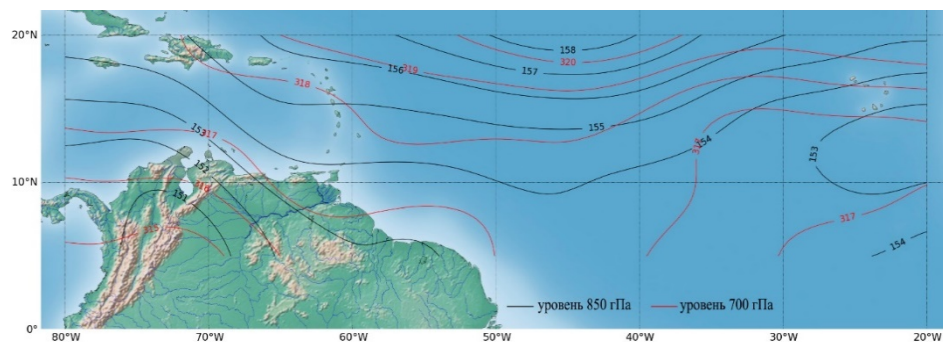


Рис. 8. Синоптическая ситуация 23.07.2018, 12 ч ВСВ на совмещенных картах АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

Fig. 8. Synoptic situation 23.07.2018, 12 h UTC on combined maps АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

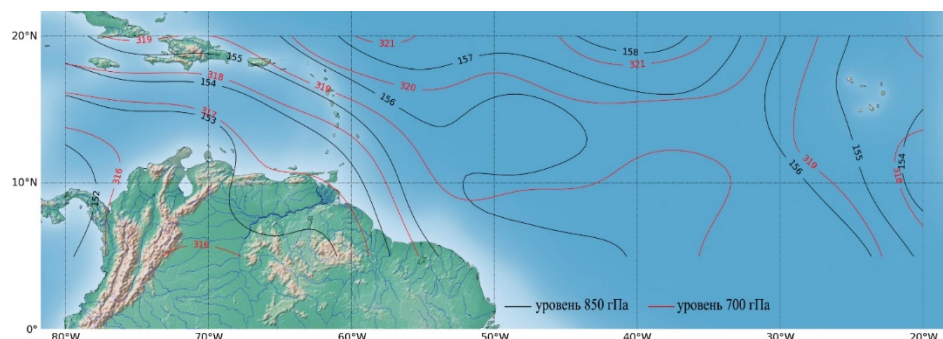


Рис. 9. Синоптическая ситуация 19.08.2018, 12 ч ВСВ на совмещенных картах АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

Fig. 9. Synoptic situation 19.08.2018, 12 h UTC on combined maps АТ₈₅₀ и АТ₇₀₀.

В результате дискриминантного анализа определены классификационные функции принадлежности синоптической ситуации к кластеру 1, 2 или 3 (типу):

$$\begin{aligned} C_1 &= -2,723 + 1,717 f_1 + 0,162 f_2 + 1,192 f_3, \\ C_2 &= -1,592 + 0,138 f_1 + 1,433 f_2 + 0,134 f_3, \\ C_3 &= -1,666 - 1,024 f_1 - 1,335 f_2 - 0,744 f_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Синоптическая ситуация относится к тому типу, для которого классификационная функция (5) принимает максимальное значение. Данную модель (5) можно использовать как для диагностики типа циркуляции, так и для прогноза тропических волн и связанных с ними циклонов.

