

## Облачно-разрешающий численный анализ процесса генерации спиральности в условиях тропического циклогенеза

Г.В. Левина, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: levina@iki.rssi.ru*

Проведен численный анализ процесса генерации спиральности в тропической атмосфере Земли. Исследование выполнено обработкой (post-processing) американских данных облачно-разрешающего численного моделирования тропических циклонов, полученных с помощью региональной модели атмосферы RAMS — Regional Atmospheric Modeling System (Montgomery et al., 2006). Обсуждается механизм, генерирующий вертикальную завихренность и спиральность в тропической атмосфере при взаимодействии облачной конвекции и вертикального сдвига горизонтальной скорости. В связи с тем, что во всех известных примерах крупномасштабных неустойчивостей, обнаруженных в спиральных турбулентных средах, существуют пороги возбуждения, зависящие от величины спиральности, в данной работе пристальное внимание уделено влиянию начальных условий на генерацию спиральности в первые часы экспериментов. Рассчитаны спиральные характеристики течений и проведено их сравнение для двух численных экспериментов, в одном из которых задавалось начальное слабое крупномасштабное вихревое возмущение в средней тропосфере, а в другом оно отсутствовало. Обсуждается влияние локального подогрева на нижних уровнях тропосферы, который применялся в начальные 300 с экспериментов для ускоренного развития облачной конвекции, на генерацию спиральности. Рассмотрен процесс генерации за счет локального подогрева единичной интенсивной спиральной облачной структуры — вихревой горячей башни (ВГБ), которая достигала максимальной интенсивности в течение первых 1–2 ч. Выполнен количественный анализ генерации спиральности единичной ВГБ для двух разных сценариев.

**Ключевые слова:** тропический циклогенез, влажно-конвективная атмосферная турбулентность, сдвиговое течение, генерация спиральности, облачно-разрешающий численный анализ

*Одобрена к печати: 21.06.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-213-222*

### Введение

Тропические циклоны (ТЦ) — интенсивные крупномасштабные атмосферные вихри, достигающие размеров от нескольких сотен до одной тысячи километров и более — обычно зарождаются над водной поверхностью, примерно между 7–10° с. ш. или 5–15° ю. ш., в местах мощных облачных скоплений («кластеров»), свидетельствующих об интенсивной атмосферной конвекции и характеризующихся слабой циклонической завихренностью (Риль, 1984). В целом ряде исследований (Hendricks, Montgomery, Davis, 2004; Kilroy, Smith, Montgomery, 2016; Montgomery et al., 2006) стадия тропического циклогенеза трактуется как возникающее при некоторых условиях слияние отдельных конвективных образований, обладающих более высокими по сравнению с общим фоном значениями циклонической завихренности. Взаимодействие таких конвективных структур, названных вихревыми горячими башнями — ВГБ ((Hendricks, Montgomery, Davis, 2004) — численное моделирование; (Reasor, Montgomery, Bosart, 2005) — натурные наблюдения) и имеющих горизонтальный масштаб 10–30 км, с каким-либо спонтанно возникшим крупномасштабным вихревым возмущением усиливает последнее и в конечном итоге может привести к формированию мезомасштабного интенсивного вихря — тропической депрессии (ТД). Стадия ТД представляет собой начальную стадию эволюции тропического циклона, когда скорость приповерхностного тангенциального ветра не превышает 17 м/с. В науке об ураганах хорошо известно, что не всякое тропическое возмущение или тропическая депрессия

развиваются в вихрь ураганной силы. Это может означать существование порогов генерации вихревой неустойчивости, соответствующих как тропическому циклогенезу, так и различным стадиям эволюции усиливающегося ТЦ. Поэтому среди факторов, влияющих на формирование ТЦ, особый интерес представляют те из них, которые способны генерировать неустойчивость пороговым образом.

