

**ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ СПИРАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА**

**APPLICATION OF THE CONCEPTION OF HELICITY FOR INVESTIGATION OF
TROPICAL CYCLOGENESIS**

Н.С. Ерохин¹, Г.В. Левина^{1,2}

¹*Институт космических исследований РАН*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН*

The paper concerns investigations of generating properties of helical convective atmospheric turbulence, which may result in a large-scale helical-vortex instability thereby contributing to tropical cyclogenesis. The main goal is to identify a way of how this may be responsible for the threshold of large-scale vortex instability in order to allow for it in numerical meteorological models for forecasting of weather. As a possible mechanism we consider the mechanism of turbulent vortex dynamo. According to modern physics small-scale helical turbulence has a number of special features and under certain conditions is capable of intensifying and sustaining large-scale vortex disturbances by means of energy transfer from small scales to large ones. The non-zero mean helicity of convection can arise in the in-homogeneous atmosphere. As theoretical and numerical investigations show there exists a threshold for the large-scale helical-vortex instability resulted from the vortex dynamo effect. The main averaged result of the vortex dynamo-effect is a generation of the positive feedback between horizontal and vertical circulations in a forming of large-scale vortex structure. A numerical approach is proposed for the diagnosis of helical-vortex instability in investigations of tropical cyclogenesis by means of regional atmospheric modeling systems.

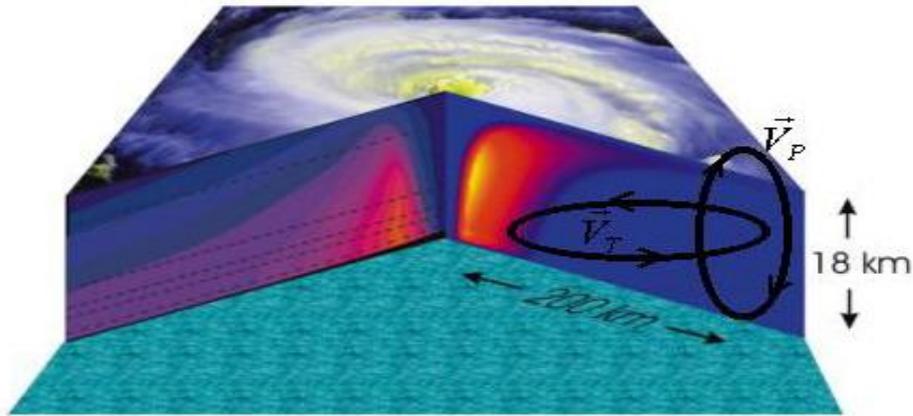
1. Моделирование тропического циклогенеза

Настоящая работа выполнена в рамках исследовательской программы по теоретическому и экспериментальному моделированию физических механизмов, действующих на стадии зарождения тропических циклонов, и изучению климатологических условий в атмосфере и океане, благоприятствующих тропическому циклогенезу. В современных исследованиях (см., например, [6, 9]) стадию тропического циклогенеза трактуют как переход от начального тропического возмущения, представляющего собой слабоинтенсивный вихрь синоптического масштаба с максимальной завихренностью в средней тропосфере, к тропической депрессии – мезомасштабному вихрю достаточной интенсивности (со средней скоростью ветра до 17 м/с), сконцентрированному вблизи подстилающей поверхности и имеющему теплое ядро. Кроме того, хорошо известно, что не всякое тропическое возмущение или тропическая депрессия развивается в вихрь ураганной силы. Это может означать существование порогов генерации вихревой неустойчивости, соответствующих различным этапам формирования зарождающегося тропического циклона. Поэтому важнейшей задачей является изучение факторов, действующих на ранних стадиях эволюции тропического циклона, с целью определить те из них, которые могут привести к формированию урагана.

