

УДК 551.515.2

© Г. В. Левина*, 2022

Институт космических исследований РАН, 117997, Профсоюзная д. 84/32, г. Москва, Россия

*E-mail: levina@cosmos.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО ДИНАМО ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Статья поступила в редакцию 21.09.2021, после доработки 06.03.2022, принята в печать 20.03.2022

Аннотация

Все более очевидным становится изменение климата, которое приводит к увеличению числа интенсивных атмосферных вихрей (тропических и квазитропических циклонов, полярных ураганов, облачных смерчей-торнадо) и расширению географических и сезонных пределов их появления. Недавним примером стал черноморский квазитропический циклон 11–16 августа 2021 г. В этих условиях чрезвычайно важна точная диагностика циклогенеза и основанный на ней прогноз дальнейшей эволюции и траектории формирующегося вихря. Главным источником энергии для тропических, квазитропических и полярных ураганов является тепловая конвекция, вызванная значительной разностью температур между атмосферным слоем и подстилающей водной поверхностью. Это позволяет предложить единый подход для диагностики циклогенеза во всех трех случаях.

Впервые предложен оригинальный подход для определения точного времени начала тропического циклогенеза. Такой подход включает комбинированный анализ спутниковых изображений облачности и соответствующих данных облачно-разрешающего численного моделирования для области развивающегося вихревого возмущения. Теоретическим базисом является фундаментальная гипотеза о турбулентном вихревом динамо. Теория дает количественные критерии, определяющие возбуждение крупномасштабной вихревой неустойчивости в атмосфере. Атмосферное численное моделирование позволяет точно определить момент времени, в который реализуются необходимые условия для возникновения неустойчивости. Этот момент интерпретируется как начало циклогенеза. Найденные в работе специфические конфигурации вихревой облачной конвекции, соответствующие начальной стадии циклогенеза, могут быть использованы в оперативной метеодиагностике при анализе спутниковых изображений облачности. Иллюстрация подхода дана на примере диагностики тропического циклогенеза.

Ключевые слова: тропический циклогенез, диагностика, турбулентное вихревое динамо, вихревая облачная конвекция, спутниковые данные, облачно-разрешающее численное моделирование

© G. V. Levina*, 2022

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, 117997, Profsoyuznaya Str., 84/32, Moscow, Russia

*E-mail: levina@cosmos.ru

APPLICATION OF THE TURBULENT VORTEX DYNAMO THEORY FOR EARLY DIAGNOSTICS OF THE TROPICAL CYCLONE GENESIS

Received 21.09.2021, Revised 06.03.2022, Accepted 20.03.2022

Abstract

The climate change is becoming more and more obvious, which leads to an increase in the number of intense atmospheric vortices (tropical and quasi-tropical cyclones, polar hurricanes, tornadoes) and an expansion of the geographical and seasonal limits of their occurrence. A recent example was the quasi-tropical cyclone in the Black Sea on August 11–16, 2021. Under these conditions, the accurate diagnosis of cyclogenesis is extremely important and, based on it, the forecast of further evolution and the trajectory of the forming vortex. The main source of energy for tropical, quasi-tropical and polar hurricanes is thermal convection caused by significant temperature differences between the atmospheric layer and the underlying water surface. This allows us to propose a unified approach for the diagnosis of cyclogenesis in all three cases.

For the first time, an original approach is proposed for determining the exact time of the onset of tropical cyclogenesis. This approach includes a combined analysis of satellite images of cloudiness and the corresponding data of cloud-resolving numerical

Ссылка для цитирования: Левина Г.В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 47–59. doi:10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn

For citation: Levina G. V. Application of the Turbulent Vortex Dynamo Theory for Early Diagnostics of the Tropical Cyclone Genesis. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 47–59. doi:10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn

modeling for the region of developing vortex disturbance. The theoretical basis is the fundamental hypothesis of a turbulent vortex dynamo. The theory provides quantitative criteria that determine the excitation of large-scale vortex instability in the atmosphere. Atmospheric numerical modeling makes it possible to accurately determine the moment of time at which the necessary conditions for the onset of instability are realized. This moment is interpreted as the beginning of cyclogenesis. The specific configurations of vortical cloud convection found in the work, which correspond to the initial stage of cyclogenesis, can be used in operational meteorological diagnostics when analyzing satellite images of cloudiness. The approach is illustrated by the example of diagnostics of tropical cyclogenesis.

Keywords: tropical cyclogenesis, diagnosis, turbulent vortex dynamo, vortical cloud convection, satellite imagery, cloud-resolving numerical modeling

1. Введение

В последнее время появилось мнение, что изменение климата приводит к увеличению числа возникающих интенсивных атмосферных вихрей: тропических и квазитропических циклонов, полярных ураганов, облачных смерчей-торнадо. Причем интенсивные вихри стали чаще выходить за пределы географических регионов и сезонных интервалов их прежнего наблюдения, например, в более высокие широты и более ранние/поздние месяцы года. Некоторые тропические циклоны (ТЦ) достигали необычно высокой интенсивности на исходе привычного сезона ураганов. Среди недавних случаев можно отметить Атлантический ураган Sandy (22 октября — 2 ноября 2012). Он достиг северо-восточных штатов и стал четвертым в истории США по стоимости нанесенного ущерба. Ураган Pablo (25–28 октября 2019 г.) стал «самым восточным» из Атлантических ТЦ — вихрь достиг ураганной интенсивности при 18,8 з.д., находясь на 42°с.ш. [1]. Этот ураган оказался вторым из «самых северных», не побив рекорда неназванного урагана 1971 года — 46°с.ш. Чаще стали наблюдаться квазитропические циклоны в Средиземном море, которые известны также под названием “medicanes” [2].

Подобные вихри не обходят стороной и территорию России. Квазитропические циклоны (квази-ТЦ) в российской научной литературе и СМИ часто называют субтропическими циклонами/мезоциклонами/штормами. Первые спутниковые снимки черноморских мезомасштабных циклонических вихрей, зафиксировавшие особенность типа «глаза» урагана, относятся к 2002 г. и могут быть найдены в архиве Метеорологического офиса (Met Office) Великобритании [3, 4]. Однако эти вихри имели очень короткое время жизни и не были исследованы. Первый подробно изученный квази-ТЦ достиг максимальной скорости поверхностного ветра 25 м/с при падении давления в центре до 992 гПа. Он наблюдался над акваторией Черного моря 25–29 сентября 2005 г. [5, 6] — рис. 1, а. Должен быть исследован ещё один интенсивный долгоживущий черноморский квази-ТЦ (рис. 1, б). Он появился недавно — 11–16 августа 2021 г. Предыдущий вихрь 2005 г. сформировался вдали от густонаселенных территорий, а циклон нынешнего сезона несколько