Механизм турбулентного вихревого динамо (Моисеев и др., 1983а, 1983б, 1988), предложенный учеными ИКИ РАН, может оказаться именно таким «пороговым» фактором. Этот механизм основан на особых свойствах мелкомасштабной спиральной турбулентности, которая при определенных условиях способна усиливать и поддерживать крупномасштабные вихревые возмущения путем переноса энергии из мелких масштабов в крупные. В теоретическом подходе, предложенном и развиваемом авторами этого направления, турбулентность задается на этапе исходной постановки задачи введением мелкомасштабной внешней силы в уравнения движения. В первых работах этого направления, например (Моисеев и др., 1983а, 1988), в самой постановке задачи задавалась и спиральность мелкомасштабной турбулентности — внешняя сила была спиральной. Позже, рассматривая находящуюся в поле силы тяжести неравномерно нагретую вращающуюся жидкость, авторы (Руткевич, 1993; Tur, Chabane, Yanovsky, 2013) смогли построить математическую модель, описывающую вихревую крупномасштабную неустойчивость и в случае неспиральной внешней силы, создающей мелкомасштабную турбулентность. Тем самым было теоретически показано, что концепция спиральности турбулентности параметризует совместное действие сил плавучести и Кориолиса. Этот результат хорошо согласуется с ранее обсуждавшимися возможностями генерации спиральности, например, применительно к атмосфере (Моисеев и др., 1983б; Моффат, 1980; Ниде, 1976). Однако, чтобы проследить обсуждаемый процесс генерации спиральности в реальных условиях, необходимо прямое численное моделирование (известное в специальной англоязычной литературе как Direct Numerical Simulation — DNS) атмосферной турбулентности, разрешающее масштабы кучевой облачности.

До недавнего времени ни в одной из стран мира не существовало вычислительных ресурсов и моделей атмосферы соответствующего уровня, которые позволили бы провести прямое численное моделирование конвективной атмосферной турбулентности, чтобы применить гипотезу турбулентного вихревого динамо для объяснения феномена ТЦ. Решение подобной задачи требует рассмотрения пространственной области с горизонтальными размерами порядка  $1500 \times 1500$  км и высотой до 15–20 км — с одной стороны, и разрешения масштабов кучевой облачности 2–5 км по горизонтали — с другой. Лишь в 2000-х гг. начали появляться публикации (Davis, Bosart, 2002; Hendricks, Montgomery, Davis, 2004; Montgomery et al., 2006), в которых применялся уровень моделирования, необходимый для постановки задачи о поиске спирально-вихревой неустойчивости в условиях зарождения ТЦ. Примечательно, что во всех вышеупомянутых работах обсуждается сценарий образования ТЦ, аналогичный тому, что был предложен в статье (Моисеев и др., 1983б) на основе гипотезы о турбулентном вихревом динамо. Согласно динамо-сценарию при развитии крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости должно происходить последовательное

укрупнение масштаба вихревых структур от размеров кучевого облака в результате их слияния, сопровождающегося также и увеличением интенсивности движения.

Поиск крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости с использованием атмосферных данных облачно-разрешающего моделирования был начат в работе (Левина, Монтгомери, 2010). В указанной работе, ставшей первой публикацией из серии совместных российско-американских исследований 2010–2015 гг., обсуждается вся специфика предпринятых исследований, включая необходимые ссылки на описание используемых численных моделей и подходов, и проведенных исследований, обеспечивающих достоверность полученных результатов. Здесь лишь снова отметим, что наш подход в настоящей работе, как и во всех предыдущих, не предполагает проведения новых численных экспериментов с моделью атмосферы, т. е. в наших работах не решаются системы эволюционных дифференциальных уравнений гидротермодинамики атмосферы, а выполняется только обработка (post-processing) уже имеющихся гидротермодинамических атмосферных полей. С этой целью были выбраны американские данные численного изучения ТЦ (Montgomery et al., 2006), проведенного с помощью региональной модели атмосферы RAMS — Regional Atmospheric Modeling System (версия 4.29). Были рассчитаны энергетические и спиральные характеристики поля скорости для нескольких сценариев развития ТЦ, приведших к формированию вихрей разной интенсивности — от тропической депрессии до урагана второй категории. Отметим, что сразу же на начальном этапе наших исследований было проведено необходимое и общепринятое в таких случаях сравнение результатов численных расчетов спиральности с имеющимися оценками этой величины, полученными для реальных атмосферных данных. Соответствующий фрагмент исследований подробно описан в работе (Levina, 2013), а сравнение рассчитанных значений спиральности с оценками авторов (Molinari, Vollaro, 2008) на основе данных натурных экспериментов по наблюдению за тропическими циклонами показало хорошее совпадение. Проведенный авторами (Левина, Монтгомери, 2010) анализ спиральных характеристик обнаружил генерацию ненулевой спиральности, интегральной по объему вихревой системы и нарастающей по мере усиления атмосферного вихря. Таким образом, впервые была доказана возможность существования природной гидродинамической системы с ненулевой спиральностью. Согласно теории турбулентности (см., например, (Фриш, 1998)), в спиральной турбулентности возможно возникновение крупномасштабной вихревой неустойчивости, которая генерируется при превышении некоторого порога, зависящего от значения спиральности.