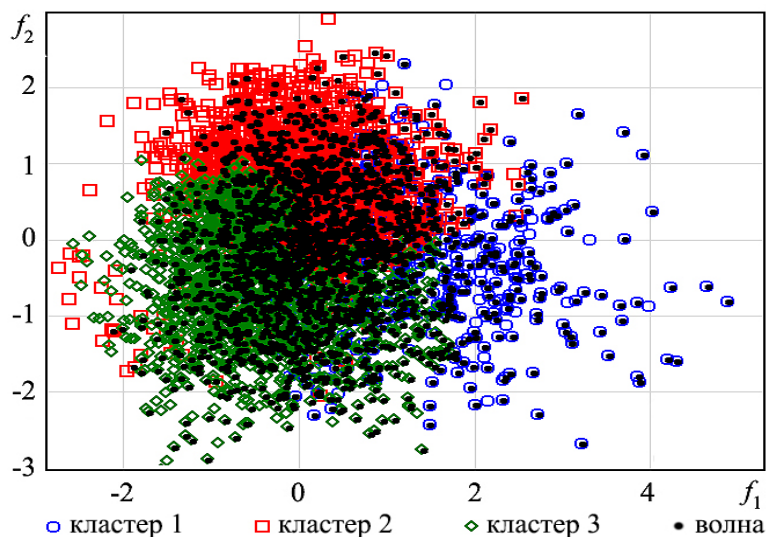


Рис. 10. Отображение кластеров с визуализацией реализации «волн» (июнь–октябрь, 2018–2023).

Fig. 10. Imaging clusters with visualization of realization «waves» (June–October, 2018–2023).

Заключение

На основе так называемого разведочного анализа [1], направленного на выявление «геометрической» природы исходных данных, установлено, что в структуре тропических волн Атлантики имеют место три типа синоптических ситуаций, где каждому типу соответствует определенная схема атмосферной циркуляции (условно обозначенная Н-В-Н-В-Н, Н-В-Н-Н, Н-В-Н). Тип 1 чаще несет выраженные волновые образования (с частотой 0,74), когда на двух уровнях отмечается совпадение центров циклонических образований (с развитием мощных кучево-дождевых облаков). Типы 2 и 3 синоптических ситуаций проявляют волновые образования примерно в половине случаев.

Результаты работы могут иметь приложение как в целях диагностики синоптических ситуаций с волновыми образованиями в Атлантике, так и в прогностических, например с использованием классификационных функций (5).

Значительный объем исходных данных, использование классических методов прикладной статистики, программная реализация расчетных процедур обосновывают достоверность полученных результатов исследования.

Полученные результаты могут служить основой продолжения исследования внутренней структуры тропических волн. Во-первых, следует обратить внимание на циркуляционные особенности на других изобарических уровнях (925 гПа, 500 гПа), возможно, на влияние экваториального

струйного течения. Во-вторых, можно предложить к рассмотрению другие признаки (предикторы) синоптических ситуаций в регионе Атлантики. В-третьих, наряду с геопотенциальной высотой следует рассмотреть комплекс параметров с учетом температуры и влажности воздуха. Кроме того, представляет интерес расширение территории исследования на район Тихого океана, где можно дифференцировать восточные волны в зависимости от процессов Ла-Нинья и Эль-Ниньо.

Список литературы

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности: Справ. издание. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
2. Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И.И. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели климата ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 6. С. 764-772.
3. Акперов М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внутритропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 620-637.
4. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 2. С. 147-157.
5. Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. Функции распределения вероятности циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: Инструмент для определения изменений глобального климата // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413, № 2. С. 254-256.
6. Петросяниц М.А., Тесля И.В., Фалькович А.И. Тропическая атмосфера во время дождливых и бездождных периодов // Метеорология и гидрология. 1990. № 2. С. 28-32.
7. Справочник по прикладной статистике. Т. 2 / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1990. 526 с.
8. Тараканов Г.Г. Тропическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 176 с.
9. Флоренс (ураган). [https://ru.wikipedia.org/wiki/Флоренс_\(ураган\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Флоренс_(ураган)).
10. Frank W.M., Roundy P.E. The role of tropical waves in tropical cyclogenesis // Mon. Weather Review. 2006. Vol. 134 (9). P. 2397-2417. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3204.1>
11. Hopsch S.B., Thorncroft C.D., Tyle K.R. Analysis of African easterly wave structures and their role in influencing tropical cyclogenesis // Mon. Weather Review. 2010. Vol. 138. P. 1399-1419. DOI: 10.1175/2009MWR2760.1.
12. Kiladis G.N., Thorncroft C.D., Hall N.M. Three-Dimensional Structure and Dynamics of African Easterly Waves. Part I. Observations // Journal of the Atmospheric Sciences. 2006. Vol. 63. P. 2212-2230. DOI: 10.1175/JAS3741.1
13. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2_pressure.html.
14. Thorncroft C., Hodges K. African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity // Journal of Climate. 2001. Vol. 14. P. 1166-1179. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2
15. Tropical waves. <https://web.archive.org/web/20110518175236/http://www.hpc.ncep.noaa.gov/international/training/tropicalwaves/sld005.htm>.