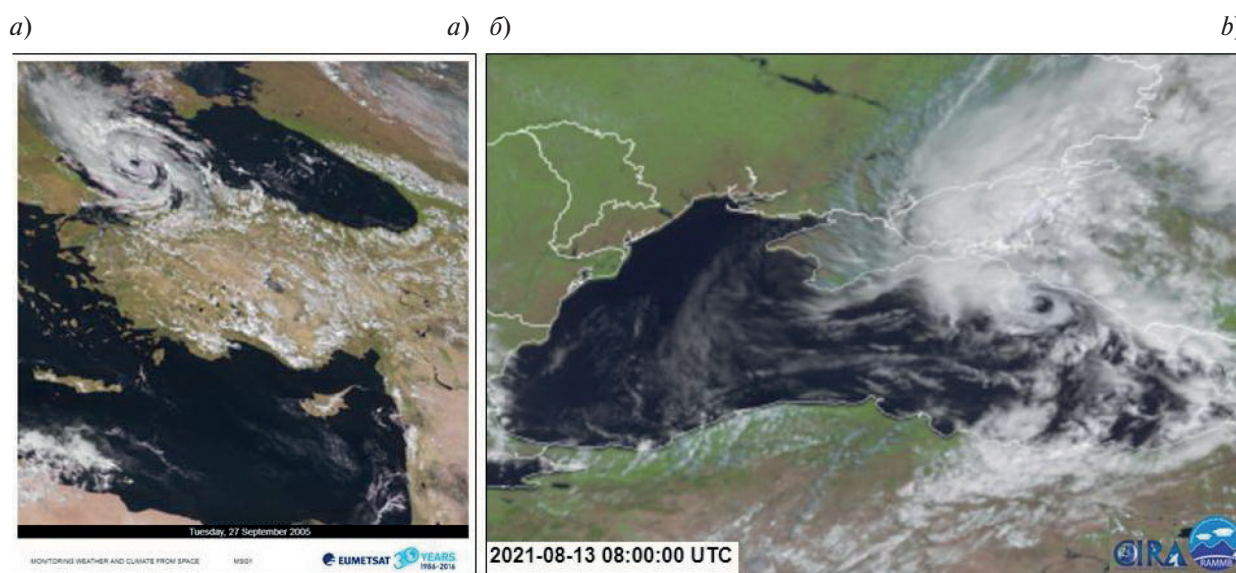


Рис. 1. Квазитропические циклоны в Чёрном море

Fig. 1. Quasi-tropical cyclones over the Black Sea

суток находился в непосредственной близости от побережья Кавказа, Краснодарского края и Крыма. Он перемещался из Чёрного моря в Азовское. Этот черноморский вихрь вызвал рекордные осадки: трехдневные суммы осадков 13–15 августа составили в Темрюке 516 мм (что означает примерно полтонны воды на 1 м^2 и сравнимо с годовой нормой осадков), Анапе — 219 мм, Новороссийске — 178 мм [7]. Тропические циклоны хотя и не зарождаются вблизи территории России, но регулярно выходят на российские регионы Дальнего Востока. Ещё один тип ураганных циклонических вихрей, которые наблюдаются в нашей стране, был обнаружен при анализе спутниковых изображений облачного покрова сравнительно недавно, в 1960-х гг. Это полярные ураганы. И если раньше подобные вихри формировались преимущественно в Баренцевом и Охотском море, то теперь в связи с потеплением в Арктике они стали также появляться в море Лаптевых, в Восточно-Сибирском и Карском морях.

Тропические, квазитропические и полярные ураганы являются интенсивными атмосферными вихрями, характеризуются ветрами огромной разрушительной силы, мощной облачностью. Они вызывают сильные осадки и волнение морской поверхности, наводнения в прибрежных районах. Эти явления представляют серьезную угрозу для жизни и хозяйственной деятельности. Поэтому диагностика зарождения таких вихрей и прогноз их дальнейшей эволюции относятся не только к числу актуальных фундаментальных задач физики атмосферы и океана, но и имеют очевидную практическую направленность.

В проблеме диагностики зарождения тропических, квазитропических и полярных ураганов в разных климатических поясах планеты принципиальным и объединяющим моментом может стать тот факт, что при их формировании важную роль играет один и тот же физический механизм — тепловая конвекция. Предложенная в совместных российско-американских работах 2009–2015 гг. интерпретация тропического циклогенеза как крупномасштабной неустойчивости в спиральной атмосферной турбулентности [8] допускает распространение и на ураганоподобные мезоциклоны в средних и высоких широтах.

Разработка численной диагностики зарождения ТЦ была начата в [9–11] и продемонстрирована для нескольких идеализированных сценариев тропического циклогенеза.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Проблема диагностики зарождения тропических циклонов (ТЦ)

Проблема тропического циклогенеза является одной из важных и до сих пор нерешенных фундаментальных задач тропической метеорологии и физики атмосферы. Более того, до настоящего времени не существует общепринятого определения тропического циклогенеза, которое должно служить принципиальной основой для точной количественной диагностики реализовавшегося зарождения ТЦ. От решения этой проблемы критическим образом зависит дальнейший прогноз развития образовавшегося вихря и вся система предупреждения населения о возможной чрезвычайной ситуации.

Однако, несмотря на сложившуюся неопределенность, насущные потребности диагностики и прогнозирования таких экстремальных погодных явлений заставили выработать некоторую систему признаков, позволяющих утверждать, что произошло зарождение ТЦ. Основываясь на ней, в метеорологической практике фактом формирования ТЦ принято считать образование сконцентрированного у поверхности вихря, в котором скорость тангенциального ветра достигает наиболее высоких значений на нижних уровнях; с пониженным давлением в центре поверхностной замкнутой ветровой циркуляции и имеющего теплое ядро. Если максимальная скорость поверхностного ветра в сформировавшемся вихре не превышает 17 м/с , то он называется тропической депрессией (ТД). Она рассматривается в качестве начальной стадии на шкале интенсивности ТЦ. Наибольшую трудность при этом представляет диагностика подобного события, поскольку образование ТЦ происходит над водной поверхностью и очень часто вдали от наземных центров слежения с необходимыми измерительными приборами. Современные средства космического мониторинга и современные численные модели атмосферы используют усвоение спутниковых данных. Они значительно улучшили ситуацию. Тем не менее, до сих пор самым надежным подтверждением образования ТЦ является непосредственное проведение измерений с самолетов в зоне формирующегося вихря. Насколько нам известно, такой подход на постоянной основе применяется только в США [2, 12]. Но и в этих случаях практически невозможно определить точное время зарождения ТЦ.

Зарождение ТЦ может быть точно диагностировано только на основе атмосферного процесса или ряда процессов, в которых существуют количественные пороговые критерии для данного явления.

Тропический циклогенез — пороговая крупномасштабная вихревая неустойчивость в спиральной атмосферной турбулентности

В совместных российско-американских работах [8–11] была выдвинута и обоснована интерпретация тропического циклогенеза как процесса самоорганизации влажно-конвективной спиральной атмосферной турбулентности. При атмосферных условиях, способствующих циклогенезу [2], такой процесс может инициировать крупномасштабную вихревую неустойчивость. В работах [13, 14] обсуждается, как предложенная интерпретация позволяет количественно и точно диагностировать факт зарождения ураганного вихря, рассматривая в этом качестве начало крупномасштабной вихревой неустойчивости.

В целях диагностики авторами [8–11] была применена теоретическая гипотеза о турбулентном вихревом динамо [15, 16]. Гипотеза предлагает способ усиления крупномасштабных вихревых возмущений в атмосфере за счет передачи энергии от мелкомасштабной турбулентности. Такой процесс известен под названием обратного каскада энергии. Его существование было обосновано в трехмерной спиральной турбулентности, которая характеризуется нарушением зеркальной симметрии [17]. Подобно двум другим хорошо известным крупномасштабным неустойчивостям в спиральных турбулентных средах, альфа-эффекту в магнитной гидродинамике [18] и анизотропному кинетическому альфа (АКА)-эффекту в непроводящей жидкости [19], теория вихревого динамо дает порог возбуждения крупномасштабной неустойчивости [15, 16, 20] и количественные оценки для соответствующих параметров атмосферы [16].