В связи с этим особое значение приобретает исследование процесса генерации спиральности в тропической атмосфере в условиях формирования ТЦ, в том числе с целью поиска порога крупномасштабной неустойчивости.

В настоящей работе рассматриваются спиральные характеристики течения в численных экспериментах (Montgomery et al., 2006) в первые часы эволюции ТЦ, когда процесс генерации спиральности решающим образом зависит от начальных условий. Специальное внимание уделяется роли начального локального подогрева на нижних уровнях тропосферы, примененного в первые 300 с для ускоренного развития облачной конвекции. В результате,

в первые 1–2 ч развивается единичная ВГБ (пример такой ВГБ и полей вертикальной скорости, а также вертикальной завихренности в ней показан на рис. 9 в статье (Montgomery et al., 2006)), что позволяет провести количественную оценку генерации спиральности одной отдельно взятой вращающейся облачной структурой. Обсуждается механизм, генерирующий спиральность в тропической атмосфере при взаимодействии вихревой облачной конвекции и вертикального сдвига горизонтальной скорости, и количественные вклады указанных процессов в полную спиральность вихревой системы.

### Механизм генерации и усиления вертикальной завихренности

В работе (Montgomery et al., 2006) был предложен и обоснован механизм генерации и усиления относительной вертикальной завихренности, который реализуется облачной конвекцией в условиях фоновой завихренности, создаваемой начальным мезомасштабным конвективным вихрем (МКВ).

С целью воспроизведения условий, обычно наблюдающихся в атмосфере при зарождении ТЦ, в численных экспериментах (Montgomery et al., 2006) задавался начальный слабый циклонический МКВ в средней тропосфере с максимумом тангенциального ветра  $6,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $z = 4 \text{ км}$  (рис. 1а). В заданном вихре создается циклоническое тангенциальное поле скорости, нарастающее с высотой ниже уровня  $z = 4 \text{ км}$  и убывающее вверх от него. Если не учитывать эффекты плавучести, то можно рассматривать профиль горизонтальной завихренности в начальный момент времени как создаваемый исключительно вертикальным сдвигом горизонтального ветра в МКВ. Такой профиль вертикального сдвига будет генерировать профиль радиальной завихренности, который при деформации вверх восходящим потоком — updraft (рис. 1б) создаст отрицательные (положительные) аномалии относительной вертикальной завихренности на внутренней по радиусу стороне потока ниже (выше)  $z = 4 \text{ км}$ .