Одним из возможных механизмов генерации крупномасштабной вихревой неустойчивости является турбулентное вихревое динамо [3, 4], основанное на особых генерационных свойствах мелкомасштабной спиральной турбулентности. Согласно теоретической гипотезе о турбулентном вихревом динамо [3, 4] мелкомасштабная спиральная турбулентность при некоторых условиях способна усиливать и поддерживать крупномасштабные вихревые возмущения путем переноса энергии из мелких масштабов в крупные. При действии этого механизма возбуждение крупномасштабной вихревой неустойчивости происходит пороговым образом, что показано теоретически и подтверждено численными исследованиями модели вихревого динамо [7, 8]. Основным осредненным результатом и главным признаком действия вихревого динамо-эффекта является создание положительной обратной связи между

горизонтальной и вертикальной циркуляциями в формирующейся крупномасштабной вихревой структуре. Действие такой обратной связи должно приводить к принципиальному эффекту – взаимному усилению обеих циркуляций. Именно данный эффект может быть, прежде всего, использован в целях диагностики состояний атмосферы при тропическом циклогенезе.

Применительно к тропическим циклонам эту идею иллюстрирует р. В нем на взятый из обзорной работы [5] рисунок композиционного тропического циклона, построенный как среднее по данным для нескольких тропических циклонов, наложена схема действия указанной выше спиральной обратной связи между вертикальной V_P и горизонтальной V_T циркуляциями.



Разрез композиционного тропического циклона.
Emanuel K. 2003. Tropical Cyclones.
Annu. Rev. Earth Planet. Sci., V. 31, P. 75-104.

Рис. 1.

Обработка данного подхода для диагностики крупномасштабной вихревой неустойчивости в атмосфере будет осуществляться на основе специальной обработки поля скорости, полученного с помощью региональных численных моделей атмосферы при использовании конкретных метеорологических данных. При этом предполагается выполнить анализ зарегистрированных в наблюдениях случаев как формирования тропических депрессий из начальных возмущений, так и процессов их полной эволюции, завершившихся возникновением урагана.

2. Диагностика спирально-вихревой неустойчивости

В статье [1] впервые предложено провести анализ спиральных характеристик поля скорости по имеющимся метеорологическим данным для предтайфунных состояний тропической атмосферы с целью обнаружения крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости. При этом очень важным является выбор интегральных характеристик потоков, которые позволят уверенно диагностировать возникновение спирально-вихревой неустойчивости в атмосфере. В работе [2] было проведено сравнение набора характеристик, обычно используемых при численном моделировании тропических циклонов, например, авторами [6, 9] при изучении зарождения тропического циклона Диана (1984), а также интегральных величин, примененных при моделировании спирально-вихревых эффектов в конвекции Рэля-Бенара [7]. В исследованиях тропического циклогенеза направление, начатое работами [6, 9], представляет наибольший интерес с точки зрения возможностей обнаружения спирально-вихревой неустойчивости. Моделирование тропического циклогенеза [6,9] с помощью региональной модели атмосферы RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) было выполнено на самом высоком уровне из возможных в настоящее время численных реализаций, с пространственным разрешением

горизонтальных масштабов ($2 \div 3$) км. Такое разрешение позволило показать образование тропической депрессии – вихря с диаметром порядка 100 км – как результат последовательного усиления интенсивности и укрупнения масштабов вихревых структур от размеров кучевой облачности (несколько километров по горизонтали) до «вихревых» горячих башен, представляющих собой облачные структуры с характерными горизонтальными размерами ($10 \div 30$) км, и их дальнейшего объединения. Подобный сценарий ассоциируется с представлениями об обратном каскаде энергии в турбулентности, который предполагает передачу энергии по спектру из мелких масштабов в крупные, увеличение масштабов вихревых структур и нарастание интенсивности движения в образующихся крупномасштабных вихрях. Результаты атмосферного моделирования, проведенные в работах [6, 9], согласуются с выводами теоретических работ [3, 4], предсказавших возможность образования интенсивных крупномасштабных долгоживущих вихрей в спиральной турбулентности, образующейся, например, под действием силы Кориолиса в конвективно-неустойчивой неоднородной атмосфере.

Из результатов работы [2] следует, что при моделировании тропического циклогенеза для анализа спиральных свойств поля скорости дополнительно к стандартным характеристикам, используемым в численном моделировании атмосферных вихрей, необходимо рассчитывать кинетические энергии тангенциальной $E_T = V^2$ и полоидальной $E_P = U^2 + W^2$ циркуляций (рис. 1), где U , V и W – соответственно радиальная, тангенциальная и вертикальная составляющие вектора скорости.