2.2. Диагностика тропического циклогенеза с помощью облачно-разрешающего численного моделирования и спутниковых данных

В работе [13] показано, как результаты изучения тропического циклогенеза средствами идеализированного численного моделирования [8–11] могут быть применены в метеорологической практике для реальных атмосферных вихрей. Предложен способ для точной и, что принципиально важно, дистанционной диагностики момента времени, когда начинается зарождение ТЦ. Оперативная, т.е. в реальном времени, метеорологическая диагностика должна осуществляться на основе совместного анализа данных облачно-разрешающего численного моделирования формирующегося вихря и соответствующих снимков облачности в инфракрасном диапазоне, полученных с геостационарного спутника. Было найдено [13], что в моменты ключевых событий при зарождении ТЦ (формирование вторичной трансверсальной циркуляции, начало крупномасштабной вихревой неустойчивости, образование вихря ТД) появляются специфические конфигурации глубокой вращающейся облачной конвекции. Важно подчеркнуть, что такие типичные конфигурации отчетливо идентифицируются в двух разных физических полях и двумя независимыми методами анализа — в поле вертикальной спиральности (численное моделирование) и поле температуры (спутниковые данные). Таким образом, предлагаемая диагностика базируется на важной роли, которую играют в тропическом циклогенезе интенсивные вращающиеся облачные структуры, известные как вихревые горячие башни (ВГБ) [21–23].

2.3. Вихревые горячие башни (ВГБ)

Наглядное представление об облачных горячих башнях даёт визуализация NASA, выполненная для тропического урагана Bonnie (1998) и размещённая в Википедии [24]. Эти интенсивные кучево-дождевые конвективные структуры были впервые описаны в 1958 г. [25], а их вихревая природа была идентифицирована почти пятьдесят лет спустя в [21, 22]. В работе [25] горячие башни определялись как небольшие по горизонтальным размерам, около 10–30 км, но интенсивные кучево-дождевые конвективные облака. Они достигают тропопаузы, которая в тропиках обычно расположена на высотах 16–18 км. Действительно, на визуализации [24] высота самой интенсивной из башен близка к 18 км. Важно отметить, что определение «горячие» связано не с температурой этих облачных структур, а с тем, что по всей высоте башни идет интенсивное выделение энергии за счет последовательности фазовых переходов влаги: водяной пар—вода—лёд.

Обнаружение вихревой природы тропической конвекции стало не только важным научным открытием [21], но и эффектной демонстрацией возможностей совершенно нового средства атмосферных исследований. Вихревые горячие башни (ВГБ) были открыты с помощью численного моделирования сверхвысокого по тем временам (начало 2000-х гг.) пространственного разрешения — облачно-разрешающего, 2–3 км по горизонтальным направлениям. Годом позже существование ВГБ было подтверждено [22] с помощью обработки данных натурных измерений. Они были произведены ранее с исследовательского самолёта в зоне зарождающегося урагана. Далее авторам [26] повезло наблюдать отдельно взятую интенсивную ВГБ в течение примерно 40 мин во время исследовательского полета, измерить и документировать типичные характеристики этой вращающейся облачной структуры. Таким образом, было подтверждено, что характерное

время жизни конвективных башен составляет порядка одного часа. Башня была размером около 10 км по горизонтали и высотой примерно 17 км. Вертикальные скорости достигали 10–25 м/с в средней тропосфере и превышали 30 м/с на верхних уровнях. При этом максимальные значения относительной вертикальной завихренности были $6-18 \cdot 10^{-3}$ 1/с, что на 1–2 порядка превышает планетарное вращение.

Спиральные свойства ВГБ были отмечены в [27], где эти структуры были описаны как глубокие влажные конвективные облака. Они вращаются как единое целое и/или содержат спиральные вращающиеся восходящие потоки, аналогичные тем, которые наблюдаются при конвекции Рэлея-Бенара во вращающейся жидкости. И далее было подчеркнуто, что такие локально всплывающие вихревые структуры усиливают существующую фоновую циклоническую завихренность, по крайней мере, на целый порядок величины. Авторы работы [28] обнаружили рекордные значения спиральности вблизи конвективных башен в урагане Bonnie (1998) при обработке данных измерений в натурном эксперименте NASA CAMEX (Convection and Moisture Experiment, 1998–2001). ВГБ были названы спиральными по определению, поскольку одновременно содержат восходящие потоки и вертикальную завихренность.

В разных странах мира выполнено значительное число исследований, посвященных ВГБ и их роли в зарождении и формировании ТЦ. Обобщённая информация по этому вопросу содержится в обзоре [29]. Пристальное внимание изучению вихревой тропической конвекции также уделялось в нескольких натурных экспериментах в Атлантическом и Тихом океане [30].

Прежде чем приступить к обсуждению диагностики зарождения ТЦ, полезно проиллюстрировать, как выглядят ВГБ в типичных наборах данных, которые необходимо применить для предлагаемого анализа — на спутниковых данных наблюдаемого ТЦ, обычно используемых метеослужбами, и в идеализированном облачно-разрешающем численном моделировании [8, 13].

2.4. ВГБ на спутниковых снимках облачности

На рис. 2 показаны спутниковые изображения тропического шторма Grace 14 августа 2021 г., полученные с геостационарного спутника GOES-16. Он также обозначается как GOES-East и предназначен для слежения за регионом Северной и Южной Америки. В момент времени на снимках вихрь приближался к Наветренным островам со стороны Атлантического океана, координаты его центра находились при $15,9^\circ$ с.ш. и $60,7^\circ$ з.д. Максимальная сила поверхностного ветра составляла около 18 м/с. Область, показанная на снимках, составляет примерно 2000×2000 км. Изображения атмосферного вихря представлены в двух диапазонах. Диапазон «GEOCOLOR» на рис. 2, а обеспечивает максимально близкое приближение к дневному изображению. Инфракрасный диапазон «Band 13» с разрешением 2 км на рис. 2, б предназначен для анализа облачности, в частности для определения верхней границы облаков. Тёмно-красный и чёрный цвета соответствуют очень интенсивным конвективным структурам, которые достигают тропопаузы