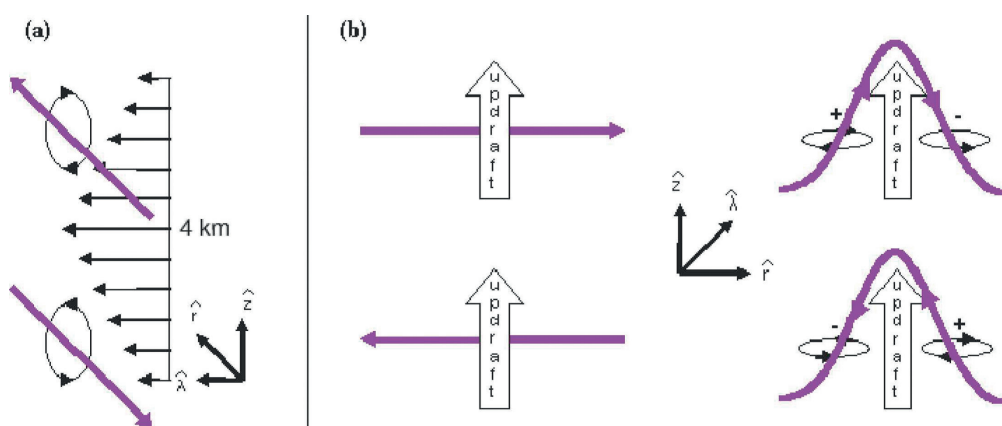


Рис. 1. Генерация вертикальной завихренности внутри МКВ. Лиловыми линиями показаны вихревые нити. Радиальная завихренность, генерируемая профилем вертикального сдвига скорости в начальном МКВ (а). Восходящий поток деформирует радиальную вихревую нить, поднимая её вверх и генерируя вихревой диполь с отрицательной и положительной относительной завихренностью (б) (Montgomery et al., 2006)

В процессе эволюции зарождающегося тропического циклона развивающаяся конвекция осуществляет рассмотренное выше преобразование горизонтальной завихренности в вертикальную и растягивает имеющуюся вертикальную завихренность, усиливая ее. Авторами (Montgomery et al., 2006) спиральные свойства течений не исследовались.

### Генерация спиральности

Рассмотрим, как представленный выше механизм может быть интерпретирован в качестве эффективного способа генерации спиральности.

Спиральностью поля скорости называется величина, определяемая как скалярное произведение векторов скорости  $\vec{V}(\vec{r}, t)$  и завихренности  $\text{rot}\vec{V}(\vec{r}, t)$  (Moffatt, 2014). Объемный интеграл, рассчитанный в заданной области пространства, определяет спиральность рассматриваемой вихревой системы:

$$H = \int \vec{V} \cdot \text{rot}\vec{V} d\vec{r},$$

где  $\vec{V} \cdot \text{rot}\vec{V}$  — плотность спиральности. Обе величины являются псевдоскалярами и меняют свой знак при переходе от правой системы координат к левой или наоборот. Ненулевая средняя спиральность,  $\langle H \rangle \neq 0$ , означает нарушение симметрии турбулентности относительно отражений системы координат. Спиральность описывает структуру вихревых полей и является топологическим инвариантом. Это мера зацепленности вихревых линий (Moffatt, 2014). Как и энергия, средняя спиральность является квадратичным инвариантом в баротропной жидкости. Однако в отличие от энергии спиральность — знакопеременная величина. Знак спиральности определяет преобладание право- или левовинтовых движений в рассматриваемой области. Так, например, в правой системе координат положительной спиральностью обладают восходящие потоки циклонической закрутки и нисходящие антициклонические движения. Соответственно, восходящие антициклонические и нисходящие циклонические течения характеризуются отрицательной спиральностью. Применительно к изучению тропических циклонов спиральность и спиральная турбулентность обсуждаются в работах (Левина, Монтгомери, 2010; Levina, 2013; Levina, Montgomery, 2011).

В целях данного исследования выберем спиральные характеристики поля скорости, предложенные для изучения ТЦ в статье (Levina, 2013), и будем анализировать пространственные вклады средней спиральности  $\langle H \rangle$  по горизонтальным направлениям и вертикали, осредненные по числу узлов расчетной сетки:  $\langle H_{hor} \rangle$  и  $\langle H_{ver} \rangle$ . При этом  $\langle H_{hor} \rangle$  определяется как сумма вкладов спиральности по обоим горизонтальным направлениям. Далее будут использоваться термины горизонтальная и вертикальная спиральность для  $\langle H_{hor} \rangle$  и  $\langle H_{ver} \rangle$  соответственно. Как отмечалось ранее (Levina, 2013), ненулевая горизонтальная спиральность генерируется при изменении горизонтальной скорости с высотой и поэтому может сигнализировать о существовании или появлении сдвигового течения. В случае отличия



от нуля вертикальной спиральности, которая определяется скалярным произведением вертикальной скорости на вертикальную завихренность, получаем превосходный индикатор для обнаружения вихревой конвекции.