3. Апробация численного подхода для диагностики спирально-вихревой неустойчивости

Как предсказывают теоретические работы [3, 4] и показывают результаты лабораторных экспериментов [8], образование крупномасштабных спиральных вихрей в термоконвективной турбулентности возможно лишь в режимах интенсивной турбулентной конвекции при числах Рэлея порядка $Ra = 10^6$ и выше, когда в жидкости появляются мелкомасштабные носители тепла. При этом необходимо исследовать взаимодействие потоков, существенно различающихся своими пространственными и временными масштабами.

Численное моделирование в таких условиях представляет собой чрезвычайно сложную задачу. С одной стороны, здесь необходимо иметь достаточно высокое пространственное разрешение, чтобы было возможно явным образом оценивать вклад мелкомасштабных турбулентных движений. С другой стороны, отношение горизонтального масштаба к вертикальному должно быть достаточно большим (порядка 10:1) для того, чтобы наглядно продемонстрировать эффект укрупнения горизонтальных масштабов формирующихся структур.

Авторами [7] предложен оригинальный численный подход для исследования крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости в условиях развитой термоконвективной турбулентности. Основная идея подхода состоит в применении специального форсинга – модельной силовой функции, имеющей физическую интерпретацию. Эта функция моделирует влияние мелкомасштабной спиральной турбулентности, образующейся в условиях действия двух физических факторов – вращения и внутреннего выделения тепла. Явный вид силы совпадает с тензорной структурой генерационного альфа-члена в уравнении среднего поля скорости, описывающего гидродинамический альфа-эффект в конвективной системе [8]. В отличие от общепринятых подходов к моделированию турбулентности в данном случае форсинг не генерирует турбулентность с заданными свойствами, а прикладывается к развитым конвективным течениям и воздействует на них достаточно «мягко»: форсинг

лишь создает спиральную структуру течения и инициирует положительную обратную связь между полоидальным и тороидальным компонентами векторного поля скорости.

Рассматриваемый подход позволяет детально изучить свойства спирального форсинга и возникающих в этих условиях спирально-вихревых конвективных течений на сравнительно простой для численной реализации задаче.

Подход опробован на классической задаче о конвекции Рэлея-Бенара в протяженном горизонтальном слое несжимаемой жидкости, подогреваемого снизу и вращающемся вокруг вертикальной оси [1, 7]. В разработанном подходе спирально-вихревые эффекты моделируются с помощью введения в уравнение движения специальной модельной силы.

Рассмотрим конвективные течения, возбуждаемые спиральной силой \mathbf{f} во вращающемся, подогреваемом снизу, цилиндрическом слое жидкости [1]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{1}{Pr} \mathbf{V} \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \Delta \mathbf{V} + Ra T \mathbf{e} + Ta^{1/2} (\mathbf{e} \times \mathbf{V}) + S \mathbf{f},$$

$$Pr \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla T = \Delta T, \quad \text{div } \mathbf{V} = 0,$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{e} \cdot (\text{rot } \mathbf{V})_z - \frac{\partial (\mathbf{e} \times \mathbf{V})}{\partial z}, \quad \mathbf{e} = \{0, 0, 1\},$$

$$Ra = \frac{gb(T_1 - T_2)h^3}{nc}, \quad Pr = \frac{n}{c}, \quad Ta = \frac{4\Omega^2 h^4}{n^2}, \quad S = \frac{a\Omega h^2}{n},$$

где \mathbf{V} – скорость, p – давление, T – температура, \mathbf{e} – единичный вектор вдоль вертикальной оси; Ra , Pr и Ta – безразмерные числа Рэлея, Прандтля и Тейлора; S – безразмерный параметр, характеризующий интенсивность силы \mathbf{f} , Ω – угловая скорость вращения слоя. Высота слоя h , характерная разность температур между торцами цилиндра ($T_1 - T_2$), величины h^2/ν , χ/h и $\rho_0 \nu \chi/h^2$ выбраны в качестве единиц измерения длины, температуры, времени, скорости и давления.