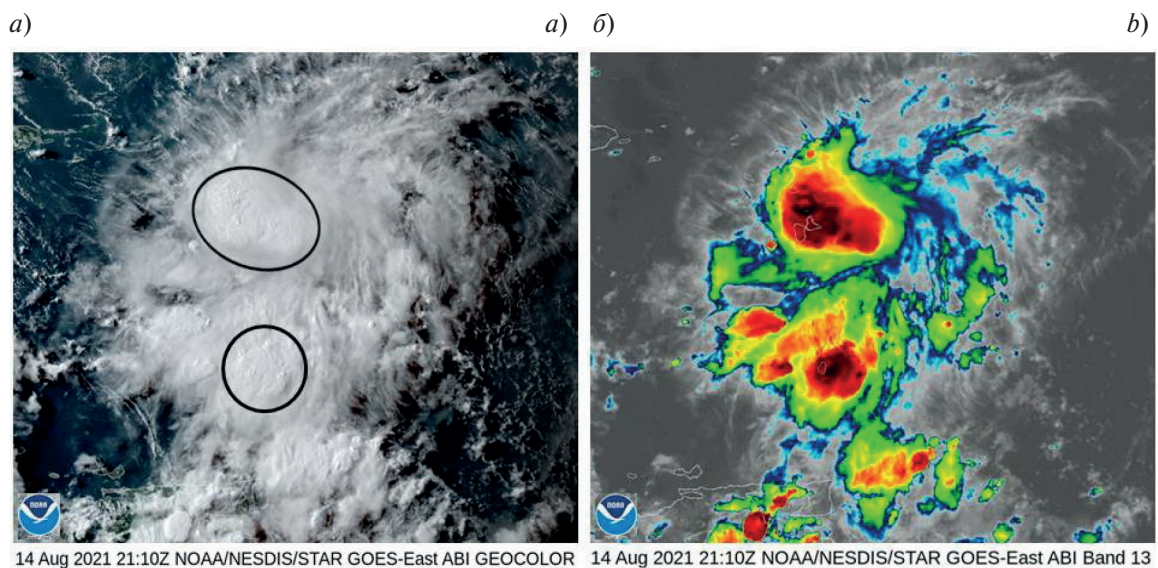


Рис. 2. Вихревые горячие башни в тропическом шторме Grace 14 августа 2021 г.

Fig. 2. Vortical hot towers in Tropical Storm Grace 14 August 2021

(15–16 км) и проникают в нижнюю стратосферу. В англоязычной литературе для таких структур существует специальное название — «Overshooting Cloud Tops (OCTs)». Соответствующие области с интенсивной конвекцией на рис. 2, а обведены чёрной линией

Аналогичные интенсивные конвективные движения с присутствием облачных башен заметны и в черноморском квази-ТЦ (2021). На рис. 1, б они видны около черноморского побережья к северо-западу от «глаза» вихря и в облачности над Азовским морем.

2.5. ВГБ в идеализированном численном моделировании

Способ локализации ВГБ в численном моделировании был впервые предложен и применен в работах с участием автора [8, 10, 13]. Он основан на спиральной природе вихревой конвекции. Действительно, вращающиеся вертикальные ячейки могут быть превосходно идентифицированы с помощью поля вертикальной спиральности, являющейся произведением вертикальной скорости на вертикальную завихренность.

С этой целью при пост-обработке данных облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования рассчитывалось поле плотности спиральности h , т.е. значения спиральности определялись в каждой точке расчетной области. В частности, для локализации вихревой конвекции использовался вертикальный вклад спиральности h_z ,

$$h = V \cdot \omega = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (1)$$

Плотность спиральности (1) является псевдоскалярной величиной [29, 30], поэтому может быть как положительной, так и отрицательной. В правой декартовой или ортогональной криволинейной системе координат положительная плотность спиральности будет генерироваться во влажной атмосфере за счет циклонических восходящих потоков и/или антициклонических нисходящих движений. Точно так же отрицательная спиральность будет генерироваться в случае антициклонических восходящих и/или циклонических

нисходящих потоков. Комбинируя рассмотрение поля вертикальной спиральности с анализом поля вертикальной скорости или вертикальной завихренности, можно легко различить восходящие и нисходящие вращающиеся потоки. Вся совокупность положительных и отрицательных значений плотности вертикальной спиральности показывает полную картину вращающихся вертикальных потоков в рассматриваемой области пространства.

В качестве иллюстрации на рис. 3 показана вихревая влажная конвекция, локализованная в поле вертикальной спиральности для численного эксперимента A2 из работы [23]. В этом эксперименте с помощью региональной модели атмосферы RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) с горизонтальным пространственным разрешением 3 км было исследовано зарождение и развитие ТЦ. Система вращающихся конвективных потоков разных размеров и интенсивности, представленная на рис. 3, показана в момент времени, когда модельный ТЦ достиг стадии урагана 2-й категории интенсивности с максимальной тангенциальной скоростью 43 м/с у поверхности.

Подводя итоги обсуждения ВГБ, необходимо подчеркнуть, что вихревая облачная конвекция присутствует на протяжении всего жизненного цикла ТЦ: от стадии зарождения до стадии вихря наивысшей ураганной интенсивности. Облачная конвекция не подавлялась быстрым вращением в урагане Bonnie, который 22 августа 1998 [24] находился на стадии быстрого усиления (Rapid Intensification — RI) максимального поверхностного ветра от 35 м/с до 50 м/с [28]; в тропическом шторме Grace (рис. 2) [33], модельном урагане 2-й категории интенсивности (рис. 3), черноморском квази-ТЦ штормовой интенсивности (рис. 1, б).

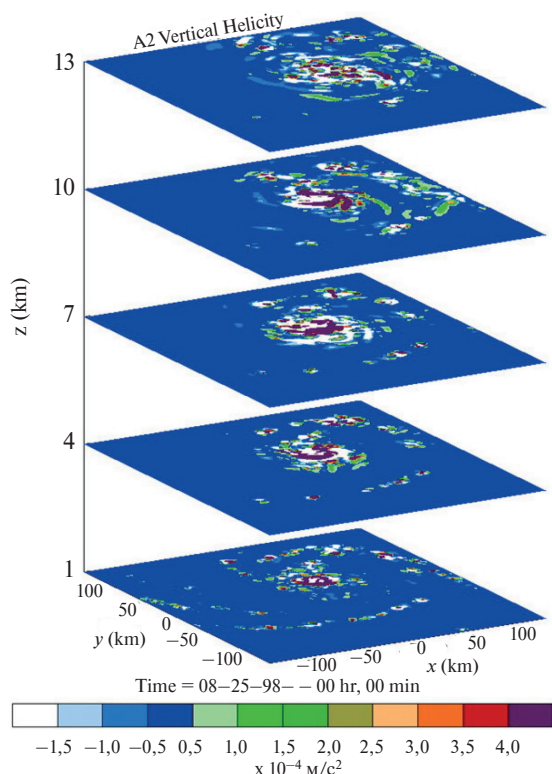


Рис. 3. Вихревая влажная конвекция. Поле плотности вертикальной спиральности ($\times 10^{-4} \text{ м/с}^2$) в пяти горизонтальных плоскостях $276 \times 276 \text{ км}$ при $z = 1, 4, 7, 10, 13 \text{ км}$

Fig. 3. Vortical moist convection. The field of the vertical helicity density ($\times 10^{-4} \text{ м/с}^2$) in five horizontal levels of $276 \times 276 \text{ км}$ at $z = 1, 4, 7, 10, 13 \text{ км}$

3. Результаты

3.1. Точная диагностика зарождения ТЦ

В обзорной работе [8] представлены все этапы исследований, позволивших применить теорию турбулентного вихревого динамо для диагностики зарождения ТЦ с помощью облачно-разрешающего численного моделирования. Далее обсудим лишь основные моменты на этом пути.

Необходимым условием существования вихревого динамо в тропической атмосфере является нарушение зеркальной симметрии атмосферной турбулентности в условиях образования ТЦ [15, 16]. Это требование предопределило цель первого исследования [9] из серии совместных российско-американских работ 2009–2015 гг. [8–11]. Все работы данной серии основаны на американских данных численного моделирования с пространственным разрешением 2–3 км по горизонтальным направлениям [23]. Само название работы [23] «A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis» впервые в тропической метеорологии акцентировало роль вихревой облачной конвекции — ВГБ — в зарождении ТЦ.