Рассмотрим, как в тропической атмосфере происходит генерация спиральности (см. табл. 1), выбрав два численных эксперимента из работы (Montgomery et al., 2006): A2 и C1, выполненных с одинаковым пространственным разрешением 500 м по вертикали и 3 км по горизонтальным направлениям, но различающихся начальными условиями. В A2 задавалось начальное вихревое возмущение — МКВ, а в C1 оно отсутствовало. Обработка данных, полученных с помощью региональной модели атмосферы в исследовании (Montgomery et al., 2006), выполнялась в данной работе с шагом по времени 10 мин. Изучаемые спиральные характеристики поля скорости были рассчитаны в области  $276 \times 276 \times 20$  км.

Таблица 1. Генерация спиральности в тропической атмосфере при взаимодействии вихревой конвекции и горизонтального сдвига вертикального ветра

	<i>Время (мин)</i>							
	30	70	300	540	30	150	300	540
	<i>Эксперимент A2</i>				<i>Эксперимент C1</i>			
Горизонтальная спиральность $\langle H_{hor} \rangle$ , $M^4 \cdot c^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$2,5 \cdot 10^{11}$	$0,6 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$0,05 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^9$	$180 \cdot 10^9$	0,0
Вертикальная спиральность $\langle H_{ver} \rangle$ , $M^4 \cdot c^{-2}$	$0,2 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	$0,2 \cdot 10^9$	$4,5 \cdot 10^9$	0,0	$1,0 \cdot 10^9$	0,0	0,0

Отметим одну особенность реализации численных экспериментов (Montgomery et al., 2006), способствующую генерации спиральности: в большинстве случаев, включая A2 и C1, в начальный момент времени с целью ускоренного развития конвекции создавался в течение 300 с локальный подогрев на нижних уровнях ( $z=2$  км) на расстоянии 50 км к востоку от центра области. Возникающий в результате этого восходящий теплый поток генерировал локальную адвективную циркуляцию с притоком к нему жидкости на нижних уровнях и оттоком вверх. Таким образом, на начальном этапе в эксперименте A2 вертикальный сдвиг горизонтальной скорости создавался МКВ (рис. 1a) и адвективной циркуляцией, тогда как в C1 только за счет второго фактора.

Генерация ненулевой спиральности начинается в первые минуты обоих экспериментов, однако в силу начальной хаотичности течения в нем присутствуют спиральные движения разной закрутки, и значения средней спиральности оказываются равными нулю. В ходе дальнейшей эволюции течения происходит его упорядочивание в сторону преобладания циклонических движений (характеризующихся положительной спиральностью в выбранной нами для рассмотрения правой системе координат) под действием как планетарного вращения (A2 и C1), так и заданного циклонического МКВ (A2). При этом

наблюдается интенсивная генерация средней положительной спиральности, значения которой показаны (см. *табл. 1*), начиная с момента времени 30 мин. В А2, где присутствует начальный МКВ и создается всплывающий теплый термик с помощью локального подогрева, с самого начала реализуется генерация спиральности как под действием вращения Земли, так и за счет описанного выше механизма. Поэтому значительны оба вклада спиральности. Эксперимент С1 начинается с создания теплого термика, всплытие которого инициирует горизонтальные движения, и лишь после этого реализуется сценарий генерации спиральности, аналогичный А2. Как показывают численные результаты данной работы, при зарождении ТЦ характерные значения средних (в рассматриваемой области пространства) горизонтальных скоростей составляют метры в секунду, тогда как вертикальных — сантиметры. Различие на два порядка величины наблюдается и для значений горизонтальной и вертикальной спиральности. Следующими (см. *табл. 1*) показаны моменты времени, когда формирующаяся ВГБ достигает максимальной интенсивности в А2 (через 70 мин) и С1 (через 150 мин). Отметим, что локальные вертикальная скорость и относительная вертикальная завихренность в ВГБ в эти моменты составляют  $33 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  в эксперименте А2, а в эксперименте С1 —  $24 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  соответственно, что согласуется с регистрируемыми значениями этих характеристик в реальной атмосфере. Здесь полезно напомнить для сравнения скорость вращения Земли —  $0,75 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Далее ВГБ, сгенерированная начальным локальным подогревом, разрушается, и ко времени 300 мин в А2 появляются несколько мелких, постепенно усиливающихся восходящих потоков, тогда как развитие конвекции в С1 полностью прекращается после затухания начальной ВГБ. В результате в А2 спиральность после некоторого уменьшения (см. *табл. 1*) снова начинает нарастать, а в С1 обращается в нуль.