В целях численной реализации поставленная задача формулируется [7] для четырех физических переменных (функция тока, завихренность, азимутальная скорость и температура) и исследуется численно с помощью метода конечных разностей. Наиболее простая численная реализация, позволяющая перейти от трехмерной задачи к двумерной, сохраняя при этом все три компоненты скорости для обеспечения ненулевой спиральности поля скорости, достигается для цилиндрической расчетной области при условии осевой симметрии. Рассматривается цилиндр в виде «шайбы», радиус которого значительно больше высоты $R:h = 10:1$. Все ограничивающие поверхности предполагаются непроницаемыми твердыми стенками. Тепловые граничные условия включают заданные температуры на торцах цилиндра, соответствующие подогреву снизу, а на боковой поверхности ставится условие отсутствия теплового потока.

В работах [1, 7, 8] эволюция спирально-вихревой неустойчивости прослеживалась с помощью таких интегральных характеристик течения как полная спиральность течения в расчетной области $H = \int \langle \mathbf{V} \cdot \text{rot } \mathbf{V} \rangle d\mathbf{r}$ и полная кинетическая энергия течения. Кроме того, по отдельности рассчитывались кинетические энергии тороидальной (тангенциальная скорость) и полоидальной циркуляций (сумма

радиальной и вертикальной скорости), чтобы диагностировать возникновение положительной обратной связи между ними при формировании спиральных вихрей. Согласно теоретическим и численным результатам [1, 7, 8], генерация обратной связи является основным осредненным результатом и первым признаком возникновения в системе спирально-вихревой неустойчивости. Спиральная обратная связь должна обеспечить непосредственное взаимодействие между циркуляциями без привлечения каких-либо дополнительных механизмов, например, поверхностного трения, как это часто делается в современных численных моделях тропических циклонов.

Были проведены численные эксперименты при варьировании параметров задачи в диапазонах $1000 \leq Ra \leq 3000$, $0 \leq Ta \leq 1000$, $0 \leq S \leq 7$. Число Прандтля во всех случаях полагалось равным 1. При этом были получены спирально-вихревые режимы с различным числом структур в расчетной области (отношение радиуса к высоте было 10:1): – от одного крупномасштабного вихря, занимавшего всю область, до девяти мелких конвективных ячеек, у каждой из которых горизонтальный и вертикальный масштабы были примерно одинаковы.

Анализ интегральных данных для полученного набора спирально-вихревых течений показал [2], что эволюция пары характеристик вертикальная скорость – вертикальный компонент завихренности, повсеместно используемой при анализе атмосферных данных, также свидетельствует о развитии новой неустойчивости. Однако с помощью только этих двух величин не удастся «поймать» порог неустойчивости. Это связано с тем, что в вертикальный компонент завихренности дают вклад тангенциальная и радиальная скорости, первая из которых образует тороидальное поле, а вторая входит в полоидальное поле скорости. Такое их «пересечение» не позволяет точно определить момент возникновения спиральной обратной связи между тороидальной и полоидальной циркуляцией. Кроме того, вертикальный компонент завихренности в отличие от кинетической энергии не является знакоопределенной величиной, что также затрудняет его использование для целей диагностики спирально-вихревой неустойчивости.

Применение указанного выше форсинга для численного моделирования ламинарной спиральной конвекции позволило обнаружить целый ряд качественно новых эффектов [7]. В частности, показано, как происходит генерация ненулевой средней спиральности поля течения и организуется петля положительной обратной связи между вертикальной V_p и горизонтальной V_T циркуляциями, приводящая к резкому возрастанию кинетической энергии течения. Таким образом, с помощью выполненных численных расчетов доказано, что применение модельной силы позволяет управлять как порогом возникновения вихревой неустойчивости, так и размерами образующихся конвективных структур и интенсивностью движения в них.

Важно отметить и следующий принципиальный результат выполненного анализа. Обнаружено, что одним из проявлений спирально-вихревой неустойчивости является тенденция к слиянию мелкомасштабных спиральных конвективных ячеек, сопровождающемуся укрупнением горизонтального масштаба вихревых структур, а также значительным увеличением кинетической энергии в формирующихся более крупных вихрях и существенной интенсификацией процессов теплопереноса. В качестве иллюстрации этого утверждения на рисунке 2 представлены результаты численных расчетов, наглядно показывающие динамику структурообразования и энергетику рассматриваемого процесса. При $Ta = 0$ и $S = 0$ из точечного начального вихря, расположенного в центре исследуемой области, на начальной стадии в интервале времени $0 < t < 10$ формируется хорошо установившийся стационарный режим естественной конвекции, включающий девять конвективных структур. Затем при $t = 10$ задается $S = 6$ и тем самым в системе вводится спиральный форсинг. Четыре нижних панели показывают изменение структуры течения в последовательные моменты времени, а график энергии позволяет проследить, как при этом увеличивается

кинетическая энергия, причем изломы на графике соответствуют моментам слияния образовавшихся ячеек.