В работе [9] были впервые выполнены расчеты и анализ спиральных характеристик поля скорости в процессе усиления начального вихревого возмущения и формирования вихря ТД с последующей его интенсификацией до стадии зрелого урагана. Позже в обзоре [8] было проведено подробное обсуждение генерации спиральности на масштабах облачности (ВГБ) и на мезомасштабах вихревой системы. При этом особое внимание было уделено механизму производства и усиления вертикальной завихренности при взаимодействии конвекции и вертикального сдвига горизонтальной скорости [23, 34], который одновременно обеспечивает интенсивную генерацию спиральности.

Было показано [9], что при зарождении и дальнейшем развитии ТЦ происходит генерация существенно ненулевой и нарастающей интегральной спиральности вихревой системы. Отличная от нуля интегральная спиральность является признаком нарушения симметрии турбулентности в зоне образования ТЦ и означает возникновение специфической топологии течения, характеризующейся зацеплением вихревых линий [31, 32]. Таким образом, авторами [9] был получен первый пример генерации ненулевой интегральной спиральности в реальной природной системе — тропической атмосфере Земли. Было впервые показано, что атмосферная турбулентность в мезомасштабной области формирования ТЦ, $276 \times 276 \times 20$ км [23], является спиральной в течение всего времени жизни ураганного вихря. Как известно из теории турбулентности [17], в спиральной турбулентной среде возможно подавление потока энергии к масштабам диссипации и существуют благоприятные условия для возникновения крупномасштабной вихревой неустойчивости. Результаты работы [9] стали важной мотивацией для продолжения исследований и поиска вихревого динамо в тропической атмосфере.

Однако ненулевая интегральная спиральность ещё не означает факта реализации турбулентного вихревого динамо. Как следовало из теоретической модели динамо-эффекта [15, 16], а затем было показано с помощью численного исследования [35, 36] уравнений этой модели, возникновение крупномасштабной неустойчивости необходимо диагностировать с помощью анализа энергетики вихревой системы.

3.2. Диагностика зарождения ТЦ с помощью облачно-разрешающего численного моделирования

Процедура диагностики неустойчивости основана на особенностях структуры и динамики ТЦ (рис. 4).

Основой для рис. 4, *a* послужило изображение тропического циклона в разрезе, представленное в [37], Fig. 3. На рис. 4, *a* на базовом изображении (Fig. 3 [37]) схематически показаны первичная (primary) тангенциальная и вторичная (secondary) трансверсальная циркуляции. На правую часть разреза ТЦ наложена визуализация [24], чтобы показать присутствие вихревой облачной конвекции — ВГБ. В результате, такое «композиционное» изображение ТЦ схематически иллюстрирует не только крупномасштабные движения, но и движения на масштабах кучевой облачности, которые играют принципиальную роль в возбуждении турбулентного вихревого динамо.

Сформировавшийся ТЦ представляет собой интенсивный атмосферный вихрь, в котором основная составляющая скорости лежит в горизонтальной плоскости [38]. Мощная тангенциальная, называемая также первичной, циркуляция наложена на менее интенсивную трансверсальную (вторичную) циркуляцию, образованную радиальной и вертикальной составляющими скорости (в цилиндрических координатах) — рис. 4, *a*.

Авторы теории вихревого динамо [15, 16] исходили из таких же представлений о структуре ТЦ. Следуя [15, 16], динамо-эффект должен создавать зацепление (linkage [31]) первичной и вторичной циркуляции на мезомасштабах, т.е. спиральную структуру системы ТЦ в целом. Согласно концепции вихревого динамо такое зацепление означает создание положительной обратной связи между циркуляциями. Она обеспечивает

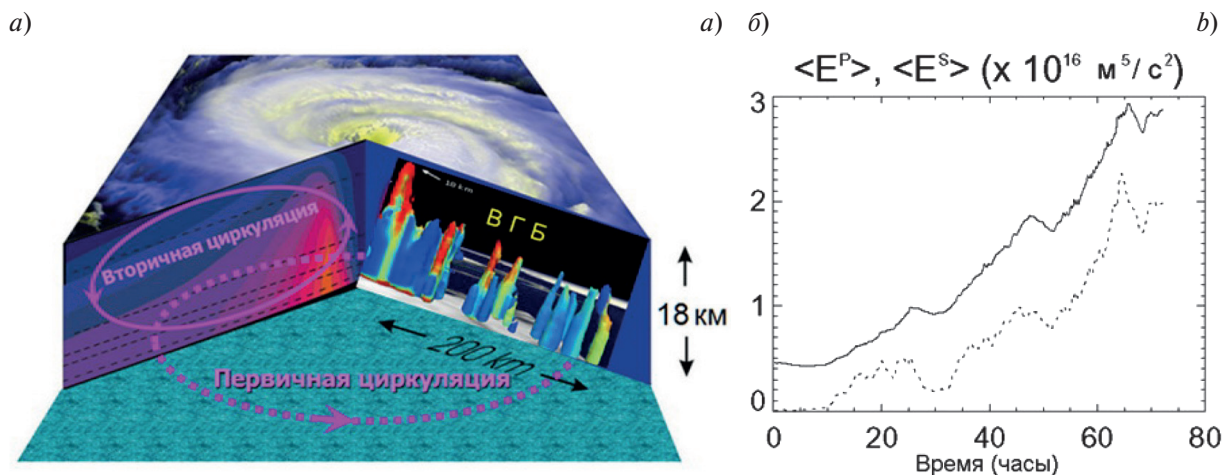


Рис. 4. Диагностика зарождения ТЦ: *a* — схема зацепления первичной и вторичной циркуляции, осуществляемая семейством ВГБ; *б* — эволюция кинетической энергии первичной (сплошная линия) и вторичной (пунктирная линия) циркуляции

Fig. 4. Diagnostics of TC genesis: *a* — schematic of the linkage of primary and secondary circulation through VHTs population; *b* — evolution of the kinetic energy of primary (solid line) and secondary (dotted line) circulation

их взаимное усиление. Причём, в отличие от всех известных концепций тропического циклогенеза [2], эта обратная связь, назовём её «спиральной», реализуется и поддерживается в рамках только одного физического поля — поля скорости. В момент появления спиральной обратной связи зарождающийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся и усиливающимся, что соответствует началу неустойчивости. Возникшая неустойчивость может быть диагностирована оригинальным способом [8, 10, 11, 13], основанным на особенностях спиральной обратной связи.

С этой целью рассчитывается по отдельности кинетическая энергия первичной и вторичной циркуляции. Затем на одном и том же рисунке строятся графики эволюции обеих энергетических характеристик, и определяется момент, когда начинается их взаимное усиление. Как показывает рис. 4, б, это происходит примерно при $t = 12$ ч. Дальнейшее развитие неустойчивости зависит от условий в тропической атмосфере, которые благоприятствуют формированию ТЦ [2]. Такие условия были реализованы в численных экспериментах базовой для данного рассмотрения работы [23].