В эксперименте А2 на протяжении 72 ч наблюдалось формирование вихря ураганной интенсивности, сопровождавшееся последовательным увеличением средней спиральности. В С1 после девяти часов эксперимента конвективные движения полностью прекратились и образования тропического циклона не произошло.

## Выводы

Проведенное численное исследование показало, как осуществляется генерация спиральности поля скорости в атмосфере в условиях зарождения тропических циклонов. Был выполнен расчет спиральных характеристик и проведено сравнение результатов для двух облачно-разрешающих экспериментов (Montgomery et al., 2006) по моделированию тропического циклогенеза, различающихся начальными условиями: а) с заданным начальным вихревым возмущением, б) при его отсутствии. Важной особенностью обоих численных экспериментов являлся кратковременный, в течение 300 с, начальный локальный подогрев на нижних уровнях с целью ускоренного развития облачной конвекции. При такой постановке задачи удалось проследить в обоих экспериментах формирование единичной

спиральной конвективной структуры — вихревой горячей башни с горизонтальными размерами 10–15 км и высотой 13–15 км, образующейся и достигающей максимальной активности в первые 1–2 ч численного эксперимента. Наблюдавшаяся при этом скорость восходящего потока была порядка  $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а вертикальная завихренность в 2–3 раза превышала фоновое планетарное вращение.

Показано, что предложенный авторами (Montgomery et al., 2006) механизм генерации и усиления вертикальной завихренности, основанный на взаимодействии конвекции и вертикального сдвига горизонтальной скорости, также является эффективным средством генерации спиральности. Проведено количественное сравнение результатов для двух вышеуказанных сценариев. Результаты эксперимента, выполненного без начального вихревого возмущения, интересны еще и тем, что наглядно продемонстрировали генерацию спиральности в результате взаимодействия одиночной ВГБ с создаваемой ей самой локальной адвективной циркуляцией, которая включает приток жидкости к ВГБ на нижних уровнях и отток в верхних слоях тропосферы и характеризуется вертикальным сдвигом горизонтальной скорости. Такая одиночная ВГБ генерировала спиральность  $\langle H \rangle = 4,5 \cdot 10^9 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-2}$  и вертикальный вклад спиральности  $\langle H_{\text{ver}} \rangle = 1,0 \cdot 10^9 \text{ м}^4 \cdot \text{с}^{-2}$ .

Эксперимент с начальным вихревым возмущением продемонстрировал все этапы развития ТЦ (Levina, 2013; Montgomery et al., 2006) от тропической депрессии (скорость приповерхностного тангенциального ветра  $<17 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) до урагана второй категории интенсивности (скорость ветра  $>43 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ). В эксперименте без начального вихря образования ТЦ не произошло. В работе (Levina, 2013) было высказано предположение, что уровень спиральности, генерируемый за счет начальных условий, может оказывать влияние на дальнейшую эволюцию зарождающегося тропического циклона. Настоящим исследованием начаты работы в этом направлении.

Авторы благодарны М.Т. Монтгомери за предоставление атмосферных данных и полезное обсуждение. Выражаем также признательность двум анонимным рецензентам за внимательное и требовательное изучение материала, приведшее к содержательным дискуссиям. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00551-а).