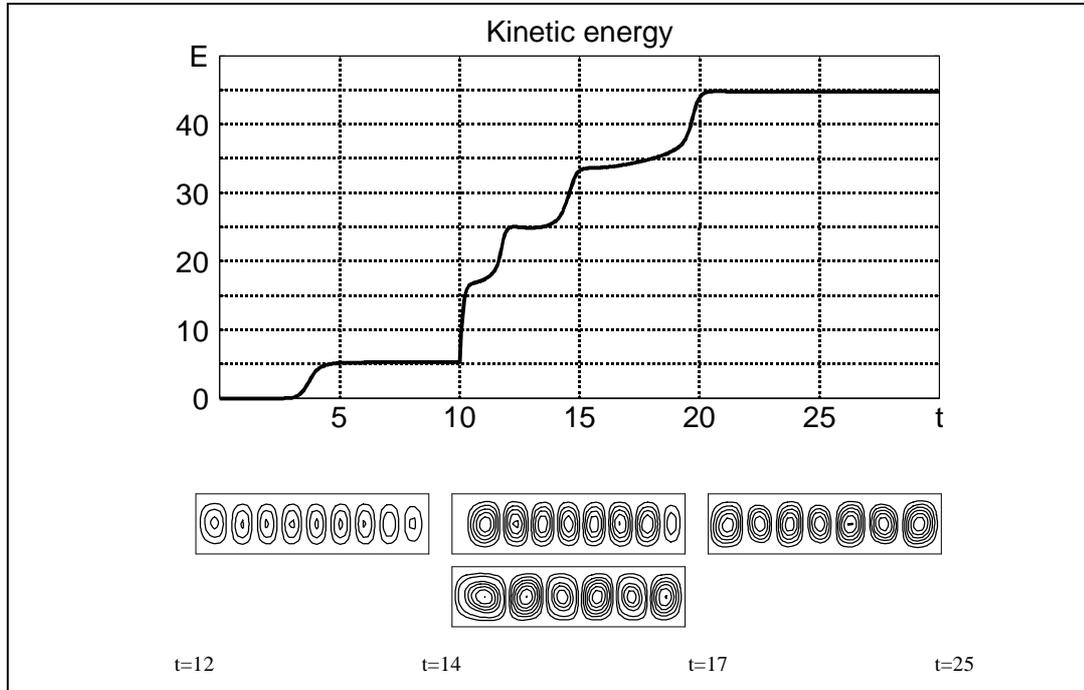


Рис. 2.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 07-05-00060.

Список литературы

1. Левина Г.В. О параметризации спиральной турбулентности для численных моделей интенсивных атмосферных вихрей // Доклады АН. 2006. Геофизика. Т. 411, № 3. С. 400-404.
2. Левина Г.В., Ожгибесов А.С. Численный анализ спиральных свойств поля скорости в предтайфунных состояниях тропической атмосферы. Международная конференция "Потоки и структуры в жидкостях". Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2-5 июля 2007 (в печати).
3. Моисеев 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.
4. Моисеев 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.
5. Emanuel K. Tropical Cyclones // Annual Review of Earth and Planetary Science. 2003. V. 31. P. 75-104.
6. 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. V. 61. P. 1209-1232.
7. Levina G.V., Burylov I.A. Numerical simulation of helical-vortex effects in Rayleigh-Benard convection // Nonlinear Processes in Geophysics. 2006. V. 13. P. 205-222.
8. Levina G.V., Moiseev S.S., Rutkevich P.B. Hydrodynamic alpha-effect in a convective system. Series: Advances in Fluid Mechanics, vol. 25. *Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence*. Eds. L. Debnath and D.N. Riahi. 2000. Vol. 2. P. 111-161. WIT Press, Southampton, Boston.
9. Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B. A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. P. 355-386.