4. Обсуждение

4.1. Ключевая роль ВГБ в создании вихревого динамо в атмосфере

Как было отмечено выше, турбулентное вихревое динамо в атмосфере должно создаваться спиральной положительной обратной связью, которая действует между компонентами одного и того же физического поля скорости — между первичной тангенциальной и вторичной трансверсальной циркуляцией [15, 16]. Первое звено обратной связи, связывающее вторичную циркуляцию с первичной, было очевидным в момент появления гипотезы вихревого динамо в 1983 г. — это воздействие силы Кориолиса на горизонтальную скорость. Каким образом происходит замыкание петли обратной связи, которая соединяет тангенциальную циркуляцию с трансверсальной, стало возможным обосновать только после открытия вихревой облачной конвекции в 2004 г.

Замыкание петли положительной обратной связи между первичной и вторичной циркуляцией в зарождающемся урагане осуществляют ВГБ.

В работах [8, 13] содержится подробное обсуждение того, как создаётся замыкающее звено обратной связи между циркуляциями. Этот процесс непосредственно связан с образованием и поддержанием отдельной ВГБ. Формирование единичной ВГБ было впервые представлено и обосновано авторами [23] в терминах поворота и растяжения вихревых нитей («vortex tilting and stretching»).

ВГБ возникают в результате взаимодействия облачной влажной конвекции и вертикального сдвига горизонтального ветра. Каждый восходящий конвективный поток генерирует вертикальную завихренность за

счет наклона горизонтальных вихревых нитей и усиливает ее за счет растяжения, тем самым связывая первичную и вторичную циркуляцию. Такой процесс создаёт зацепление (linkage) горизонтальных и вертикальных вихревых нитей и количественно характеризуется генерацией спиральности на локальном масштабе кучевой облачности. При формировании ТЦ происходит развитие целого семейства ВГБ различных размеров и интенсивности (рис. 2–3; рис. 4, а). Эти ВГБ можно представить как многочисленные динамические «скрепки», которые обеспечивают зацепление циркуляций на мезомасштабах и тем самым создают и поддерживают целостность вихревой системы на протяжении всего времени жизни ТЦ.

Особая топология ТЦ с зацеплением вихревых нитей на масштабах облачности и зацепленными циркуляциями на мезомасштабах может быть прослежена с помощью анализа локальных и интегральных спиральных характеристик поля скорости.

Таким образом, показано [8], что формирующийся ТЦ становится энергетически самоподдерживающимся и усиливающимся, когда складывается спиральная структура общесистемной циркуляции. Спиральная организация на мезомасштабах является результатом зацепления тангенциальной и трансверсальной циркуляции, которое осуществляется вращающимися конвективными структурами облачных масштабов — ВГБ.

В силу отмеченного выше, естественными «маркерами» зарождения и развития ТЦ являются ВГБ. В [13] на основе облачно-разрешающих данных численного моделирования [23] были определены типичные конфигурации ВГБ в поле вертикальной спиральности, позволяющие диагностировать появление крупномасштабной вихревой неустойчивости, т.е. зарождение ТЦ. На рис. 5 показаны картины поля вертикальной спиральности на уровне $z = 13$ км, которые соответствуют появлению крупномасштабной вихревой неустойчивости в момент времени $t = 12$ h и формированию вихря ТД при $t = 16$ h в численном эксперименте A2 [23]. ВГБ соответствует оранжевый, красный и темно-красный цвет.

4.2. О практическом применении для диагностики зарождения реальных ТЦ

С целью апробации диагностики, предложенной в работе [13], необходимо выполнить облачно-разрешающее численное моделирование реально наблюдавшегося ТЦ, для которого имеются подробные метеоданные в период, предшествующий объявлению о формировании ТД или тропического шторма. И далее провести согласованный анализ для диагностики зарождения ТЦ по двум наборам данных: численных и спутниковых. Например, полезным кандидатом для исследования мог бы стать атлантический ураган Isaias (2020). Метеоданные, которые потребуются для диагностики этого ТЦ, содержатся в архиве американского центра слежения за ураганами [39]. Данный случай вызывает особый интерес, поскольку в течение нескольких суток совместными усилиями стационарных метеослужб и исследовательских самолётов не удалось подтвердить формирование ТД, несмотря на то что в зоне возмущения регистрировались уже более сильные ветры, соответствующие следующей стадии интенсивности ТЦ — тропическому шторму. Согласно пробному анализу конфигураций ВГБ по спутниковым данным, проведенному автором и представленному в [13], зарождение ТЦ могло быть диагностировано на 15–18 ч раньше, чем это было сделано в действительности.

5. Заключение

В настоящей работе, посвященной изучению тропического циклогенеза, были применены фундаментальные идеи о самоорганизации в турбулентности с нарушенной зеркальной симметрией, так называемой «спиральной» турбулентности. В спиральной турбулентности возможен обратный каскад энергии от мелкомасштабных движений к крупным вихрям [17], обеспечивающий существование крупномасштабных

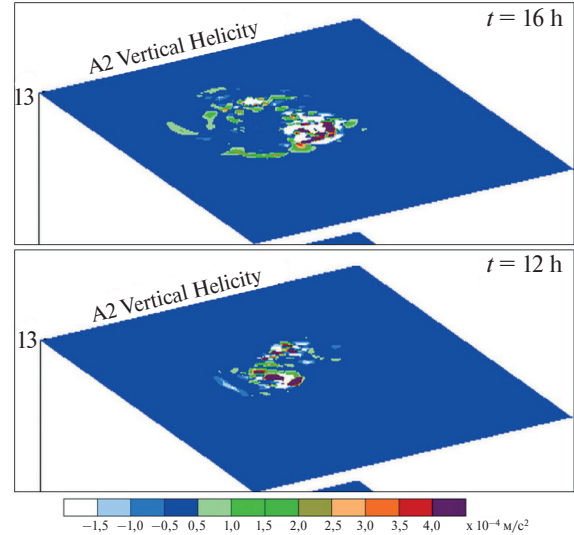


Рис. 5. Типичные конфигурации ВГБ в поле вертикальной спиральности на высоте 13 км: $t = 12$ h — появление неустойчивости; $t = 16$ h — формирование тропической депрессии. Показана горизонтальная плоскость 276×276 км расчетной области

Fig. 5. Typical VHTs patterns in the vertical helicity field at an altitude of 13 km: $t = 12$ h — the onset of instability; $t = 16$ h — the formation of tropical depression. The horizontal plane with a size of 276×276 km of the computational domain is shown

долгоживущих структур. Эти идеи лежат в основе теории турбулентного вихревого динамо. В теории обосновано существование порога возбуждения крупномасштабной вихревой неустойчивости [15, 16, 20]. Применительно к зарождению тропических циклонов это позволяет с помощью облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования точно диагностировать момент появления новой крупномасштабной вихревой неустойчивости и ответить на вопрос: «Когда начинается циклогенез?»

Как показал анализ проведенных атмосферных численных экспериментов по моделированию зарождения ТЦ [8–11, 13, 14], новая неустойчивость значительно, от нескольких часов до нескольких десятков часов, предшествует образованию вихря ТД. Ключевую роль в возбуждении неустойчивости играют особые конвективные когерентные структуры облачных масштабов — вихревые горячие башни (ВГБ). Были выявлены [13] типичные конфигурации ВГБ в поле вертикальной спиральности и в поле температуры, соответствующие формированию вторичной трансверсальной циркуляции, началу крупномасштабной вихревой неустойчивости и образованию вихря ТД.