## Литература

1. Левина Г.В., Монтгомери М.Т. О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза // Доклады АН. 2010. Т. 434. № 3. С. 401–406.
2. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Яновский В.В. (1983а) Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. Вып. 6(12). С. 1979–1987.
3. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М. (1983б) Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273. № 3. С. 549–553.
4. Моисеев С.С., Руткевич П.Б., Тур А.В., Яновский В.В. Вихревое динамо в конвективной среде со спиральной турбулентностью // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. Вып. 2. С. 144–153.
5. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 340 с.
6. Риль Г. Климат и погода в тропиках: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 605 с.
7. Руткевич П.Б. Уравнение вихревой неустойчивости, вызванной конвективной турбулентностью и силой Кориолиса // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. Вып. 6(12). С. 4010–4020.
8. Фриш У. Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова: Пер. с англ. М.: Фазис, 1998. 346 с.



9. Davis C.A., Bosart L.F. Numerical simulation of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part II: Sensitivity of track and intensity prediction // *Mon. Wea. Rev.* 2002. Vol. 130. P. 1100–1124.
10. Hendricks E.A., Montgomery M.T., Davis C.A. The role of “vortical” hot towers in the formation of tropical cyclone Diana (1984) // *J. Atmos. Sci.* 2004. Vol. 61. P. 1209–1232.
11. Hide R. A note on helicity // *Geophys. (& Astrophysical — after 1977) Fluid Dyn.* 1976. Vol. 7. P. 157–161.
12. Kilroy G., Smith R.K., Montgomery M.T. A unified view of tropical cyclogenesis and intensification // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2016. DOI:10.1002/qj.2934.
13. Levina G.V. Helical organization of tropical cyclones: Preprint NI13001-TOD. Cambridge, UK: Isaac Newton Inst. for Mathematical Sciences, 2013. 47 p.
14. Levina G.V., Montgomery M.T. Helical scenario of tropical cyclone genesis and intensification // *J. Phys.: Conf. Series*. 2011. Vol. 318(7). 072012.
15. Moffatt H.-K. Helicity and singular structures in fluid dynamics // *Proc. National Academy of Sciences USA*. 2014. Vol. 111(10). P. 3663–3670.
16. Molinari J., Vollaro D. Extreme helicity and intense convective towers in Hurricane Bonnie // *Mon. Weather. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 4355–4372.
17. Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B. A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis // *J. Atmos. Sci.* 2006. Vol. 63. P. 355–386.
18. Reasor P.D., Montgomery M.T., Bosart L.F. Mesoscale observations of the genesis of Hurricane Dolly (1996) // *J. Atmos. Sci.* 2005. Vol. 62. P. 3151–3171.
19. Tur A., Chabane M., Yanovsky V. New large scale instability in rotating stratified fluids driven by small scale forces // *Open J. Fluid Dynamics*. 2013. Vol. 3. P. 340–351.

## Cloud-resolving numerical analysis of the process of helicity generation in conditions of tropical cyclogenesis

G.V. Levina, N.N. Zolnikova, L.A. Mikhailovskaya

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: levina@iki.rssi.ru*

A numerical analysis of the process of helicity generation in the tropical atmosphere of the Earth was carried out. The study was performed based on post-processing of the American data of cloud-resolving numerical simulation of tropical cyclones obtained by using the model RAMS — Regional Atmospheric Modeling System (Montgomery et al., 2006). A mechanism is discussed that generates the vertical vorticity and helicity in the tropical atmosphere due to the interaction of cloud convection with vertical shear of horizontal velocity. In connection with the fact that in all known examples of large-scale instabilities found in helical turbulent media there existed excitation thresholds depended on helicity magnitude, in this work, close attention is paid to the influence of the initial conditions on helicity generation during the first hours of the experiments. Helical flow characteristics were calculated and compared for two numerical experiments, in one of which an initial weak large-scale vortex disturbance was specified in the middle troposphere while in the other, the initial vortex was absent. The discussion is offered for the influence on helicity generation of a local heating at low levels of the troposphere, which was applied during the initial 300 seconds of experiments in order to accelerate development of cloud convection. Considered a process of generation by the local heating of a single intense helical cloud structure — the vortical hot tower (VHT), that reached its maximal intensity within the first 1-2 hours. Quantitative analysis of helicity generation by the single VHT was carried out for two different scenarios.