References

1. Ajvazyan S.A., Buxshaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti [Applied statistics. Classification and dimensionality reduction]: Sprav. izdanie. Moscow: Finansy i statistika publ., 1989, 607 p. [in Russ].

2. Akperov M.G., Bardin M.Yu., Volodin E.M., Golitsyn G.S., Mokhov I.I. Probability distributions for cyclones and anticyclones from the NCEP/ NCAR reanalysis data and the INM RAS climate model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 705-712. DOI: 10.1134/S0001433807060047
3. Akperov M.G., Mokhov I.I. A comparative analysis of the method of extratropical cyclone identification. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 574-590. DOI: 10.1134/S0001433810050038
4. Bardin M.Yu., Polonskij A.B. North Atlantic oscillation and synoptic variability in the European-Atlantic region in winter. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 127-136.
5. Golitsyn G.S., Mokhov I.I., Akperov M.G., Bardin M.Yu. Distribution functions of probabilities of cyclones and anticyclones from 1952 to 2000: an instrument for the determination of global climate variations. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 413, no. 1, pp. 324-326. DOI: 10.1134/S1028334X07020432
6. Petrosyancz M.A., Teslya I.V., Falkovich A.I. Tropicheskaya atmosfera vo vremya dozhdivykh i bezdozhdnykh periodov [Tropical atmosphere during rainy and rainless periods]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1990, no. 2, pp. 28-32 [in Russ].
7. Spravochnik po prikladnoj statistike [Applied Statistics Handbook]. Vol. 2, ed. E. Llojd, U. Lederman, S.A. Ajvazyan, Yu.N. Tyurin. Moscow: Finansy i statistika publ., 1990, 526 p. [in Russ].
8. Tarakanov G.G. Tropicheskaya meteorologiya [Tropical meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1980, 176 p. [in Russ].
9. Florens (uragan), available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Florens\(uragan\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Florens(uragan)) [in Russ].
10. Frank W.M., Roundy P.E. The role of tropical waves in tropical cyclogenesis. *Mon. Weather Review*, 2006, vol. 134 (9), pp. 2397-2417. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3204.1>
11. Hopsch S.B., Thorncroft C.D., Tyle K.R. Analysis of African easterly wave structures and their role in influencing tropical cyclogenesis. *Mon. Weather Review*, 2010, vol. 138, pp. 1399-1419. DOI: 10.1175/2009MWR2760.1.
12. Kiladis G.N., Thorncroft C.D., Hall N.M. Three-dimensional structure and dynamics of African easterly waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, vol. 63, pp. 2212-2230. DOI: 10.1175/JAS3741.1
13. NCEP/DOE AMIP II Reanalysis, available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html>.
14. Thorncroft C., Hodges K. African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 2001, vol. 14, pp. 1166-1179. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2
15. Tropical waves, available at: <https://web.archive.org/web/20110518175236/http://www.hpc.ncep.noaa.gov/international/training/tropicalwaves/sld005.htm>.

Поступила 14.05.2026; принята в печать 22.10.2026.
Submitted 14.05.2026; accepted for publication 22.10.2026.