Полученные результаты позволяют выполнить дистанционную и точную диагностику зарождения ТЦ в реальном времени с помощью анализа и сопоставления данных из двух независимых источников: облачно-разрешающего атмосферного численного моделирования (поле вертикальной спиральности) и спутниковых снимков облачности (поле температуры).

В перспективе возможности предложенного подхода необходимо изучить применительно к диагностике зарождения квазитропических ТЦ и полярных ураганов, т. е. в тех случаях, когда появляется вихревая облачная конвекция. Первые результаты по обнаружению ВГБ в черноморском квазитропическом циклоне 2005 г. были получены с помощью численного моделирования в работе [40].

6. Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания № 01.20.0.2.00164 (тема «Мониторинг»). Пост-обработка данных облачно-разрешающего численного моделирования, использованных и обсуждаемых в настоящей работе, осуществлялась при частичной поддержке Национального научного фонда США по гранту АТМ-0733380.

Литература

1. *Beven II J.L.* Tropical Cyclone Report: Hurricane Pablo. Miami, Florida: National Hurricane Center. 27 January 2020. URL: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182019_Pablo.pdf (дата обращения: 24.04.2022).
2. *Emanuel K.* 100 years of progress in tropical cyclone research // *Meteorological Monographs*. 2018. Vol. 59, N 1. P. 15.1–15.68.
3. Met Office. Miscellaneous Images. Black Sea Vortices. URL: <https://web.archive.org/web/20070109143418/http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/tcimages/Misc/blacksea1.gif> (дата обращения: 24.04.2022).
4. Met Office. Miscellaneous Images. Black Sea Vortices. URL: <https://web.archive.org/web/20070109143556/http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/tcimages/Misc/blacksea2.gif> (дата обращения: 24.04.2022).
5. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 6. С. 723–733.
6. *Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 4. С. 53–62.
7. Gismeteo. Новости. 16 августа. URL: https://www.gismeteo.ru/news/weather/poltonny-vody-na-kvadratnyj-metr-v-temrjuke-vypala-godovaya-norma-osadkov/?utm_source=gismeteo&utm_medium=rss_feed&utm_campaign=news (дата обращения: 24.04.2022).
8. *Levina G.V.* On the path from the turbulent vortex dynamo theory to diagnosis of tropical cyclogenesis // *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2018. Vol. 8, N 1 P. 86–114. doi:10.4236/ojfd.2018.81008
9. *Левина Г.В., Монтгомери М.Т.* О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза // *Доклады АН*. 2010. Т. 434, № 3. С. 401–406.
10. *Левина Г.В., Монтгомери М.Т.* Численная диагностика тропического циклогенеза на основе гипотезы о спиральной самоорганизации влажно-конвективной атмосферной турбулентности // *Доклады АН*. 2014. Т. 458, № 2. С. 214–219.
11. *Levina G.V., Montgomery M.T.* When will cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? // *Procedia IUTAM*. 2015. Vol. 17. P. 59–68.
12. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022; NHC Aircraft Reconnaissance. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/recon.php> (дата обращения: 24.04.2022).

Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов
Application of the turbulent vortex dynamo theory for early diagnostics of the tropical cyclone genesis

13. *Levina G.V.* Birth of a hurricane: early detection of large-scale vortex instability // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1640. 012023. doi:10.1088/1742-6596/1640/1/012023
14. *Levina G.V.* How does cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? // *Environmental Science Proceedings*. 2021. Vol. 8, N 1:20. doi:10.3390/ecas2021-10320
15. *Мoiseев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Яновский В.В.* Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности // *ЖЭТФ*. 1983. Т. 85, Вып. 6(12). С. 1979–1987.
16. *Мoiseев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М.* Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // *Доклады АН СССР*. 1983. Т. 273, № 3. С. 549–553.
17. *Фриш У.* Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова / Пер. с англ. М: Фазис, 1998. 346 с.
18. *Steenbeck M., Krause F., Rädler K.-H.* A calculation of the mean electromotive force in an electrically conducting fluid in turbulent motion, under the influence of Coriolis forces // *Zeitschrift für Naturforschung*. 1966. Vol. 21A. P. 369–376.
19. *Frisch U., She Z.S., Sulem P.L.* Large-scale flow driven by the anisotropic kinetic alpha effect // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1987. Vol. 28. P. 382–392.
20. *Руткевич П.Б.* Уравнение вихревой неустойчивости, вызванной конвективной турбулентностью и силой Кориолиса // *ЖЭТФ*. 1993. Т. 104. С. 4010–4020.
21. *Hendricks E.A., Montgomery M.T., Davis C.A.* The role of “vortical” hot towers in the formation of tropical cyclone Diana (1984) // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2004. Vol. 61. P. 1209–1232.
22. *Reasor P.D., Montgomery M.T., Bosart L.F.* Mesoscale observations of the genesis of Hurricane Dolly (1996) // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2005. Vol. 62, N 9. P. 3151–3171. doi:10.1175/JAS3540.1
23. *Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B.* A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2006. Vol. 63. P. 355–386. doi:10.1175/JAS3604.1
24. Wikipedia 2021 The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_tower (дата обращения: 24.04.2022).
25. *Riehl H., Malkus J.S.* On the heat balance in the equatorial trough zone // *Geophysica*. 1958. Vol. 6. P. 503–538.
26. *Houze R.A. Jr., Lee W.C., Bell M.M.* Convective contribution to the genesis of Hurricane Ophelia (2005) // *Monthly Weather Review*. 2009. Vol. 137. P. 2778–2800. doi:10.1175/2009MWR2727.1
27. *Dunkerton T.J., Montgomery M.T., Wang Z.* Tropical cyclogenesis in a tropical wave critical layer: easterly waves // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. P. 5587–5646.
28. *Molinari J., Vollaro D.* Distribution of helicity, CAPE, and shear in tropical cyclones // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. P. 274–284. doi:10.1175/2009JAS3090.1
29. *Houze R.A. Jr.* Clouds in tropical cyclones // *Monthly Weather Review*. 2010. Vol. 138. P. 293–344. doi:10.1175/2009MWR2989.1
30. *Montgomery M.T.* et al. The pre-depression investigation of cloud systems in the tropics (PREDICT) experiment: scientific basis, new analysis tools, and some first results // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93. P. 153–172. doi:10.1175/BAMS-D-11-00046.1
31. *Moffatt H.-K.* The degree of knottedness of tangled vortex lines // *Journal of Fluid Mechanics*. 1969. Vol. 35. P. 117–129.
32. *Moffatt H.-K.* Helicity and singular structures in fluid dynamics // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111, N 10. P. 3663–3670. doi:10.1073/pnas.1400277111
33. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2021&basin=atl> (дата обращения: 24.04.2022).
34. *Rotunno R.* On the evolution of thunderstorm rotation // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109. P. 577–586. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0577: OTEOTR>2.0.CO;2
35. *Левина Г.В.* О параметризации спиральной турбулентности для численных моделей интенсивных атмосферных вихрей // *Доклады АН*. 2006. Т. 411, № 3. С. 400–404.
36. *Levina G.V., Burylov I.A.* Numerical simulation of helical-vortex effects in Rayleigh-Bénard convection // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006. Vol. 13. P. 205–222. doi:10.5194/npg-13-205-2006
37. *Emanuel K.* Tropical cyclones // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003. Vol. 31. P. 75–104. doi:10.1146/annurev.earth.31.100901.141259
38. *Montgomery M.T., Smith R.K.* Paradigms for tropical cyclone intensification // *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*. 2014. Vol. 64. P. 37–66. doi:10.22499/2.6401.005
39. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2020&basin=atl> (дата обращения: 24.04.2022).
40. *Яровая Д.А., Левина Г.В.* Исследование вихревой конвекции квазитропического циклона над Черным морем на основе облачно-разрешающего численного моделирования // Тезисы Всероссийской конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», 26–28 ноября 2019 года. Москва. М: Физматкнига, 2019. 132 с.