**Keywords:** tropical cyclogenesis, moist convective atmospheric turbulence, shear flow, helicity generation, cloud-resolving numerical analysis

*Accepted: 21.06.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-213-222*

### References

1. Levina G.V., Montgomeri M.T., O pervom issledovanii spiral'noi prirody tropicheskogo tsiklogeneza (The first examination of the helical nature of tropical cyclogenesis), *Doklady AN*, 2010, Vol. 434, No. 3, pp. 401–406.
2. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Khomenko G.A., Yanovskii V.V., Teoriya vozniknoveniya krupnomasshtabnykh struktur v gidrodinamicheskoi turbulentnosti (Theory of the origin of large-scale structures in hydrodynamic turbulence), *ZhETF*, 1983, Vol. 85, No. 6(12), pp. 1979–1987.

3. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Khomenko G.A., Shukurov A.M., Fizicheskiy mekhanizm usileniya vikhrevykh vozmushchenii v atmosfere (Physical mechanism of amplification of vortex disturbances in the atmosphere), *Doklady AN SSSR*, 1983, Vol. 273, No. 3, pp. 549–553.
4. Moiseev S.S., Rutkevich P.B., Tur A.V., Yanovskii V.V., Vikhrevoe dinamo v konvektivnoi srede so spiral'noi turbulentnost'yu (Vortex dynamo in a convective medium with helical turbulence), *ZhETF*, 1988, Vol. 94, No. 2, pp. 144–153.
5. Moffatt H.K., *Vozbuzhdenie magnitnogo polya v provodyashchei srede* (Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids), Moscow: Mir, 1980, 340 p.
6. Riehl H., *Klimat i pogoda v tropikakh* (Climat and Weather in the Tropics), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 605 p.
7. Rutkevich P.B., Uravnenie vikhrevoi neustoiichivosti, vyzvannoi konvektivnoi turbulentnost'yu i siloi Koriolisa (Equation for vortex instability caused by convective turbulence and the Coriolis force), *ZhETF*, 1993, Vol. 104, No. 6(12), pp. 4010–4020.
8. Frisch U., *Turbulentnost'. Nasledie A.N. Kolmogorova* (Turbulence: the Legacy of A.N. Kolmogorov), Moscow: Fasis, 1998, 346 p.
9. Davis C.A., Bosart L.F., Numerical simulation of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part II: Sensitivity of track and intensity prediction, *Mon. Wea. Rev.*, 2002, Vol. 130, pp. 1100–1124.
10. Hendricks E.A., Montgomery M.T., Davis C.A., The role of “vortical” hot towers in the formation of tropical cyclone Diana (1984), *J. Atmos. Sci.*, 2004, Vol. 61, pp. 1209–1232.
11. Hide R., A note on helicity, *Geophys. (& Astrophysical — after 1977) Fluid Dyn.*, 1976, Vol. 7, pp. 157–161.
12. Kilroy G., Smith R.K., Montgomery M.T., A unified view of tropical cyclogenesis and intensification, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016. DOI: 10.1002/qj.2934.
13. Levina G.V., *Helical organization of tropical cyclones*, Preprint NII3001-TOD. Cambridge, UK: Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, 2013. 47 p.
14. Levina G.V., Montgomery M.T., Helical scenario of tropical cyclone genesis and intensification, *J. Phys.: Conf. Series*, 2011, Vol. 318(7), 072012.
15. Moffatt H.-K., Helicity and singular structures in fluid dynamics, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2014, Vol. 111(10), pp. 3663–3670.
16. Molinari J., Vollaro D., Extreme helicity and intense convective towers in Hurricane Bonnie, *Mon. Weather. Rev.*, 2008, Vol. 136, pp. 4355–4372.
17. Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B., A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 2006, Vol. 63, pp. 355–386.
18. Reasor P.D., Montgomery M.T., Bosart L.F., Mesoscale observations of the genesis of Hurricane Dolly (1996), *J. Atmos. Sci.*, 2005, Vol. 62, pp. 3151–3171.
19. Tur A., Chabane M., Yanovsky V., New large scale instability in rotating stratified fluids driven by small scale forces, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2013, Vol. 3, pp. 340–351.