References

1. Beven II J.L. Tropical Cyclone Report: Hurricane Pablo. *Miami, Florida: National Hurricane Center*. 27 January 2020. URL: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL182019_Pablo.pdf (Date of access: 24.04.2022).
2. Emanuel K. 100 years of progress in tropical cyclone research. *Meteorological Monographs*. 2018, 59, 1, 15.1–15.68.
3. Met Office. Miscellaneous Images. Black Sea Vortices. <https://web.archive.org/web/20070109143418/http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/tcimages/Misc/blacksea1.gif> (date of access: 24.04.2022).
4. Met Office. Miscellaneous Images. Black Sea Vortices. <https://web.archive.org/web/20070109143556/http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/tcimages/Misc/blacksea2.gif> (date of access: 24.04.2022).
5. Efimov V.V., Shokurov M.V., Yarovaya D.A. Numerical simulation of a quasi-tropical cyclone over the Black Sea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2007, 43, 6, 667–686. doi:10.1134/S0001433807060011
6. Efimov V.V., Stanichnyi S.V., Shokurov M.V., Yarovaya D.A. Observation of a quasi-tropical cyclone over the Black Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2008, 33, 4, 233–239. doi:10.3103/S1068373908040067
7. Gismeteo. News. 16 August. URL: https://www.gismeteo.ru/news/weather/poltonny-vody-na-kvadratnyj-metr-v-temrjke-vypala-godovaya-norma-osadkov/?utm_source=gismeteo&utm_medium=rss_feed&utm_campaign=news (date of access: 24.04.2022).
8. Levina G.V. On the path from the turbulent vortex dynamo theory to diagnosis of tropical cyclogenesis. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2018, 8, 86–114. doi:10.4236/ojfd.2018.81008
9. Levina G.V., Montgomery M.T. A first examination of the helical nature of tropical cyclogenesis. *Doklady Earth Sciences*. 2010, 434, 1, 1285–1289.
10. Levina G.V., Montgomery M.T. Numerical diagnosis of tropical cyclogenesis based on a hypothesis of helical self-organization of moist convective atmospheric turbulence. *Doklady Earth Sciences*. 2014, 458, 1, 1143–1148.
11. Levina G.V., Montgomery M.T. When will cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? *Procedia IUTAM*. 2015, 17, 59–68.
12. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022; NHC Aircraft Reconnaissance. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/recon.php> (date of access: 24.04.2022).
13. Levina G.V. Birth of a hurricane: early detection of large-scale vortex instability. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, 1640, 012023. doi:10.1088/1742-6596/1640/1/012023
14. Levina G.V. How does cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? *Environmental Science Proceedings*. 2021, 8, 1:20. doi:10.3390/ecas2021-10320
15. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Khomenko G.A., Yanovsky V.V. Theory of the origin of large-scale structures in hydrodynamic turbulence. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1983, 58, 1149–1157.
16. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Khomenko G.A., Shukurov A.M. Physical mechanism of amplification of vortex disturbances in the atmosphere. *Soviet Physics Doklady*. 1983, 28, 925–928.
17. Frisch U. Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 296 p.
18. Steenbeck M., Krause F., Rädler K.-H. A calculation of the mean electromotive force in an electrically conducting fluid in turbulent motion, under the influence of Coriolis forces. *Zeitschrift für Naturforschung*. 1966, 21A, 369–376.
19. Frisch U., She Z.S., Sulem P.L. Large-scale flow driven by the anisotropic kinetic alpha effect. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1987, 28, 382–392.
20. Rutkevich P.B. Equation for the rotational instability due to convective turbulence and the Coriolis force. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1993, 77, 933–938.
21. Hendricks E.A., Montgomery M.T., Davis C.A. The role of “vortical” hot towers in the formation of tropical cyclone Diana (1984). *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2004, 61, 1209–1232.
22. Reasor P.D., Montgomery M.T., Bosart L.F. Mesoscale observations of the genesis of Hurricane Dolly (1996). *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2005, 62, 3151–3171. doi:10.1175/JAS3540.1
23. Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B. A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2006, 63, 355–386. doi:10.1175/JAS3604.1
24. Wikipedia 2021 The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_tower (date of access: 24.04.2022).
25. Riehl H., Malkus J.S. On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica*. 1958, 6, 503–538.
26. Houze R.A. Jr., Lee W.C., Bell M.M. Convective contribution to the genesis of Hurricane Ophelia (2005). *Monthly Weather Review*. 2009, 137, 2778–2800. doi:10.1175/2009MWR2727.1
27. Dunkerton T.J., Montgomery M.T., Wang Z. Tropical cyclogenesis in a tropical wave critical layer: easterly waves. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009, 9, 5587–5646.
28. Molinari J., Vollaro D. Distribution of helicity, CAPE, and shear in tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010, 67, 274–284. doi:10.1175/2009JAS3090.1

Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов
Application of the turbulent vortex dynamo theory for early diagnostics of the tropical cyclone genesis

29. Houze R.A. Jr. Clouds in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*. 2010, 138, 293–344. doi:10.1175/2009MWR2989.1
30. Montgomery M.T. et al. The pre-depression investigation of cloud systems in the tropics (PREDICT) experiment: scientific basis, new analysis tools, and some first results. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012, 93, 153–172. doi:10.1175/BAMS-D-11-00046.1
31. Moffatt H.-K. The degree of knottedness of tangled vortex lines. *Journal of Fluid Mechanics*. 1969, 35, 117–129.
32. Moffatt H.-K. Helicity and singular structures in fluid dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA*. 2014, 111, 3663–3670. doi:10.1073/pnas.1400277111
33. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2021&basin=atl> (date of access: 24.04.2022).
34. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation. *Monthly Weather Review*. 1981, 109, 577–586. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2
35. Levina G.V. Parameterization of helical turbulence in numerical models of intense atmospheric vortices. *Doklady Earth Sciences*. 2006, 411A, 1417–1421.
36. Levina G.V., Burylov I.A. Numerical simulation of helical-vortex effects in Rayleigh-Bénard convection. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006, 13, 205–222. doi:10.5194/npg-13-205-2006
37. Emanuel K. Tropical cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003, 31, 75–104. doi:10.1146/annurev.earth.31.100901.141259
38. Montgomery M.T., Smith R.K. Paradigms for tropical cyclone intensification. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*. 2014, 64, 37–66. doi:10.22499/2.6401.005
39. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center NOAA 2022. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2020&basin=atl> (date of access: 24.04.2022).
40. Yarovaya D.A., Levina G.V. Study of vortical convection of the quasi-tropical cyclone over the Black Sea by cloud-resolving numerical modeling. *Abstracts of All-Russian conference: "Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and management"*. November 26–28, Moscow, Russia. *Moscow, Fizmatkniga*, 2019. 132 p. (in Russian).